

試錐孔用高周波弾性波振源開発のための 基礎データの取得

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1994年3月

株式会社 間 組

開示区分	資料区分
Z	J
7年12 94-001	
1994年5月13日受入 動燃事業団・中部事業所	

試錐孔用高周波弾性波振源開発のための 基礎データの取得

(動力炉・核燃料開発事業団 契約業務報告書)

1994年3月

株式会社 間 組

この資料は、動燃事業団社内における検討を目的とする限定資料です。ついては、複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう注意して下さい。

本資料についての問い合わせは下記に願います。

〒509-51

岐阜県土岐市泉町定林寺字園戸959-31

動力炉・核燃料開発事業団

中部事業所

技術開発課

試錐孔用高周波弾性振源開発のための基礎データの取得

島辺賢一郎* 世一英俊** 蓮井昭則**

要 旨

坑道の掘削による周辺岩盤の「ゆるみ領域」の特性を弾性波を用いて正確に評価するためには、高周波波動の弾性波を用いた試錐孔間での測定が必要となる。

試錐孔内で高周波弾性波波動を発振する装置を開発するために、既存技術の調査や専門技術者へのヒヤリングを行い、高周波波動の振源として圧電素子による発振方法が利用可能であると判断された。また、圧電素子の代表として市販されている2種類の圧電型発振素子を振源とした基礎試験を行い、発振周波数や発振エネルギーなど振源の設計に必要な基礎データを取得した。

本報告書は、株式会社間組が動力炉・核燃料開発事業団の委託により実施した業務の成果である。

契約番号：05C1091

事業団の担当部課室および担当者：中部事業所技術開発課 長谷川 健

*株式会社間組技術本部原子力部

**株式会社間組技術本部技術研究所

March, 1994

The basic test to develop a high frequency seismic source in borehole

Ken-ichiro Shimabe *

Hidetoshi Yoichi **

Akinori Hasui **

Abstract

To describe precisely the excavation effects on rock mass in the proximity of tunnels by means of cross-hole seismic measurements, it is necessary to develop a high frequency seismic source.

At the first stage to develop a high frequency seismic source, the device which can get high frequency seismic wave in borehole was looked into the technical reports and opinions, a seismic source by piezoelectric vibrator was selected. The frequency and amplitude of the seismic wave by generated two type piezoelectric vibrators were measured.

Work performed by HAZAMA Corporation under contract with Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC).

PNC Liaison : KEN HASEGAWA, PNC Chubu Works

* Technology Division of HAZAMA Corporation

** Technical Research Institute of HAZAMA Corporation

目 次

1. 試錐孔用高周波弾性発振源の既存技術の調査	1
1. 1 孔内発振方法の特徴と課題	1
1. 2 孔内受振方法の検討	6
1. 3 発振諸元の検討	7
1. 4 まとめ	8
2. 試験概要	9
2. 1 試験目的	9
2. 2 試験体および装置	9
2. 3 試験方法	18
2. 4 試験項目	19
2. 5 実施工程	20
3. 圧電素子による周波数・振幅試験	22
3. 1 実験1 (単体発振)	22
3. 2 実験2 (並列発振、中央固定)	32
3. 3 実験3 (並列発振、中央振り分け)	49
3. 4 実験4 (並列発振、3個)	65
3. 5 実験5 (直列発振)	78
4. 圧電アクチュエータによる周波数・振幅試験	82
4. 1 実験6 (単体発振)	82
4. 2 実験7 (並列発振、中央固定)	92
4. 3 実験8 (並列発振、中央振り分け)	99
4. 4 実験9 (並列発振、3個)	106
4. 5 実験10 (直列発振)	112
5. 指向特性試験	116
5. 1 実験11 (圧電素子)	116
5. 2 実験12 (圧電アクチュエータ)	131

6. 考察	-----	146
6. 1 圧電素子の初動振幅と周波数特性	-----	146
6. 2 圧電アクチュエータの初動振幅と周波数特性	-----	151
6. 3 指向特性	-----	155

付 録

- 資料-1 打ち合わせ議事録
- 資料-2 ヒヤリングメモ
- 資料-3 発振素子、装置のパンフレット
- 資料-4 物性試験結果
- 資料-5 スペクトル分析結果

目 次

図-1.1	既存の発振方法の種類	1
図-1.2	孔内用スパーカーの概要	2
図-1.3	OWSの概要	3
図-1.4	スペクトル分析結果	3
図-1.5	ハザマ式弾性波装置の概要	4
図-1.6	vibrometric社製発振装置の概要	5
図-1.7	既存の受振装置	6
図-2.1	周波数・振幅測定試験の試験体(砂セメント比=2:1)	10
図-2.2	指向特性試験の試験体(砂セメント比2:1)	12
図-2.3	反力ブロック、固定台	13
図-2.4	圧電素子の寸法(NBL-45282HA1)	14
図-2.5	圧電アクチュエータの概要(MLA10x10x18)	15
図-2.6	発振、受振装置および接続	16
図-2.7	発振素子の装置	18
図-2.8	指向特性試験の概要	21
図-2.9	受振波動の整理	19
図-3.1	実験1の概要	23
図-3.2	初動振幅の大きさ	25
図-3.3	初動周波数	25
図-3.4	P波速度	26
図-3.5	受振波動	27
図-3.6	初動振幅の大きさ	28
図-3.7	初動周波数	28
図-3.8	P波速度	29
図-3.9	受振波動	30
図-3.10	初動振幅の大きさ	31
図-3.11	初動周波数	31
図-3.12	P波速度	32
図-3.13	受振波動	32

図-3.14	実験2の概要	-----	33
図-3.15	初動振幅の大きさ	-----	35
図-3.16	初動周波数	-----	35
図-3.17	P波速度	-----	36
図-3.18	受振波動	-----	37
図-3.19	初動振幅の大きさ	-----	38
図-3.20	初動周波数	-----	38
図-3.21	P波速度	-----	39
図-3.22	受振波動	-----	40
図-3.23	初動振幅(発振1個の場合)	-----	41
図-3.24	受振波動(発振1個の場合)	-----	42
図-3.25	初動振幅の大きさ	-----	43
図-3.26	初動周波数	-----	43
図-3.27	P波速度	-----	44
図-3.28	受振波動	-----	45
図-3.29	初動振幅の大きさ	-----	46
図-3.30	初動周波数	-----	46
図-3.31	P波速度	-----	47
図-3.32	受振波動(1)	-----	48
図-3.33	受振波動(2)	-----	49
図-3.34	実験3の概要	-----	50
図-3.35	初動振幅の大きさ	-----	52
図-3.36	初動周波数	-----	52
図-3.37	P波速度	-----	53
図-3.38	受振振幅	-----	54
図-3.39	初動振幅の大きさ	-----	55
図-3.40	初動周波数	-----	55
図-3.41	P波速度	-----	56
図-3.42	受振波動(1)	-----	57
図-3.43	受振波動(2)	-----	58
図-3.44	初動振幅の大きさ	-----	59
図-3.45	初動周波数	-----	59
図-3.46	P波速度	-----	60
図-3.47	受振波動	-----	61
図-3.48	初動振幅の大きさ	-----	62

図-3.49	初動周波数	-----	6 2
図-3.50	P 波速度	-----	6 3
図-3.51	受振波動 (1)	-----	6 4
図-3.52	受振波動 (2)	-----	6 5
図-3.53	実験 4 の概要	-----	6 6
図-3.54	初動振幅	-----	6 8
図-3.55	初動周波数	-----	6 8
図-3.56	P 波速度	-----	6 9
図-3.57	受振波動	-----	7 0
図-3.58	初動振幅の大きさ	-----	7 1
図-3.59	初動周波数	-----	7 1
図-3.60	P 波速度	-----	7 2
図-3.61	受振波動	-----	7 3
図-3.62	電圧による初動振幅の変化	-----	7 4
図-3.63	矩形パルス幅による初動振幅の変化	-----	7 4
図-3.64	受振波動	-----	7 5
図-3.65	初動振幅の大きさ	-----	7 6
図-3.66	初動周波数	-----	7 6
図-3.67	P 波速度	-----	7 7
図-3.68	受振波動	-----	7 8
図-3.69	実験 5 の概要	-----	7 9
図-3.70	初動振幅の大きさ	-----	8 0
図-3.71	初動周波数	-----	8 0
図-3.72	P 波速度	-----	8 1
図-3.73	受振波動	-----	8 2
図-4.1	実験 6 の概要	-----	8 3
図-4.2	初動振幅の大きさ	-----	8 5
図-4.3	初動周波数	-----	8 5
図-4.4	P 波速度	-----	8 6
図-4.5	受振波動	-----	8 7
図-4.6	初動振幅の大きさ	-----	8 8
図-4.7	初動周波数	-----	8 8
図-4.8	P 波速度	-----	8 9
図-4.9	受振波動	-----	9 0

図-4.10	受振振幅の大きさ	-----	9 1
図-4.11	初動周波数	-----	9 1
図-4.12	P波速度	-----	9 2
図-4.13	受振波動	-----	9 2
図-4.14	実験7の概要	-----	9 3
図-4.15	初動振幅の大きさ	-----	9 4
図-4.16	初動周波数	-----	9 4
図-4.17	P波速度	-----	9 5
図-4.18	受振波動	-----	9 6
図-4.19	初動振幅の大きさ	-----	9 7
図-4.20	初動周波数	-----	9 7
図-4.21	P波速度	-----	9 8
図-4.22	受振波動	-----	9 9
図-4.23	実験8の概要	-----	1 0 0
図-4.24	初動振幅の大きさ	-----	1 0 1
図-4.25	初動周波数	-----	1 0 1
図-4.26	P波速度	-----	1 0 2
図-4.27	受振波動	-----	1 0 3
図-4.28	初動振幅の大きさ	-----	1 0 4
図-4.29	初動周波数	-----	1 0 4
図-4.30	P波速度	-----	1 0 5
図-4.31	受振波動	-----	1 0 6
図-4.32	実験9の概要	-----	1 0 7
図-4.33	受振波動	-----	1 0 9
図-4.34	初動振幅の大きさ	-----	1 1 0
図-4.35	初動周波数	-----	1 1 0
図-4.36	P波速度	-----	1 1 1
図-4.37	受振波動	-----	1 1 2
図-4.38	実験10の概要	-----	1 1 3
図-4.39	初動振幅の大きさ	-----	1 1 4
図-4.40	初動周波数	-----	1 1 4
図-4.41	P波速度	-----	1 1 5
図-4.42	受振波動	-----	1 1 6

図-5.1	実験11の概要	-----	117
図-5.2	初動振幅の大きさ	-----	119
図-5.3	初動周波数	-----	119
図-5.4	P波速度	-----	120
図-5.5	A孔での受振波動	-----	121
図-5.6	B孔での受振波動	-----	122
図-5.7	初動振幅の大きさ	-----	123
図-5.8	初動周波数	-----	123
図-5.9	P波速度	-----	124
図-5.10	A孔での受振波動	-----	125
図-5.11	初動振幅の大きさ	-----	126
図-5.12	初動周波数	-----	126
図-5.13	P波速度	-----	127
図-5.14	A孔での受振波動	-----	128
図-5.15	初動振幅の大きさ	-----	129
図-5.16	初動周波数	-----	129
図-5.17	P波速度	-----	130
図-5.18	A孔での受振波動	-----	131
図-5.19	実験12の概要	-----	132
図-5.20	初動振幅の大きさ	-----	133
図-5.21	初動周波数	-----	134
図-5.22	P波速度	-----	135
図-5.23	A孔での受振波動	-----	136
図-5.24	B孔での受振波動	-----	137
図-5.25	初動振幅の大きさ	-----	138
図-5.26	初動周波数	-----	138
図-5.27	P波速度	-----	139
図-5.28	A孔での受振波動	-----	140
図-5.29	初動振幅の大きさ	-----	141
図-5.30	初動周波数	-----	141
図-5.31	P波速度	-----	142
図-5.32	A孔での受振波動	-----	143
図-5.33	初動振幅の大きさ	-----	144
図-5.34	初動周波数	-----	144
図-5.35	P波速度	-----	145

図-5.36	A孔での受振波動	-----	146
図-6.1	ボーリング孔の影響確認測定	-----	150
図-6.2	圧電アクチュエータの拘束方法	-----	152
図-6.3	拘束の違いによる測定結果	-----	153

表 目次

表-1.1	測定方法の比較	8
表-2.1	受振装置の諸元	1 7
表-2.2	試験体の物性試験結果	1 8
表-2.3	試験項目と実験番号	2 0
表-2.4	実施工程	2 0
表-3.1	測定結果一覧(実験1)	2 4
表-3.2	測定結果一覧(実験2)	3 4
表-3.3	測定結果一覧(実験3)	5 1
表-3.4	測定結果一覧(実験4)	6 7
表-3.5	測定結果一覧(実験5)	7 9
表-4.1	測定結果一覧(実験6)	8 4
表-4.2	測定結果一覧(実験7)	9 3
表-4.3	測定結果一覧(実験8)	1 0 0
表-4.4	測定結果一覧(実験9)	1 0 7
表-4.5	測定結果一覧(実験10)	1 1 3
表-5.1	測定結果一覧(実験11)	1 1 8
表-5.2	測定結果一覧(実験12)	1 3 3
表-6.1	初動振幅に対する電圧の影響	1 4 7
表-6.2	圧電素子数、配置の影響	1 4 8
表-6.3	初動振幅に対する発振・受振距離の影響	1 4 9
表-6.4	素子間隔の振幅比に対する影響	1 5 0
表-6.5	初動波動の周波数	1 5 1
表-6.6	圧電素子1個での初動波動の周波数	1 5 1
表-6.7	初動振幅に対する電圧の影響	1 5 2
表-6.8	圧電アクチュエータ数、配置の影響	1 5 4
表-6.9	初動振幅に対する発振・受振距離の影響	1 5 5

表-6.10	初動波動の周波数	-----	156
表-6.11	圧電アクチュエータ1個での初動波動の周波数	-----	156
表-6.12	指向特性の結果	-----	157
表-6.13	指向特性の結果	-----	158
表-6.14	発振点での初動振幅の推定(平面波の式による)	-----	159
表-7.1	試験結果のまとめ(圧電素子)	-----	160
表-7.2	試験結果のまとめ(圧電アクチュエータ)	-----	161

1. 試錘孔用高周波弾性発振源の既存技術の調査

試錘孔内での弾性波発振方法について、専門家によるヒヤリングおよび文献調査を行った。ヒヤリングは石油探査関係者と土木コンサルタント関係者の実際に調査する業務にたずさわっている技術者、ソナーメーカーの技術者、圧電素子メーカー、計測機器メーカーなどの専門家を対象に実施した。それらの結果をもとに、孔内発振方法、孔内受振方法の現状と課題についてまとめた。

1.1 孔内発振方法の特徴と課題

ダイナマイト等の爆薬を使用しない孔内の発振方法は大きく衝撃波タイプ（インパルスタイプ）と連続波タイプに分けられる（図-1.1参照）。そのうち、孔内で高周波波動を発生する方法としてインパルスタイプではスパーク、OWS、ハザマ式、圧電素子式が、連続波タイプでは圧電素子式などが挙げられ、これらについて特徴と課題点を中心にヒヤリングした。

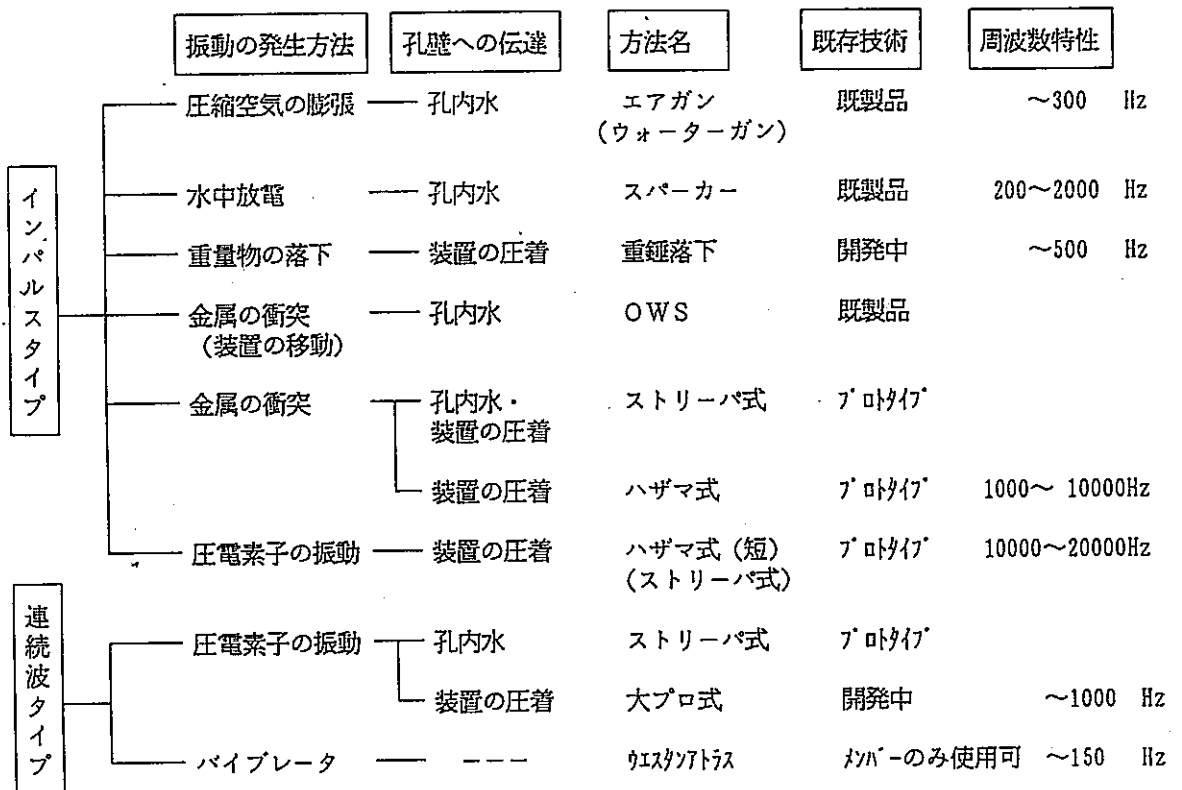


図-1.1 既存の発振方法の種類

(1) 衝撃波的な発振

衝撃波を利用して発振する方法では、発振と同時に種々の周波数の波動が発生するため、パルス状の波動のみを作ることは難しい。ただし、低周波数のみに限定すれば、原位置岩盤への適用の可能性はある。

しかし、装置内で発生させた振動は装置内での反射、あるいは水を介した岩盤への伝達の場合の孔壁での反射などにより、複合波になってしまい、受振の感度を上げるほどその波動を取り込んでしまう現象が起きる。この現象は衝撃波による発振方法では常に発生する問題点である。

現在、孔内で高周波の弾性波動を発振する方法を、その機構から分類すれば以下のようなになる。

- | | |
|--------------|---------------|
| 水を介した衝撃による発振 | : スパークー、O W S |
| 金属の衝突による発振 | : ハザマ式 |
| ピエゾ効果による発振 | : 複数の圧電素子 |

① スパークー

水中での電気の放電による衝撃を利用する方法で、孔内用に改良した装置がある（代表的な装置はテレダイインジャパン製）。図-1.2に孔内で使われているスパークーの概要を示す。

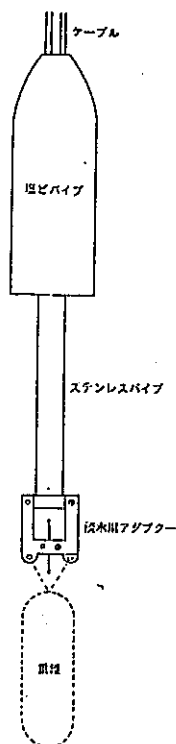


図-1.2 孔内用スパークーの概要
(テレダイインジャパン製)

基本的には衝撃波のため低周波から高周波までの波動を発生させているが、ほとんどの場合、受振器がジオフォン（低周波成分優先）であり、高周波成分の大きさが議論されたことはない。しかし、高周波成分のエネルギーは小さいと考えられる。また、発振波動の大きさの再現性や孔内水が必要であることなどが課題点である。

② 孔中非爆薬振源（OWS：応用地質製の孔内水中発振装置）

鉛直孔の孔内で多層円板に重錘を落下させた衝撃で円板間の水を装置の側方に押しやり、その振動を振動源とする方法である。図-1.3にOWSの概要を示す。発振源近くで測定された波動のスペクトル分析結果を図-1.4に示すが、これより2kHz程度以下の波動が発振されていることが分かる。発振波動の周波数が比較的低いこと、孔内水が必要であることが課題点である。

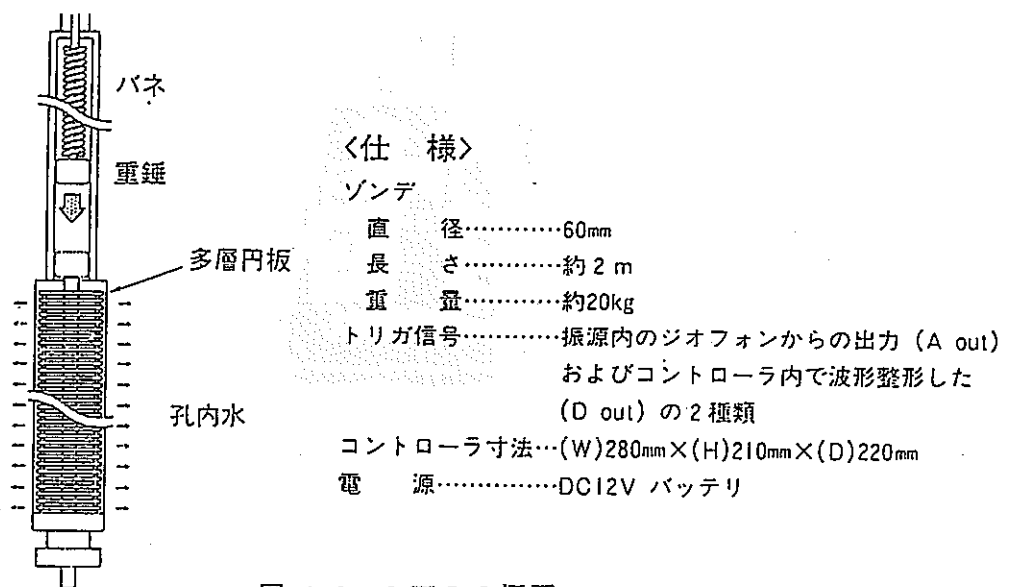


図-1.3 OWSの概要

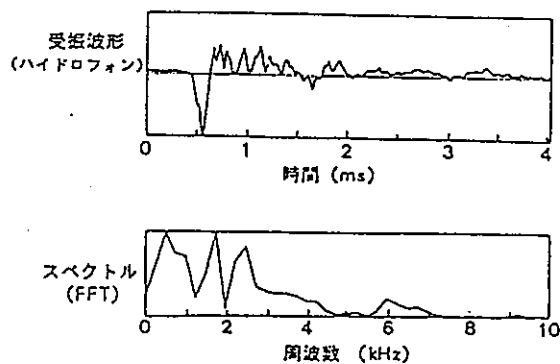


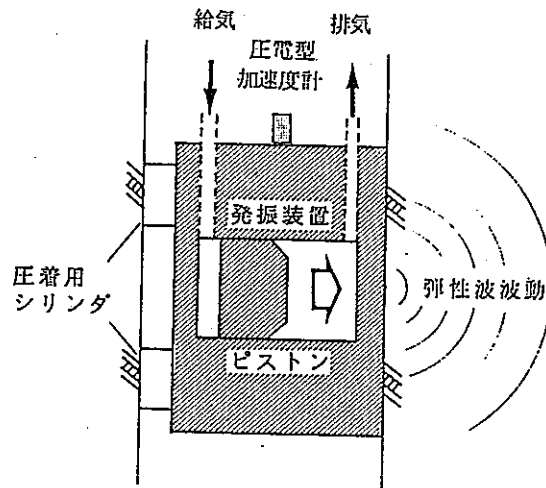
図-1.4 スペクトル分析結果

③ 機械的発振源（ハザマ式弾性波装置）

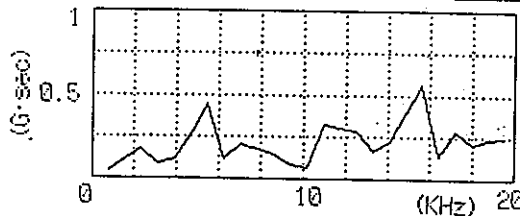
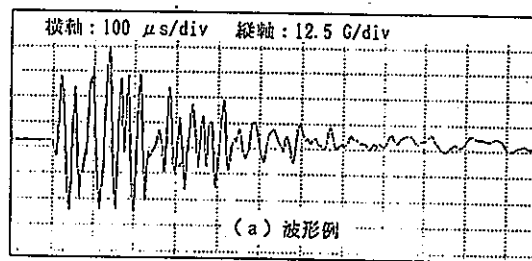
発振装置内で金属性のピストンを動かし、発振装置（金属性）と衝突する際発生する振動を発振源とする方法で、装置を孔壁面に圧着することにより、孔内水のない状態でも発振が可能である。発振装置の概要と発振波動のスペクトル分析結果を図-1.5に示すが、5 KHz～15 KHz程度の波動を発振することができる。高周波波動のエネルギー量が小さいことが課題点である。

④ 圧電素子による振源

圧電素子のピエゾ効果による発振は、孔内検層装置や岩石コアの超音波測定装置に用いられており、最も簡単に20 KHzを越える超音波発振を行うことが可能である。しかし、発振エネルギーの小さいことが課題点である。



(a) 発振方法



(b) フーリエスペクトル

(b) スペクトル分析結果

図-1.5 ハザマ式弾性波装置の概要

(2) 連続波的な発振

連続波（例えばスイープ波）を用いた発振方法を用いれば、個々の波のエネルギーは小さくても、数多くの波を岩盤に送り込むことによって結果として大きなエネルギーの波を岩盤に伝えることができる。一般に圧電素子を発振源とし、それに指数関数的な電圧を周波数を変化させながら与えることにより、連続波を得ることができる。

Vibrometric社の発振装置は2個の多層圧電素子に向かい合わせて配置し、共振させることにより発振エネルギーを増加させ、さらに、2個間の間隔を変化させることによって共振波動の周波数を変化させている。装置の概要を図-1.6に示すが、連続波の周波数範囲は1 Hz～9999Hzである。

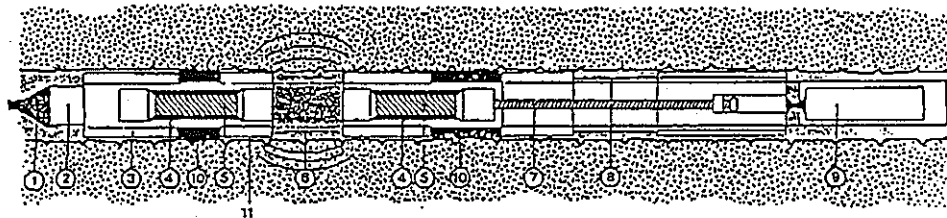


図 - 1. 6 Vibrometric社製発振装置の概要

(3) 各種の孔内発振方法の課題点

① スパーク

発振方法として確立されたものであり、発振エネルギーは電圧の上げ下げで調整することができる。しかし、高周波成分のエネルギーがどの程度であるのかが不明である。したがって、高周波成分のエネルギー量の実測、高周波成分を大きくするための放電方法の検討が課題である。再現性については疑問点もある。

② ハザマ式発振方法

低周波成分が少なく、比較的高周波の波動を発生させる方法としては有望であるが、エネルギー量が小さい。効率よくエネルギーを大きくする方法や波動の指向性が課題である。

③ 圧電素子式

エネルギーが小さいことが最も大きな課題である。圧電素子を複数個使用するなど、発振エネルギーを大きくする方法に関する検討が必要である。波動の指向性も課題となる。

④ 連続波

現在、測定に利用されている連続波の上限周波数は1 KHz程度であり、これをさらに周波数を高くする方法が課題の1つである。また、弾性波波動の到達時間や振幅の大きさの計算は、発振と同じ周波数の波動が受振されるという仮定の基に行われているが、実測のように波動がなまったときの計算精度について検討する必要がある。

1.2 孔内受振方法の検討

孔内で受振するために用いられている受振子として一般に変位計、速度計や加速度計などが用いられている。マイクロフォンは高周波成分（1～10KHz）を受振する事が可能である。また、代表的な加速度計である圧電型加速度計は仕様によっては100 KHz以上の波動を計測することが可能である。また、直交3方向に受振子を配置することによって波動の伝播方向などの測定も可能である。図-1.7に受振方法の諸元分類を示す。

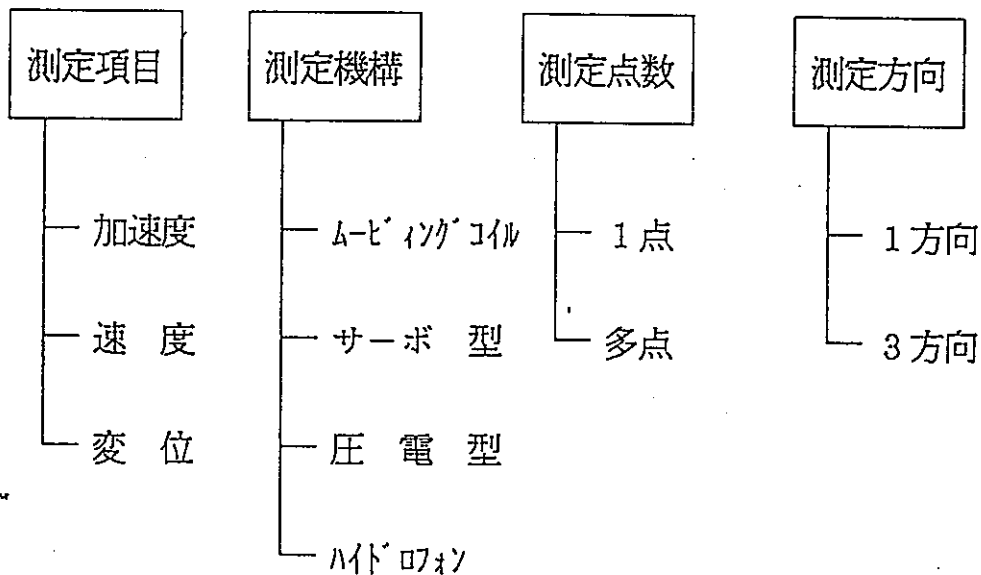


図-1.7 既存の受振装置

1.3 発振諸元の検討

トンネル側壁岩盤において、孔間距離約10mのクロスホール測定による弾性波P波速度、振幅の測定および、トモグラフィ解析（トモグラフィ要素1 m×1 m程度）を用いて、トンネル側壁岩盤の状況（ゆるみを含む）を詳細に解析することを想定し、この場合の測定に必要な条件を検討する。

①弾性波波長の周波数、波長

トモグラフィ解析を1 m×1 m程度の要素を用いて実施する場合、解析結果を意義のあるものにするためには、弾性波波長の波長を要素の大きさ（1 m）より小さくすることが重要である。岩盤の弾性波速度を3000m/s程度と仮定し、波長を1 mとすると、周波数が3 KHz以上の弾性波波長で測定することが必要となる。

②発振の再現性

振幅を解析対象にする場合、発振波長の形状や大きさができるだけ一定している必要がある。また、発振波長を直接測定し受振波長と比較することができるとも必要である。なお、パルス波の発振による測定が振幅を評価するためには最も適している。

③波動エネルギー

岩盤中を十数m伝播し、S/N比の良い波動を受振するために十分な発振力が必要である。

④受振方法

受振器は3 KHz以上の高周波波長の測定に対応できる十分に広い周波数帯域を有している必要があり、かつ弾性波の伝播方向を把握できる受振方法にすることが望ましい。

⑤ボーリング孔径

測定装置は土木分野で一般的に用いられているφ66mmのボーリング孔に挿入して測定が可能であることが望ましい。

1.4 まとめ

既存技術の調査結果と発振に必要な条件から見た測定方法の比較を表-1.1に示す。発振周波数が高く波動の再現性の良好な圧電素子を用いた発振方法が適合性が高いと判断される。

表-1.1 測定方法の比較

発振方法	発振方法	発振波動（周波数）	波動の再現性	測定への適合性
衝 撃 波				
雷 管	爆 発 →→→孔壁	混合	不良	×
スパーカー	水中放電 →水→孔壁	混合 高周波のエネルギーは小さい	不明	△
エアガン	圧縮空気の膨張→水→孔壁	混合 周波数は低い	不良	×
OWS	板の移動 →水→孔壁	混合	良好	△
ハザマ式	金属の衝突 →→→孔壁	混合 5~15KHz程度、エネルギー中	良好	△
圧電素子式	圧電素子 →→→孔壁	混合 20KHz程度、エネルギー小	良好	○
連 続 波				
地科研式	圧電素子 →→→孔壁	1 KHz以下、孔径100mm以上、軟岩100m	-	×
Vibrömetric	圧電素子 →水→孔壁	10KHz以下、孔径56mm以上	-	○

2. 試験概要

2.1 試験目的

本試験は、振源の設計に必要な基礎データの取得を目的に、高周波振源の発振素子として利用可能と考えられる既存の素子について、発振周波数や発振エネルギー等のデータを取得するために実施した。

試験では、均質なモルタルブロックの側壁面に発振素子を一定圧力で固定し、素子から発振された弾性波を試錐孔内に設置された圧電型加速度計で受振する。このとき、発振素子の種類や配列を変化させ、周波数、振幅の大きさおよび波動の指向性などの変化を測定する。

2.2 試験体および装置

(1) 試験体

試験に用いる弾性波の媒体（試験体）には、ほぼ等方等質な弾性体であり弾性波速度、振幅減衰定数が一定である材料であること、測定対象となる受振波動に反射波などが混入しないことが必要となる。

① モルタルブロック

試験体の材料には、ほぼ等方等質の材料を得ることができ、かつ製作が比較的容易であるセメントモルタル（砂セメント比＝2：1）を用いた。弾性波の媒体として試験に使用するモルタルブロック試験体のうち、周波数及び振幅の測定に用いる試験体を図-2.1、写真-2.1、写真-2.2に示す。また、セメントモルタルを伝播する弾性波P波速度を4000m/s、周波数を4kHzと仮定し、発振点、受振点の位置から直接波の初動波動に反射波が混入しないために、試験体の大きさは、幅1.4m×高さ1.4m×長さ2mとした。

一方、指向特性の測定に用いる試験体についても、同様にして試験体の大きさを決定した。図-2.2、写真-2.3に指向特性の測定に用いる試験体を示す。

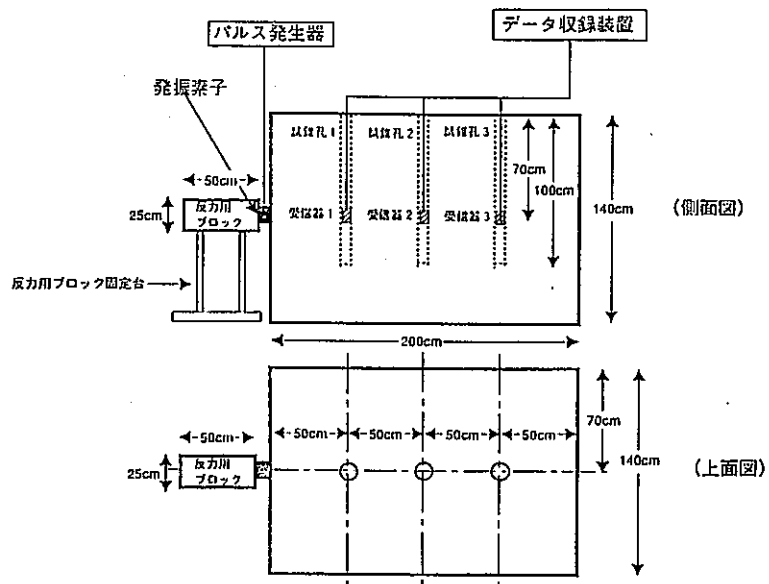


図-2.1 周波数・振幅測定試験の試験体
(砂セメント比=2:1)

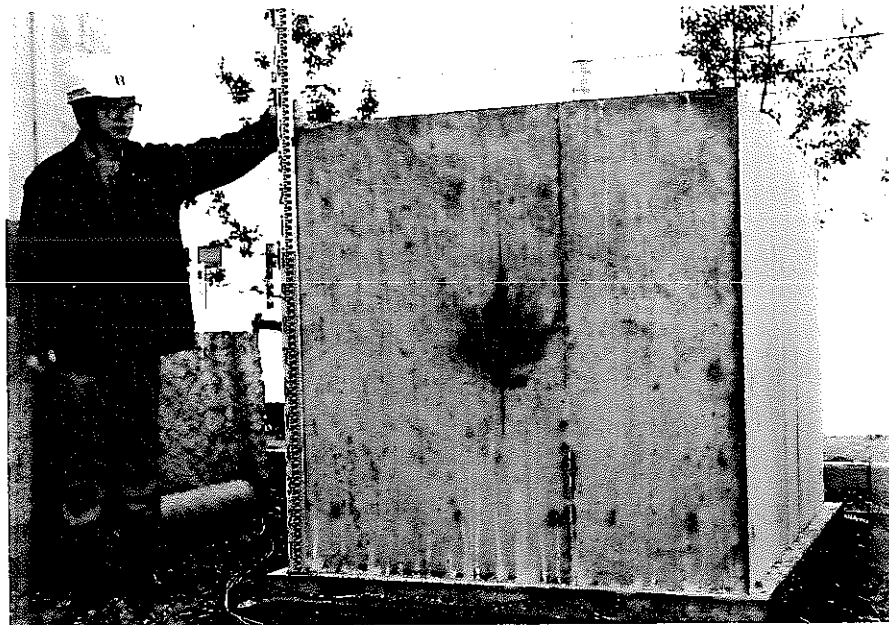


写真-2.1 試験体 (側面)

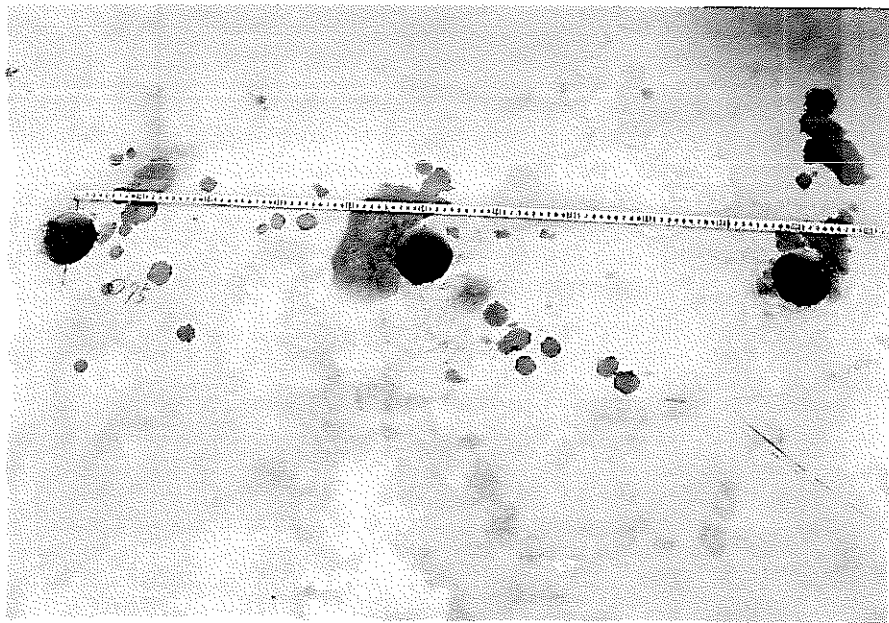
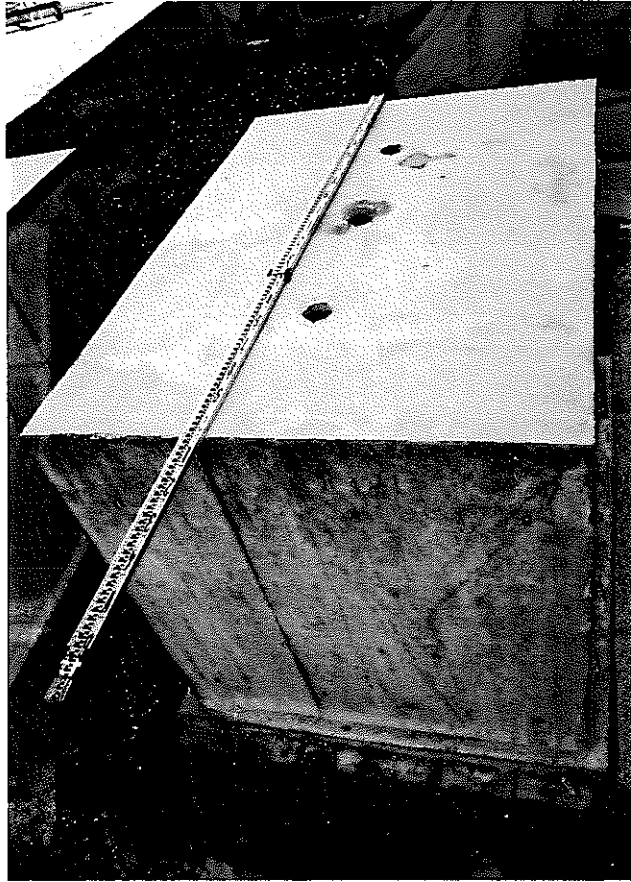


写真-2.2 試験体（上面）

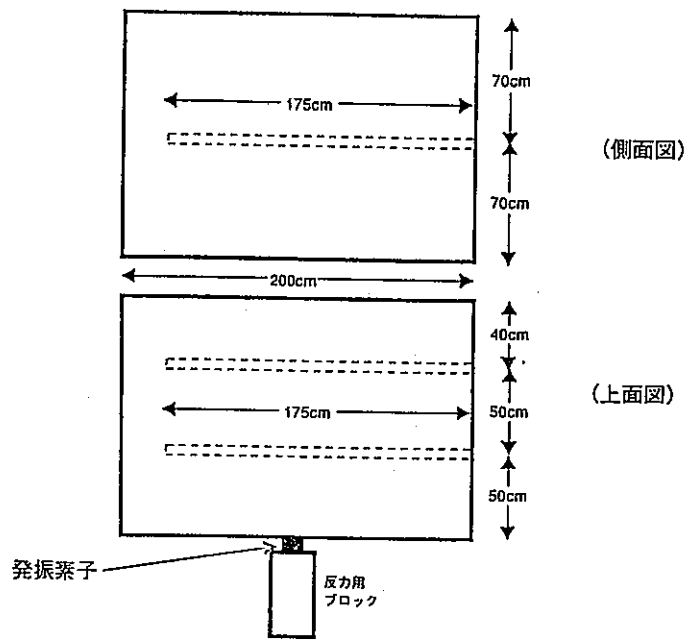


図-2.2 指向特性試験の試験体
 (砂セメント比=2:1)

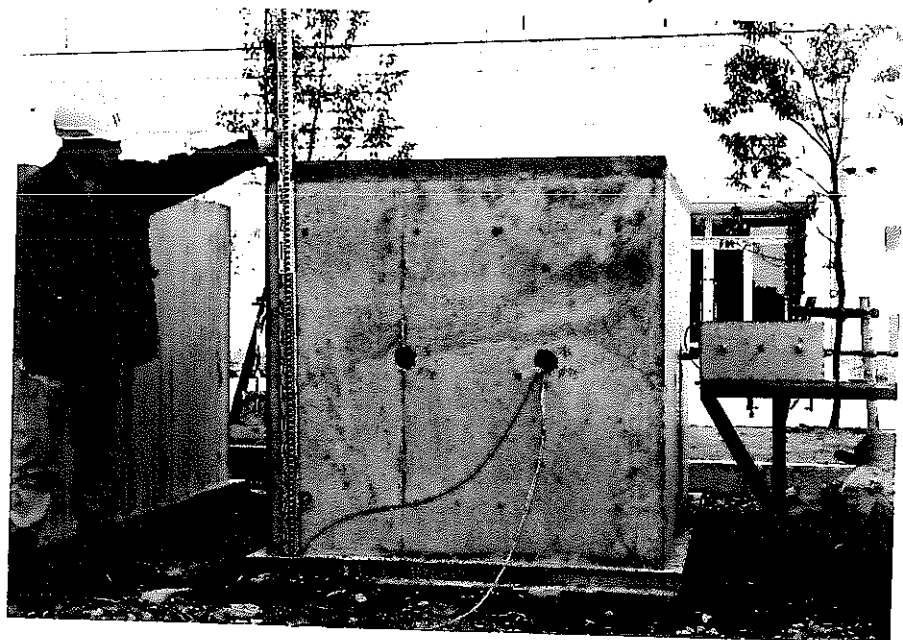


写真-2.3 試験体 (側面)

②反力ブロック

反力用ブロックは発振素子を一定圧力で試験体に固定するもので、試験体と同じセメントモルタルを材料とし、反力ブロック内に伝播した弾性波波動が受振波動の初動に影響を及ぼさない大きさとした。反力ブロックおよび固定台を図-2.3、写真-2.4に示す。

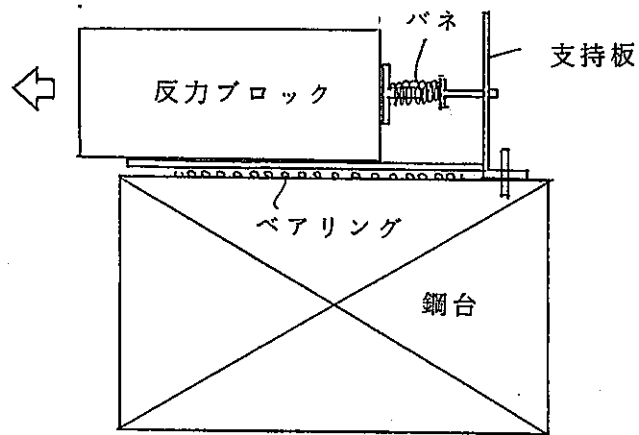


写真-2.4 反力ブロックによる発振素子の設置状況

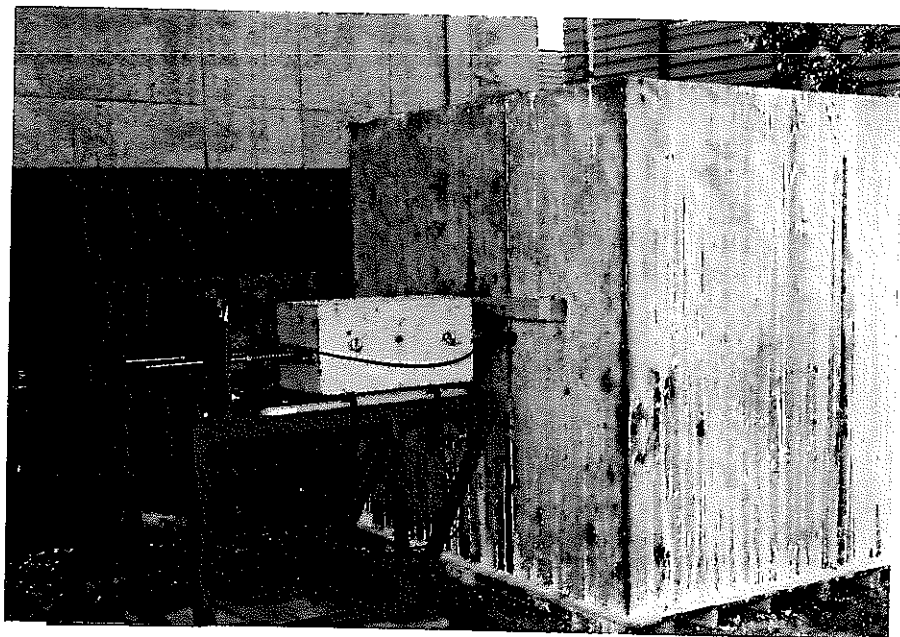


図-2.3 反力ブロック、固定台

(2) 発振素子および発振装置

① 発振素子

発振素子には市販されている圧電素子（NBL-45282HA1（トキコ社製））および圧電アクチュエータ（MLA 10x10x18（トキコ社製））の2種類を使用した。図-2.4、写真-2.5に圧電素子を、図-2.5、写真-2.6に圧電アクチュエータを示す。

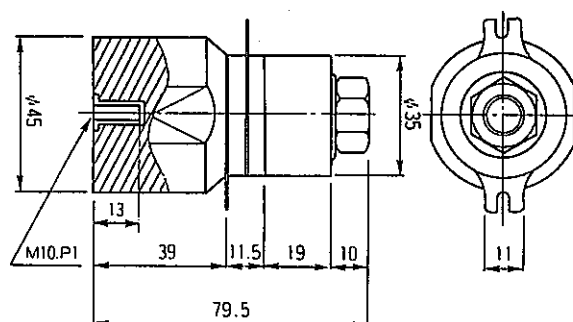


図-2.4 圧電素子の寸法（NBL-45282HA1）

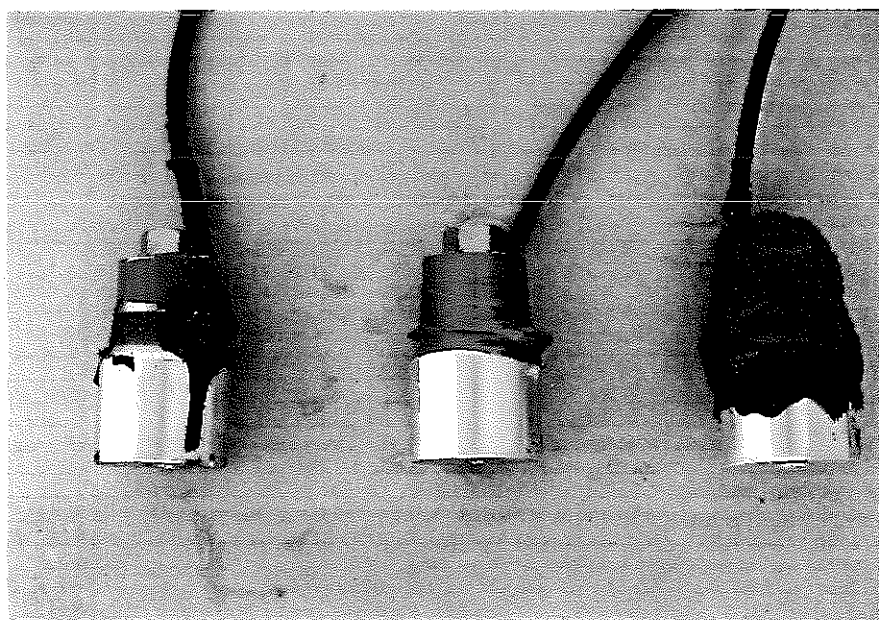
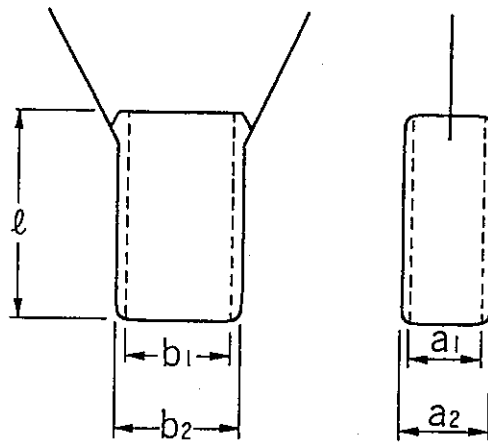


写真-2.5 圧電素子



寸法公差

$$NLA - a \pm 0.1 \times b \pm 0.1 \times l \pm 0.05$$

注) 外装前ハンダ点高さ: 2mmMAX

図-2.5 圧電アクチュエータの概要 (MLA 10x10x18)

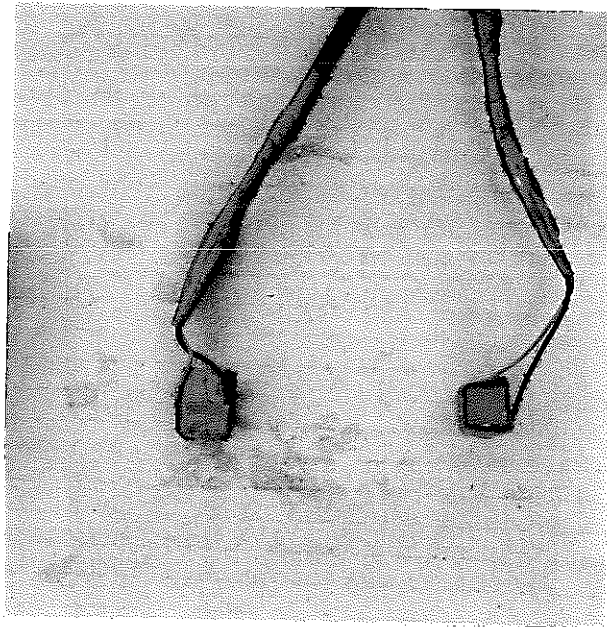


写真-2.6 圧電アクチュエータ

② 発振装置

弾性波動を圧電素子あるいは圧電アクチュエータから発振させるためには、図-2.6に示すように、パルス発生装置とアンプが必要である。試験ではマルチファンクションシンセサイザ1940と、高速電力増幅器4015（ともに株式会社エヌエフ回路設計ラボ製）を用いた。写真-2.7に両装置を示す。また、資料-3に発振素子、発振装置の詳細仕様を添付する。

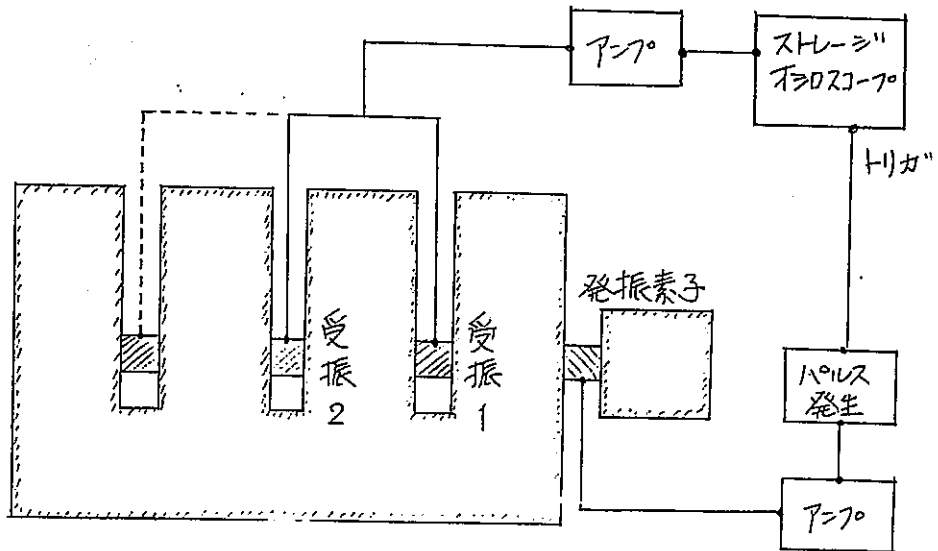


図-2.6 発振、受振装置および接続

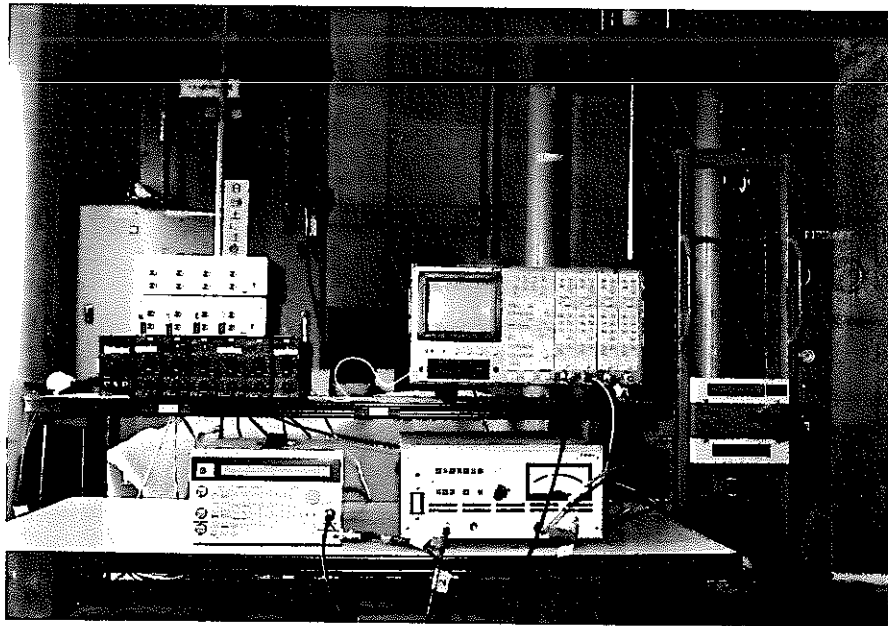


写真-2.7 発振、受振装置（下段が発振側装置）

(3) 受振装置

受振にはハザマ式孔間弾性波測定装置の受振部を利用した。表-2.1に受振装置の諸元を、写真-2.8に受振器を示す。

表-2.1 受振装置の諸元

名称	型式	備考
孔内挿入部	発振装置	外径60mm×長さ1m、重量11kg (107.8 N) 孔壁圧着式、ピストン打撃起振 起振卓越周波数10~15kHz 圧電型加速度計 (TEAC708、共振25kHz)
	受振装置	外径60mm×長さ30cm、重量4kg (39.2 N) 孔壁圧着式、圧電型加速度計 (TEAC707直交3成分、共振周波数20kHz)
データ処理・記録部	アンプ	TEAC SA-16 通用周波数1Hz~50kHz 倍率×1~×1000 重量6kg (58.8 N)
	フィルタ	NF回路 ブロック DVシリーズ 周波数固定型20kHzローパスフィルタ 減衰特性36dB 重量2.5kg (24.5 N)
	デジタルストレージオシロスコープ	日立電子 VC7040 4ch×2kw 最小サンプリングタイム1μs 重量16kg (156.8 N)

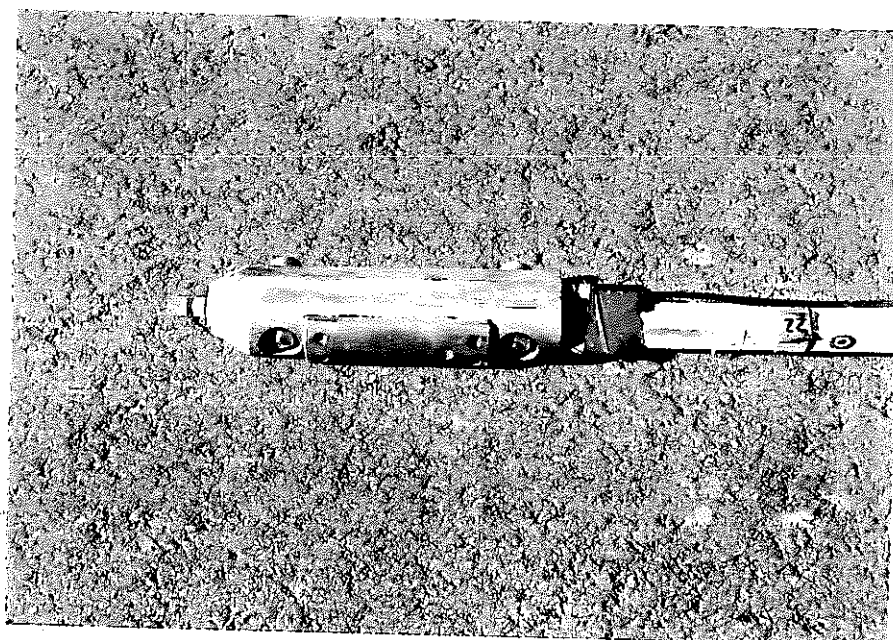


写真-2.8 受振器

2.3 試験方法

試験は発振素子の周波数・振幅を測定する試験（周波数・振幅測定試験）と指向性を測定する試験（指向特性測定試験）、およびモルタルブロックの基本特性を把握する供試体試験を行った。

(1) 試験体の物理特性

モルタルブロック打設時に試験体と同じ材料を用いてφ50mm長さ10cmのテストピースを作成し、打設後、約40日後と80日後の試験前後に物性試験を行った。その結果を表-2.2に示すが、試験期間中の試験体の弾性波速度は4100～4200m/s程度ではほぼ一定していることが分かる。また、試験結果を資料-4に添付する。

表-2.2 試験体の物性試験結果

	一軸圧縮強度 (Kgf/cm ²)	ヤング率 (Kgf/cm ²)	P波速度 (m/s)
約40日後	393	270000	4100
約60日後	416	300000	4230

(2) 周波数・振幅測定試験

図-2.6に示すように、素子を試験体の側壁面に反力ブロックで押しつけるように設置し、発振点から一直線上にならんだ試錐孔内に設置した受振孔で、素子から発振された波動を受振する。このとき、素子は単一で設置した場合、並列で設置した場合、直列に設置した場合の3通りについて試験を行った（図-2.7参照）。

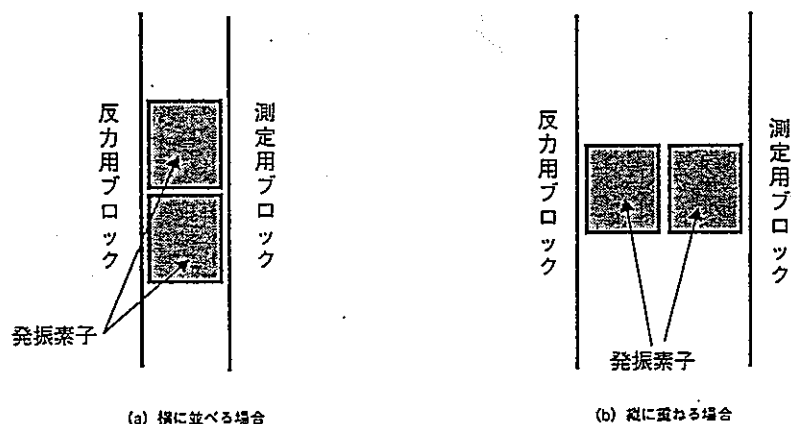


図-2.7 発振素子の設置

(3) 指向特性測定試験

指向特性測定試験は発振素子（圧電素子、圧電アクチュエータ）の指向性を把握するために行う。測定は図-2.8に示すように、発振素子を反力ブロックで試験体の側壁面に設置して発振点とし、受振装置を発振方向から 0° 、 22.5° 、 45° 方向の線上で受振孔1、2内に設置して実施した。また、発振素子は前述の周波数・振幅測定試験と同様に単一設置、並列設置、直列設置の3通りについてとした。

0° 、 22.5° 、 45° 方向での測定結果（各々、受振孔1、2の2データ）から振幅減衰定数を算定し、各々の方向の発振源での振幅の大きさを逆算して指向性について検討した。

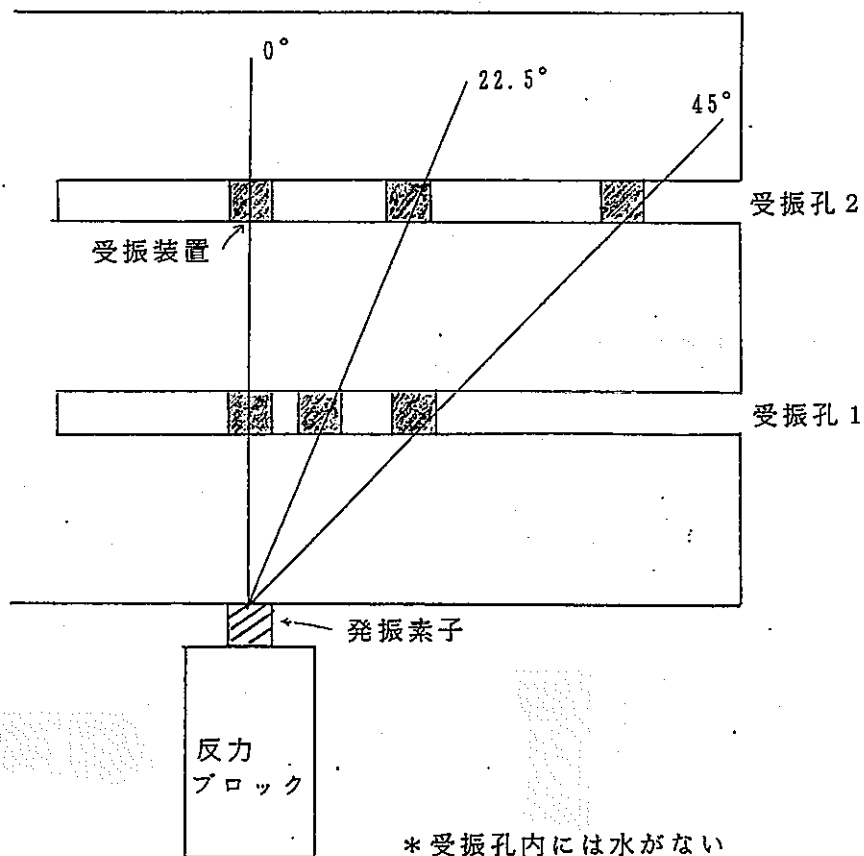


図-2.8 指向特性測定試験

(4) 測定結果の整理方法

1回の測定で得られるデータは、図-2.6で示したパルス発生器から出力されるパルス信号と、受振装置で測定される受振波動の2つである。そのうち、パルス信号をトリガー信号として受振開始の入力とするとともに、発振時間とした。また、受振波動は図-2.9に示すように、初動波動の立ち上がり、および初動振幅の大きさを読みとって整理した。なお、基本的な測定の設定は、波動のサンプリング時間が $1\mu\text{s}$ 、振幅の記録レンジが $20\text{mV}\sim 50\text{mV}$ で、振幅の記録精度は記録レンジ/128である。

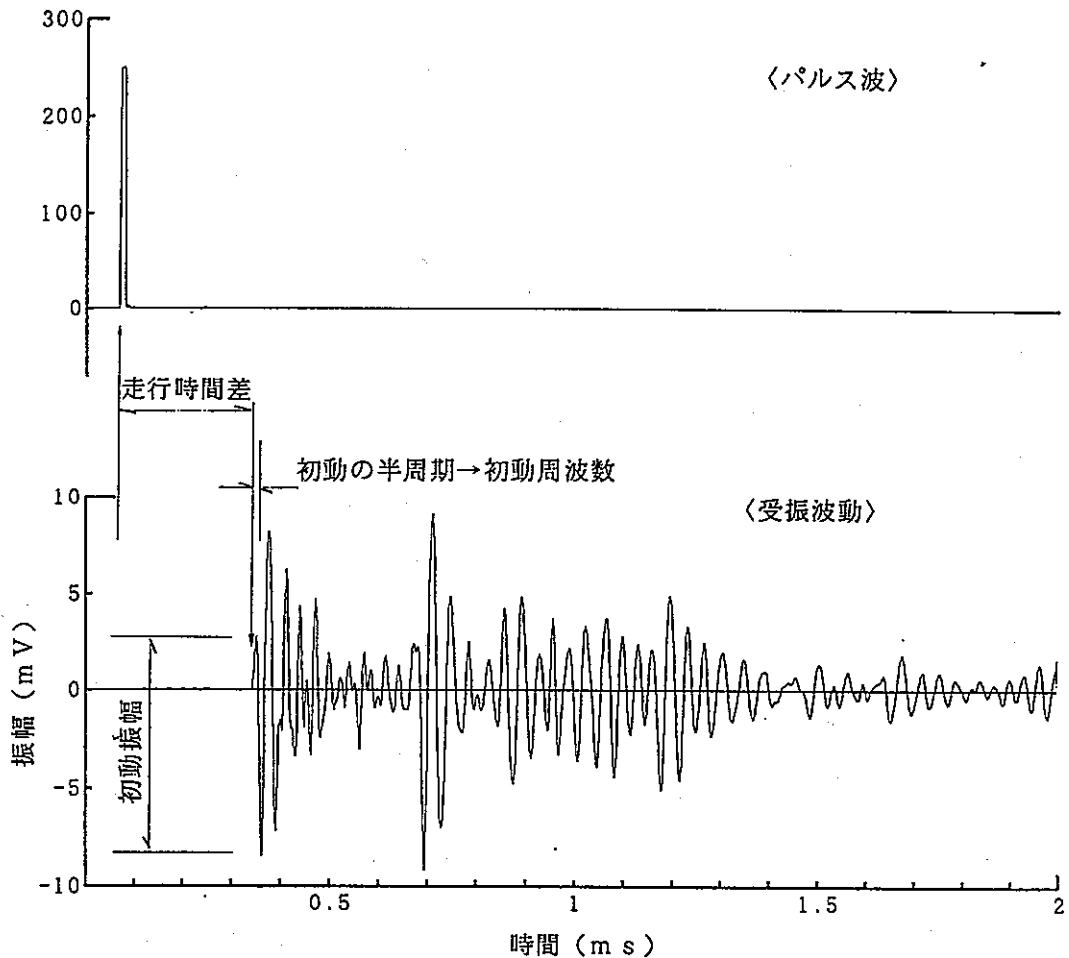


図-2.9 受振波動の整理

2.4 試験項目

試験体（モルタルブロック）を用いた試験項目と実験番号を表-2.3に示す。実験は素子の種類と配置方法によって分けられており、実験1～実験12まで実施した。さらに実験1～実験10には、実験〇-1～実験〇-3の下位のインデックスが付けられており、発振・受振点間距離の区別を行っている。

表-2.3 試験項目と実験番号

素子の種類	素子の配置	周波数・振幅測定試験	指向特性測定試験
圧電素子	1個	実験1	実験11
	2個 中央固定 並列	実験2	
		実験3	
	3個 並列	実験4	
	2個 直列	実験5	
圧電 アクチュ エータ	1個	実験6	実験12
	2個 中央固定 並列	実験7	
		実験8	
	3個 並列	実験9	
	2個直列	実験10	

（備考） 実験1～実験10には下位のインデックスがある。

実験〇-1：発振・受振点間距離 50cmでの測定

実験〇-2： 100cmでの測定

実験〇-3： 150cmでの測定

2.5 実施工程

表-2.4に試験の実施工程を示す。

表-2.4 実施工程

年月 項目	平成5年	平成6年		
	12月	1月	2月	3月
試験体の製作	—			
ボーリング穿孔	—			
物性試験		—	—	
周波数・振幅 測定試験		—		
指向特性の 測定試験		—		
結果の整理			—	
報告				—

3. 圧電素子による周波数・振幅試験

圧電素子による周波数・振幅試験では、発振源として圧電素子1個を用いた場合（実験1）、2個あるいは3個を並列に用いた場合（実験2～4）、2個を直列に用いた場合（実験5）の測定を行った。

3.1 実験1（単体発振）

実験1は図-3.1に示すように、1個の圧電素子を発振源とし、A、B、C孔の3ヶ所で受振を行い、圧電素子に与える電圧、矩形パルス幅や発振・受振点間距離の影響を測定した。測定結果（初動振幅）一覧を表-3.1に示す。

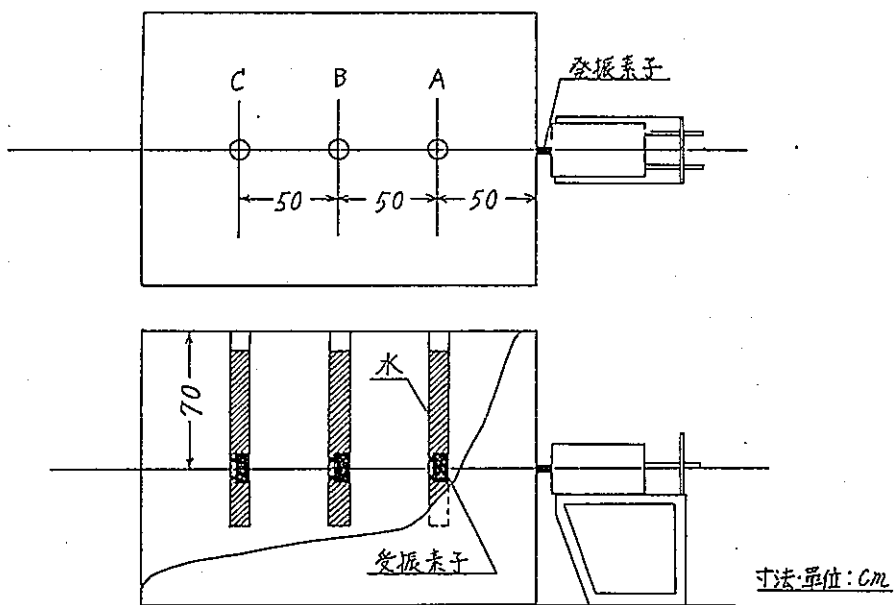


図-3.1 実験1の概要

表-3.1 測定結果一覧(実験1)

1-1. 受振距離50cm(A孔), 初動振幅(mV)

		電 圧 (V)				
		10	20	30	40	50
パ ル ス 幅 (μ s)	5	7.73	15.51	22.27	29.53	36.48
	10	9.10	18.71	27.42	36.64	46.48
	20	6.72	13.55	19.61	26.41	32.73
	35	6.84	13.59	20.16	26.88	33.79
	100	6.88	13.91	20.55	26.95	34.38

1-2. 受振距離100cm(B孔), 初動振幅(mV)

		電 圧 (V)				
		10	20	30	40	50
パ ル ス 幅 (μ s)	5	2.23	5.66	7.34	9.80	12.19
	10	3.28	7.15	10.55	13.95	17.58
	20	2.50	4.98	8.05	10.55	13.32
	35	2.52	5.00	8.01	10.70	13.40
	100	2.50	5.05	8.13	10.70	13.48

1-3. 受振距離150cm(C孔)

		電 圧 (V)
		30
パ ル ス 幅 (μ s)	10	0.017

(1) 電圧の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、電圧を10V～50V間の5段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.2
- ② 初動周波数 : 図-3.3
(初動の立ち上がりから1周波をとった場合の周波数)
- ③ P波速度 : 図-3.4
- ④ 矩形パルス幅を10 μ sに一定した場合の受振波動 : 図-3.5

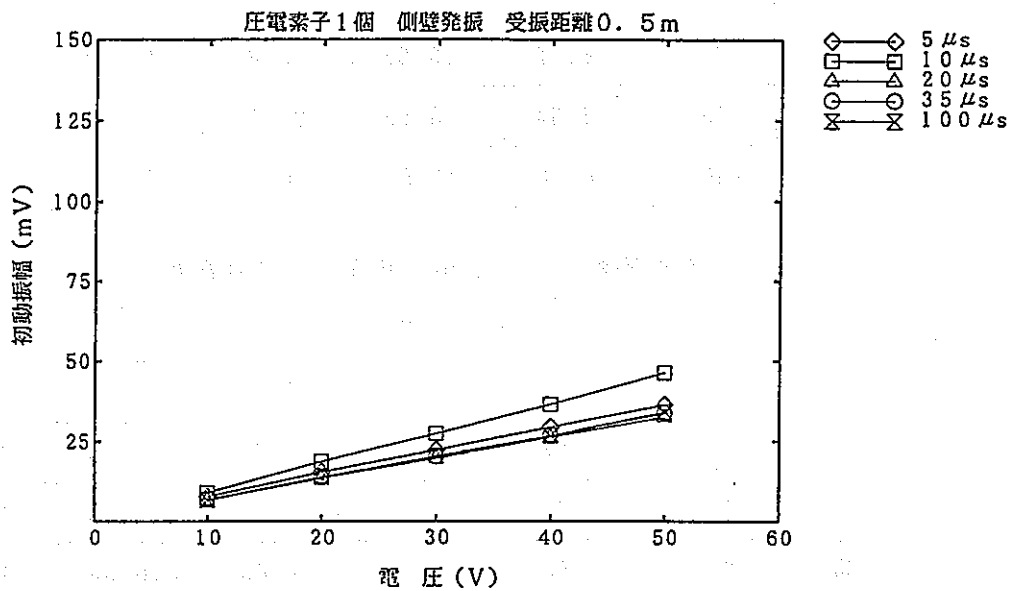


図-3.2 初動振幅の大きさ

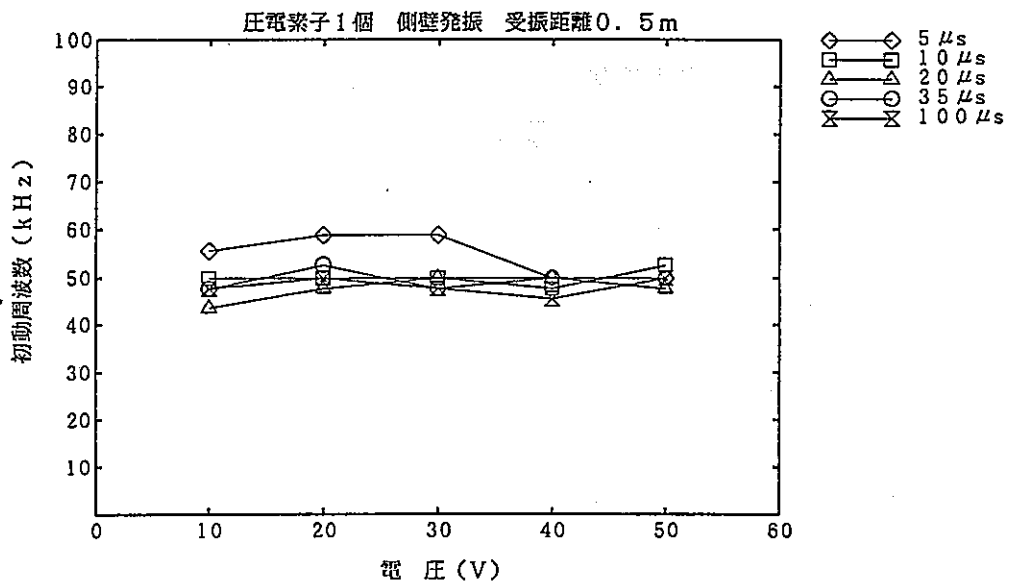


図-3.3 初動周波数

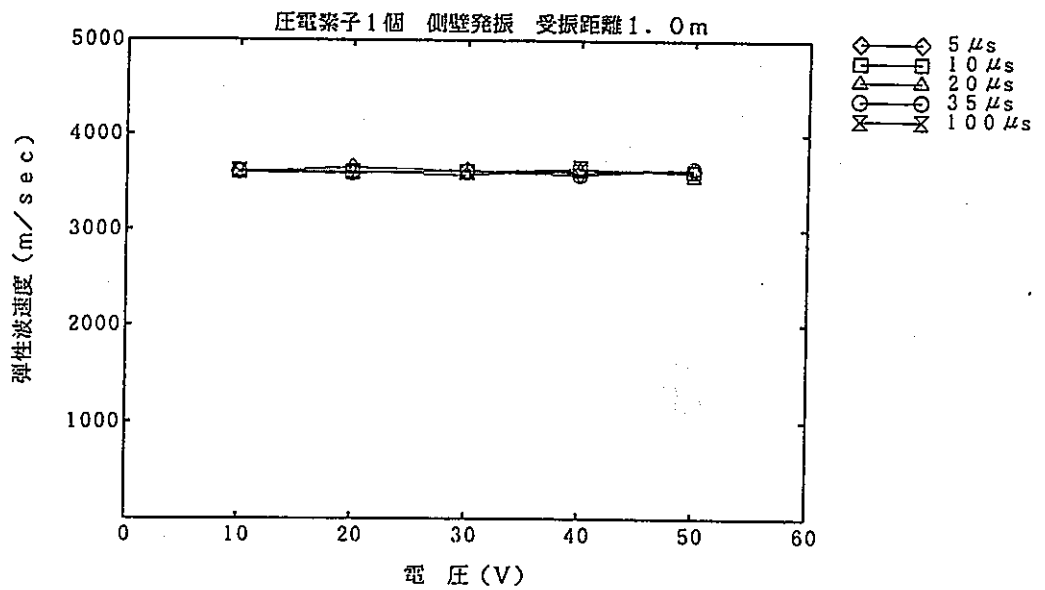


図-3.4 P波速度

圧電素子から発振される波動の初動振幅の大きさは、圧電素子に与えられる電圧に比例して直線的に増加している。また、初動の立ち上がりから1周波をとった場合の周波数（初動周波数）は、矩形パルス幅 $5\mu\text{s}$ のときにやや高めに測定されたが、全体としてはバラツキはあるものの、ほぼ 50kHz 付近の一定した波動を発振している。一方、測定値から算定されたP波速度は電圧によらず一定で、サンプル試料による超音波測定結果（ $4100\sim 4200\text{m/s}$ 、表-2.2参照）に比べて小さい数値となっている。

圧電素子1個 側壁発振 受振距離0.5m パルス幅10 μ s

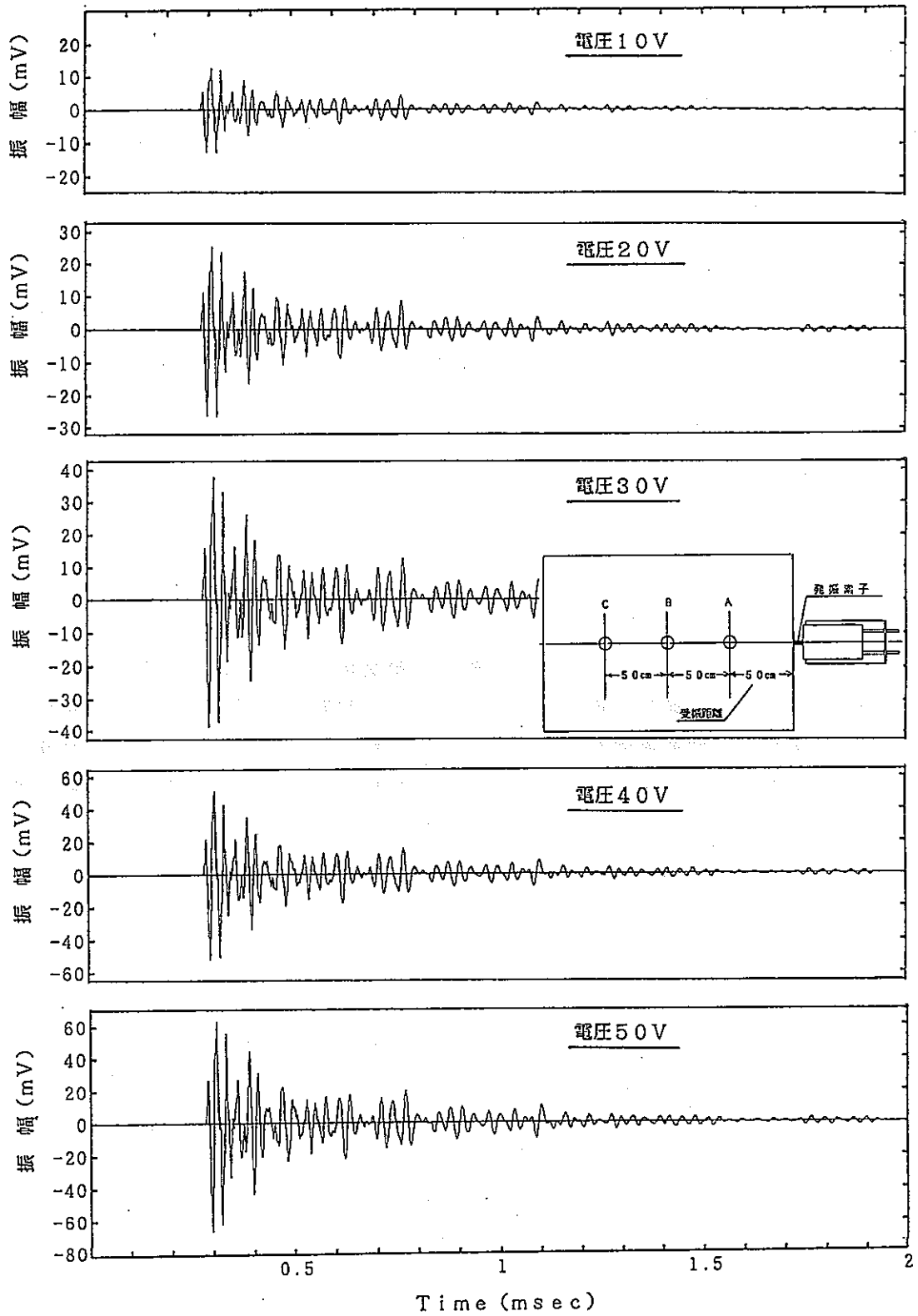


図-3.5 受振波動

(2) 矩形パルス幅の影響

電圧の場合と同様に、A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、矩形パルス幅を $5\mu s \sim 100\mu s$ 間の5段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.6
- ② 初動周波数 : 図-3.7
- ③ P波速度 : 図-3.8
- ④ 電圧を30Vに一定した場合の受振波動 : 図-3.9

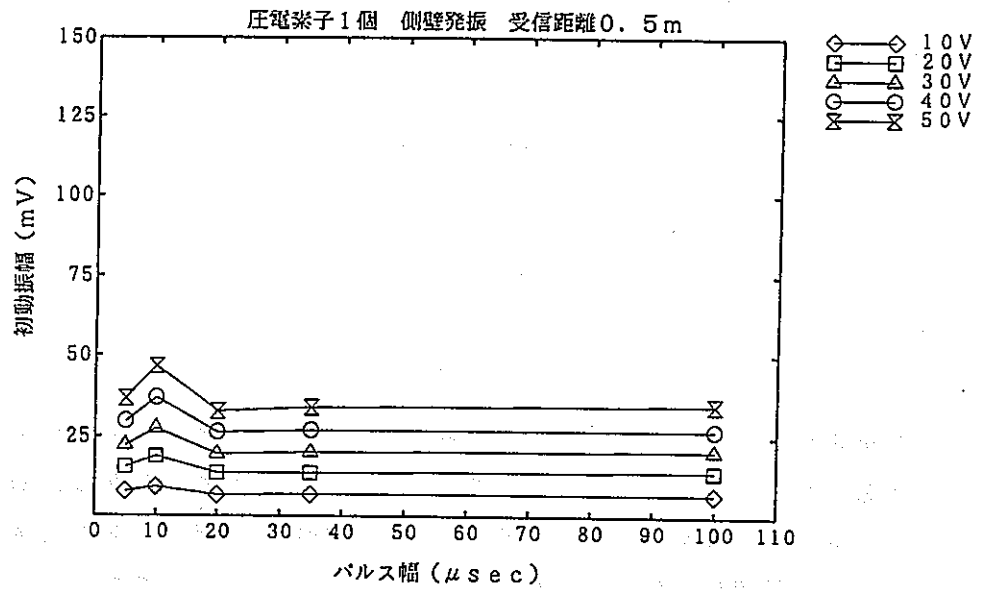


図-3.6 初動振幅の大きさ

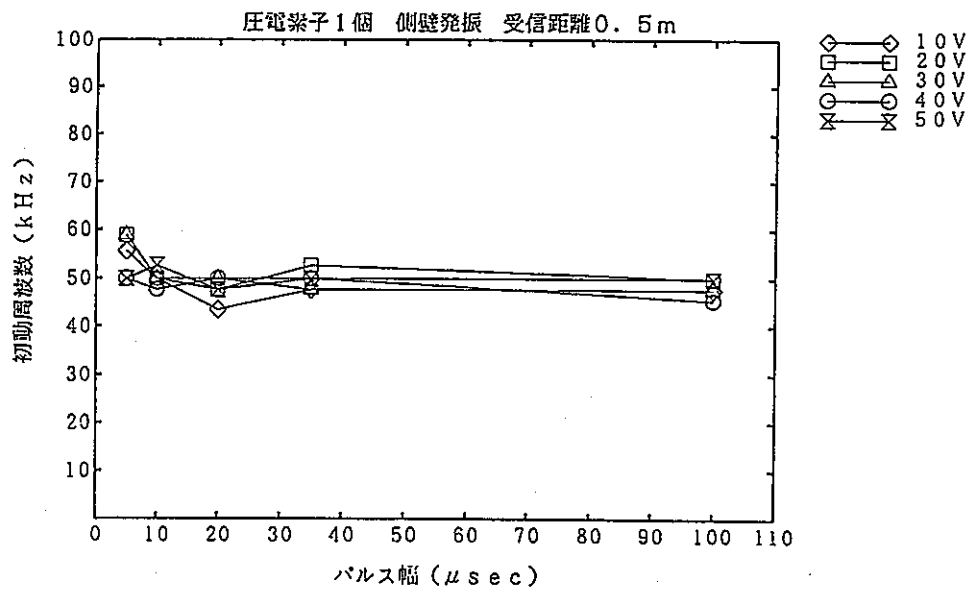


図-3.7 初動周波数

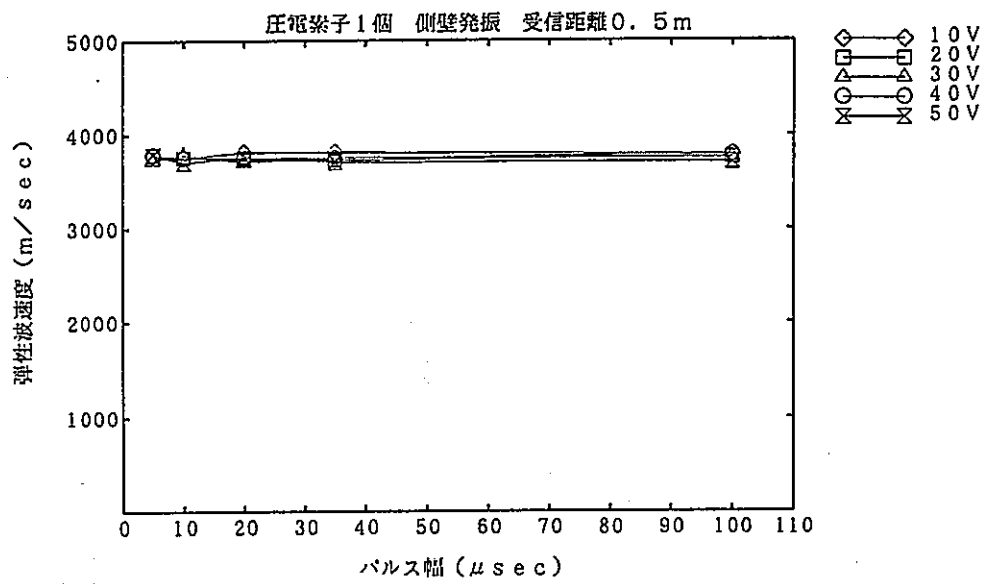


図-3.8 P波速度

初動振幅の大きさは、矩形パルス幅 $10\mu s$ のときに最も大きくなるが、他の矩形パルス幅では変化せず、ほとんど一定である。また、初動周波数は、矩形パルス幅 $5\mu s$ のときにやや高めであるが、全体としては 50kHz 付近の一定した周波数である。

一方、P波速度は矩形パルス幅によらず一定で、サンプル試料による超音波測定結果に比べて小さい数値となっている。

圧電素子1個 側壁発振 受振距離0.5m 電圧30V

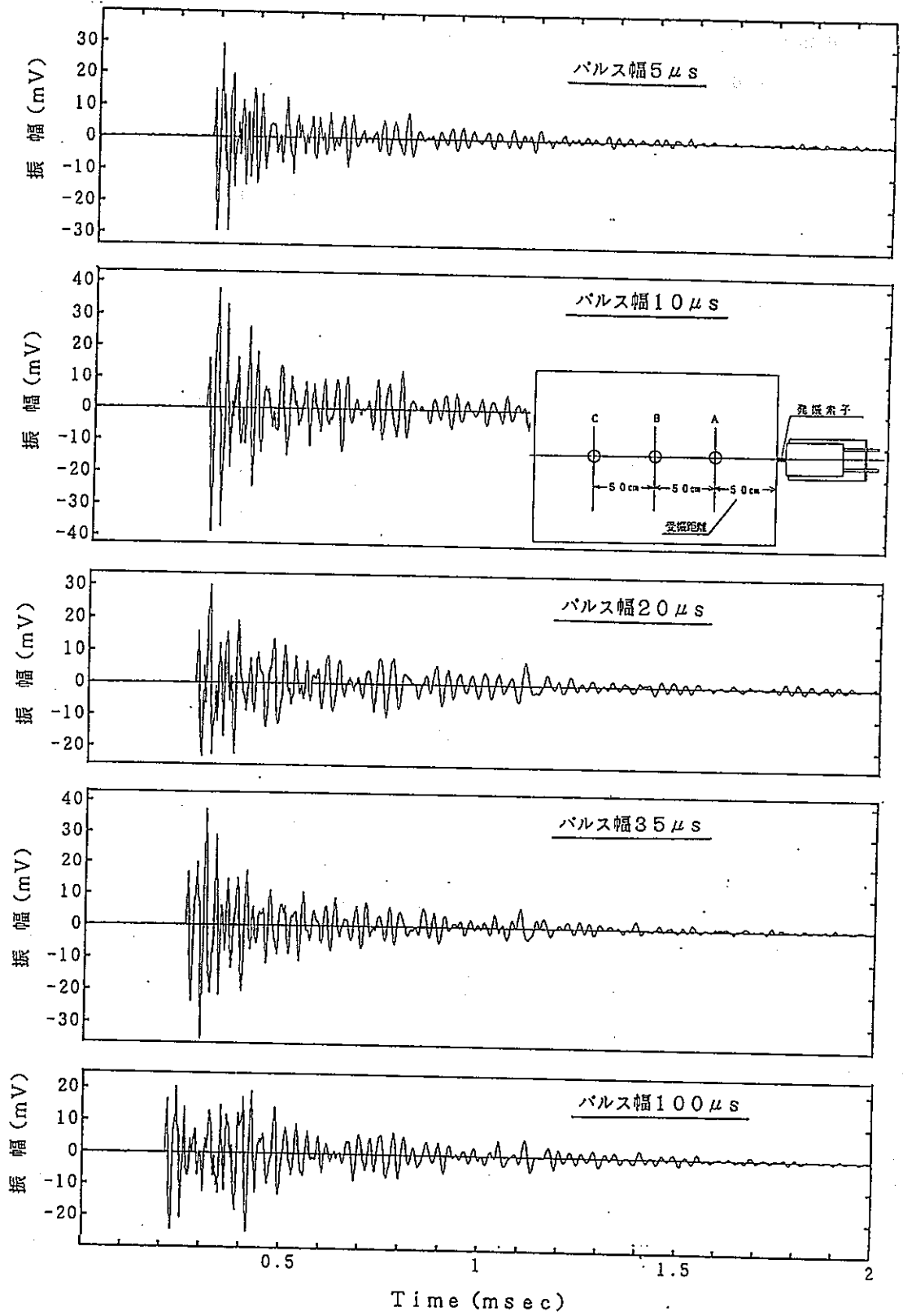


図-3.9 受振波動

(3) 発振・受振点間距離の影響

圧電素子に与える電圧を30V、矩形パルス幅を10 μ sで一定にし、発振・受振点間距離を50cm~1.5mの3段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.10
- ② 初動周波数 : 図-3.11
- ③ P波速度 : 図-3.12
- ④ 電圧30V、矩形パルス幅10 μ sの場合の受振波動 : 図-3.13

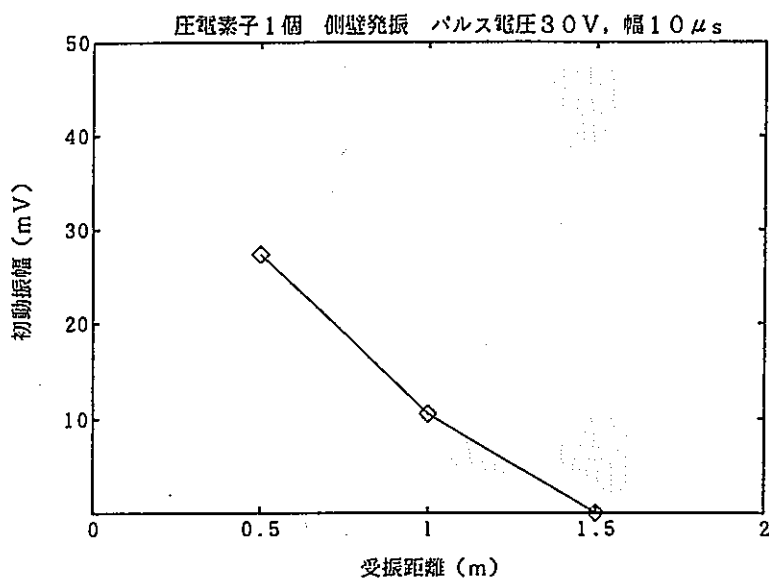


図-3.10 初動振幅の大きさ

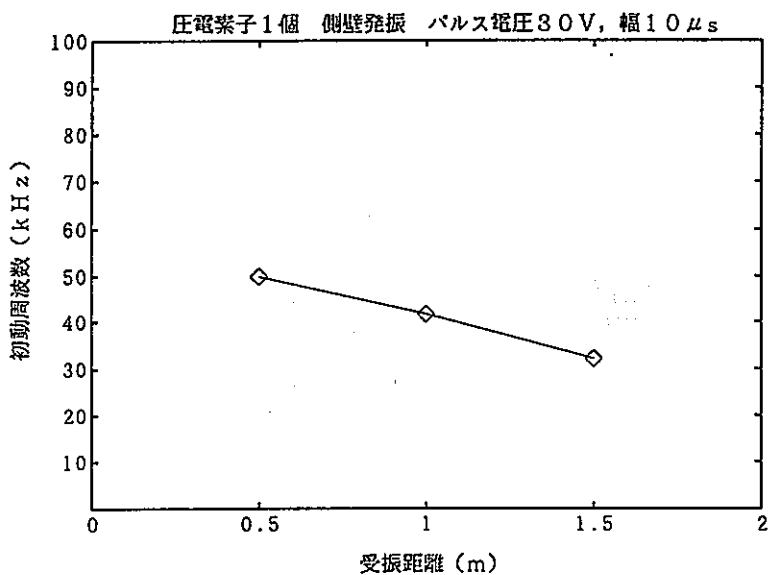


図-3.11 初動周波数

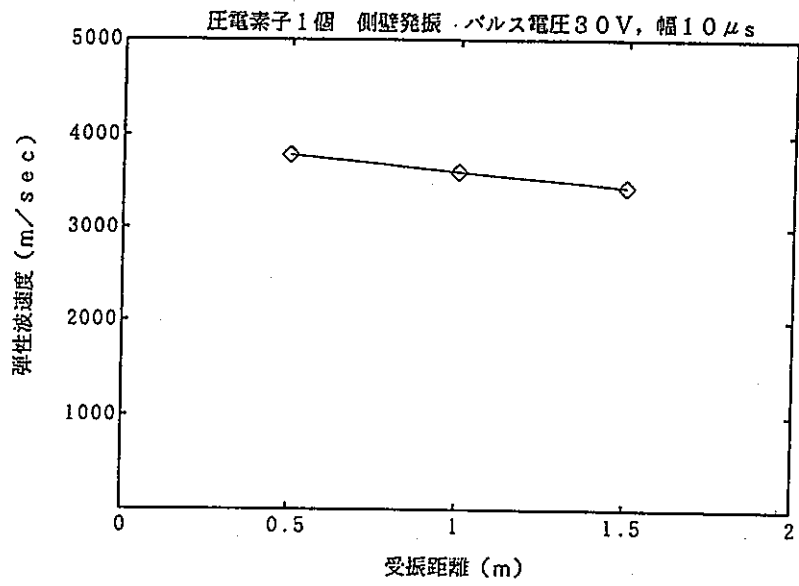


図-3.12 P波速度

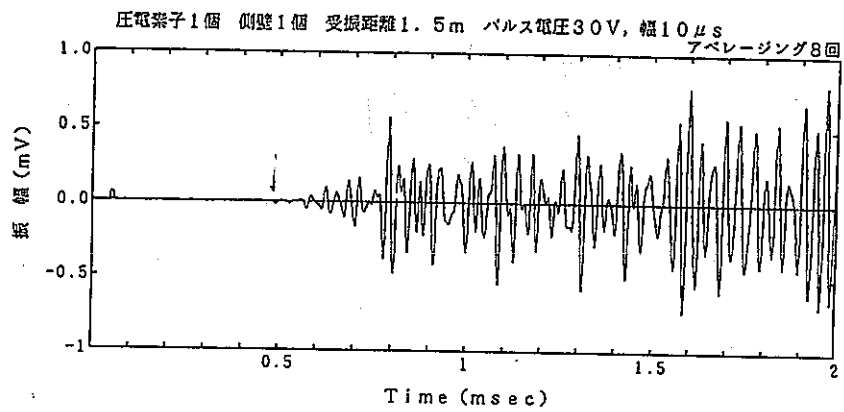


図-3.13 受振波動

初動振幅の大きさは、発振・受振点間距離の増加に伴い、直線的に小さくなっている。また、初動周波数も、50KHzから直線的に低下し、発振・受振点間距離1.5mでは、30KHzになっている。一方、P波速度についても、低下がみられる。

3.2 実験2（並列発振、中央固定）

実験2では図-3.14に示すように、2個の圧電素子を並列に並べて発振源とし、圧電素子に与える電圧、矩形パルス幅や発振・受振点間距離、および素子間隔の影響を測定した。このとき、1個の圧電素子aは3孔の直線上に配置し、他方の素子bは直線上からずらした配置とした（中央固定と呼ぶ）。測定結果一覧を表-3.2に示すが、測定では圧電素子bのみによる測定も行っており、「圧電素子1個の中心からの距離」として整理した。

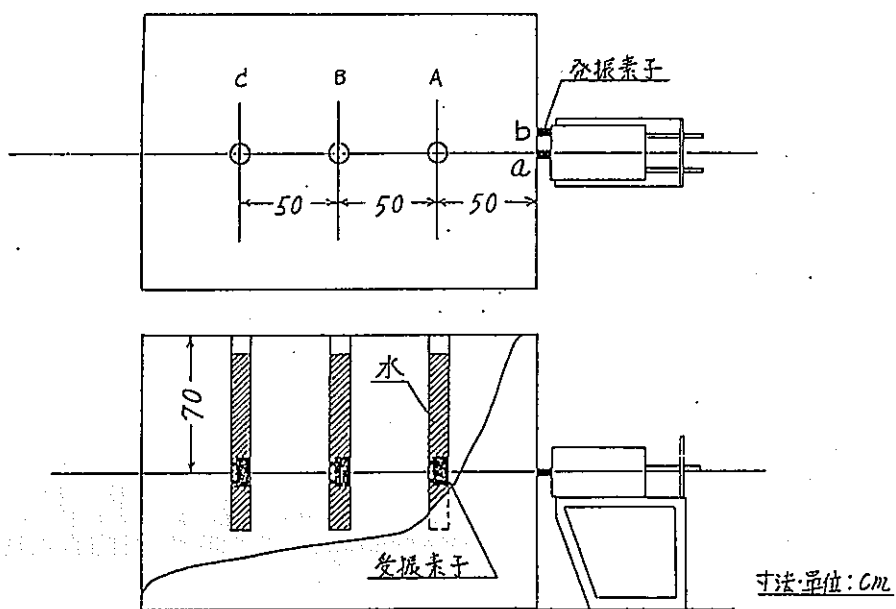


図-3.14 実験2の概要

表-3.2 測定結果一覧(実験2)

2-1. 受振距離50cm(A孔), パルス電圧30V, 初動振幅(mV)

		圧電素子2個間の距離(cm)				圧電素子1個の中心からの距離(cm)				
		5	10	15	20	0	5	10	15	20
パルス幅 (μ s)	5	41.80	39.26	25.16	25.08	18.98	23.59	21.72	12.85	10.16
	10	60.55	55.66	35.35	35.63	27.97	33.75	30.08	18.36	14.14
	20	46.09	42.97	26.56	26.25	21.41	25.70	23.05	14.30	10.78
	35	46.09	43.36	27.50	26.17	21.41	25.70	23.52	14.14	10.86
	100	46.48	43.36	26.88	26.17	21.80	25.94	23.52	14.06	10.78

2-2. 受振距離50cm(A孔), パルス幅10 μ s, 初動振幅(mV)

		圧電素子2個間の距離(cm)			
		5	10	15	20
電圧 (V)	10	—	—	—	11.25
	20	—	—	—	22.50
	30	—	—	—	35.63
	40	—	—	—	45.12
	50	—	—	—	56.45

2-3. パルス電圧30V, パルス幅10 μ s, 初動振幅(mV)

		圧電素子2個間の距離(cm)				圧電素子1個の中心からの距離(cm)				
		5	10	15	20	0	5	10	15	20
受振距離 (cm)	50	60.55	55.66	35.35	35.63	27.97	33.75	30.08	18.36	14.14
	100	10.39	9.69	8.91	7.77	5.11	5.47	3.59	2.66	2.52
	150	0.020	0.027	0.020	0.023	0.017	0.014	0.011	0.016	0.008

(1) 電圧の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、素子間隔を20cm、矩形パルス幅を $10\mu s$ に固定し、電圧を10V～50V間の5段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.15
- ② 初動周波数 : 図-3.16
- ③ P波速度 : 図-3.17
- ④ 受振波動 : 図-3.18

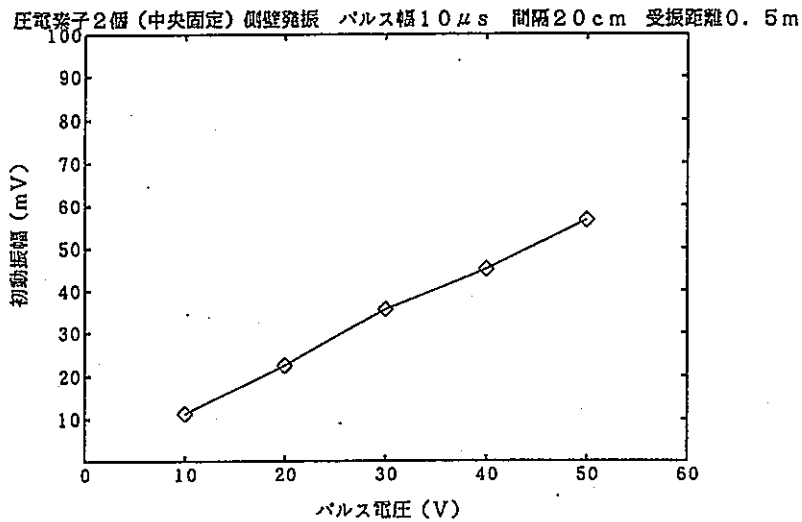


図-3.15 初動振幅の大きさ

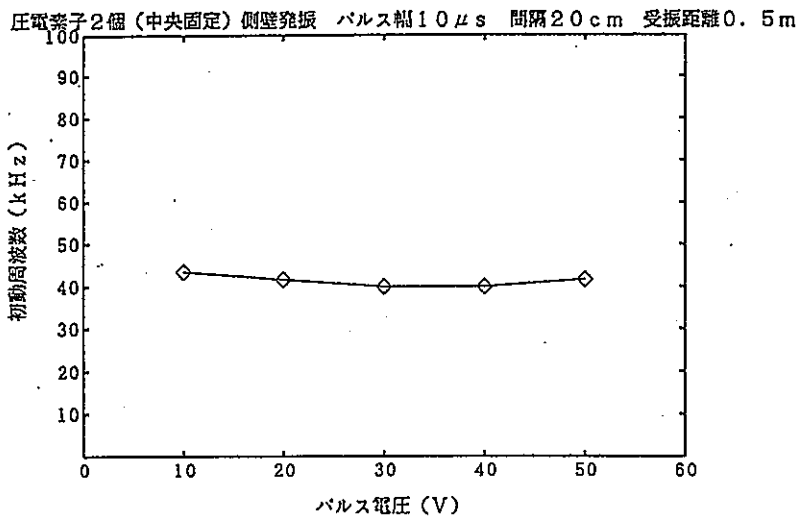


図-3.16 初動周波数

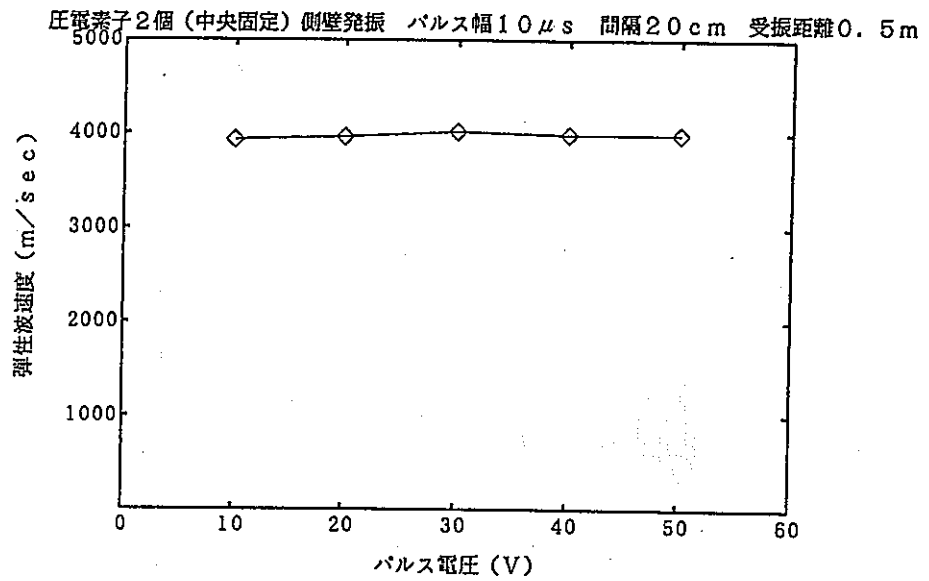


図-3.17 P波速度

初動振幅の大きさは電圧に比例して増加し、初動周波数はほぼ $40kHz$ 付近の一定した波動を発振しており、圧電素子単体で発振した場合(図-3.3)より、周波数が低くなっている。一方、P波速度は $4000m/s$ で、サンプル試料による超音波測定結果よりやや小さいが、圧電素子単体の場合(図-3.8)より、速度値は大きくなっている。

圧電素子2個(1個中央固定)側壁発振 素子間隔20cm 受振距離0.5m パルス幅10 μ s

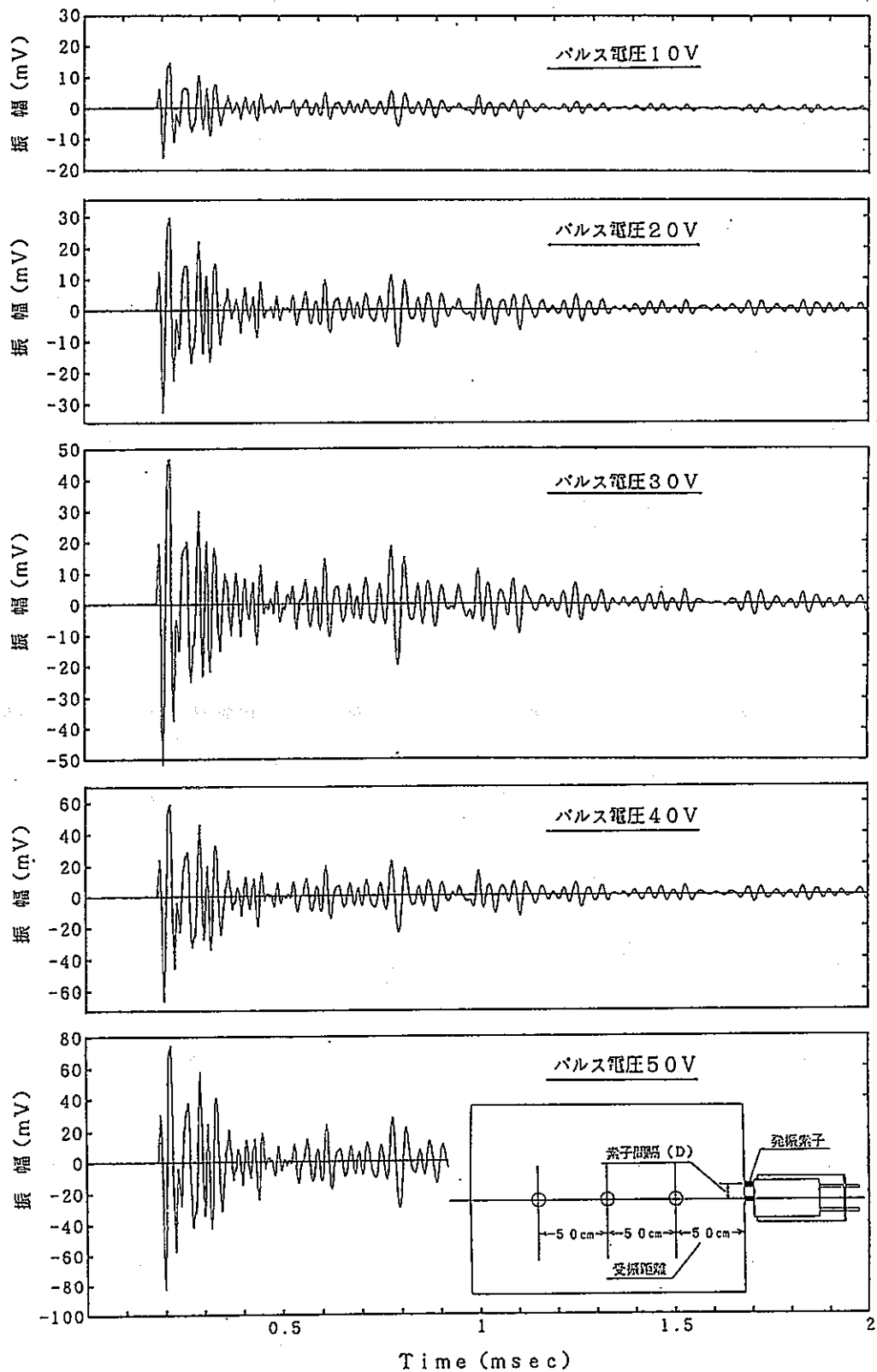


図-3.18 受振波動

(2) 矩形パルス幅の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、電圧を30Vに固定し、矩形パルス幅を $5\mu s \sim 100\mu s$ 間の5段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.19
- ② 初動周波数 : 図-3.20
- ③ P波速度 : 図-3.21
- ④ 電圧を30Vに一定した場合の受振波動 : 図-3.22

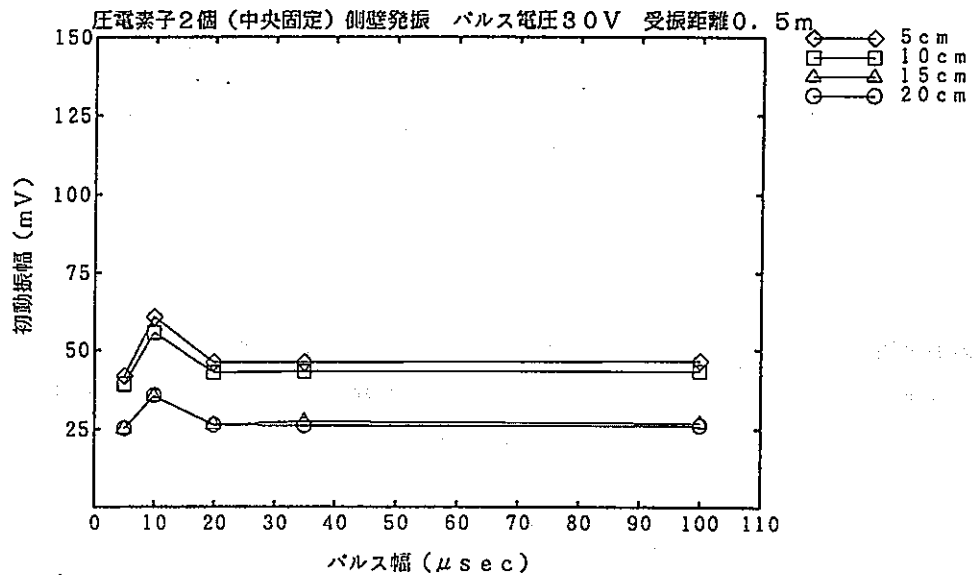


図-3.19 初動振幅の大きさ

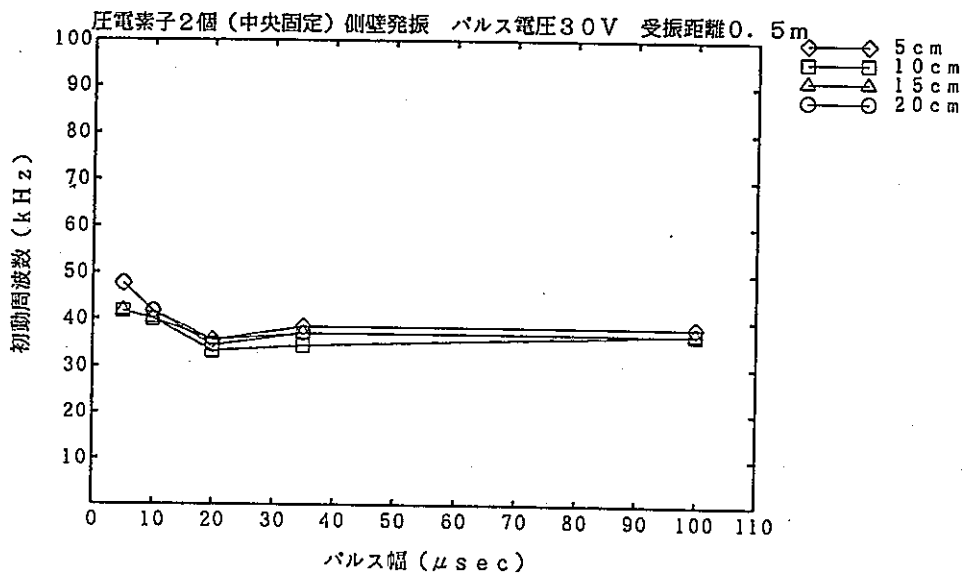


図-3.20 初動周波数

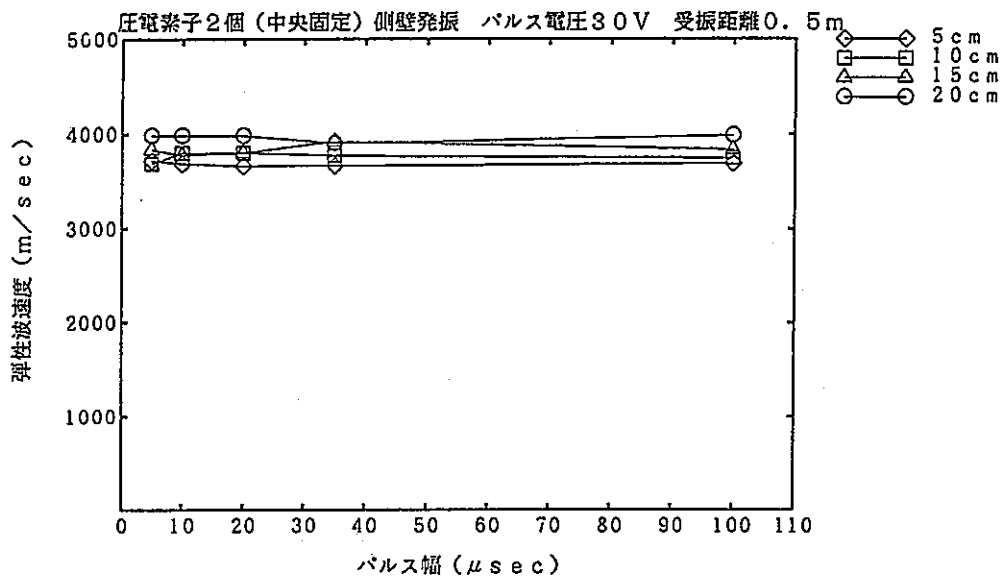


図-3.21 P波速度

初動振幅の大きさは矩形パルス幅が $10\mu s$ の場合に増加している。また、初動周波数は矩形パルス幅 $5\sim 10\mu s$ でやや大きくなる傾向にあるが、 $20\mu s$ 以上ではほぼ一定で 40kHz 程度である。一方、P波速度は矩形パルス幅によらず一定である。

圧電素子2個(1個中央固定)側壁発振 索子間隔20cm 受振距離0.5m パルス電圧30V

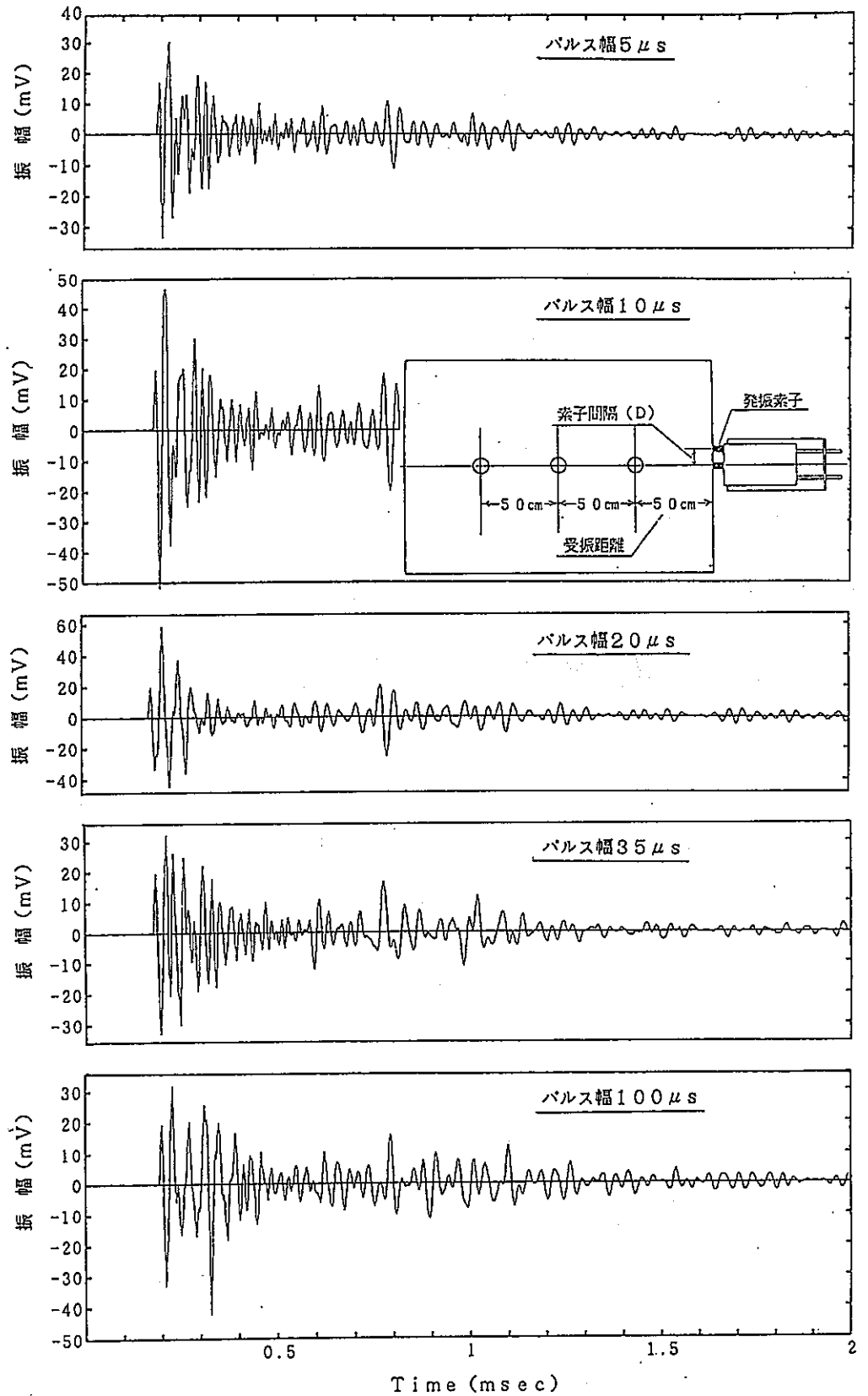


図-3.22 受振波動

2個の圧電素子のうち、孔の直線上にない素子bの発振のみの測定結果を図-3.23に、そのときの受振波動を図-3.24に示す。図-3.23と図-3.19を比較すると、2個の圧電素子を同時に発振させることにより波動が約2倍になっていることが分かる。

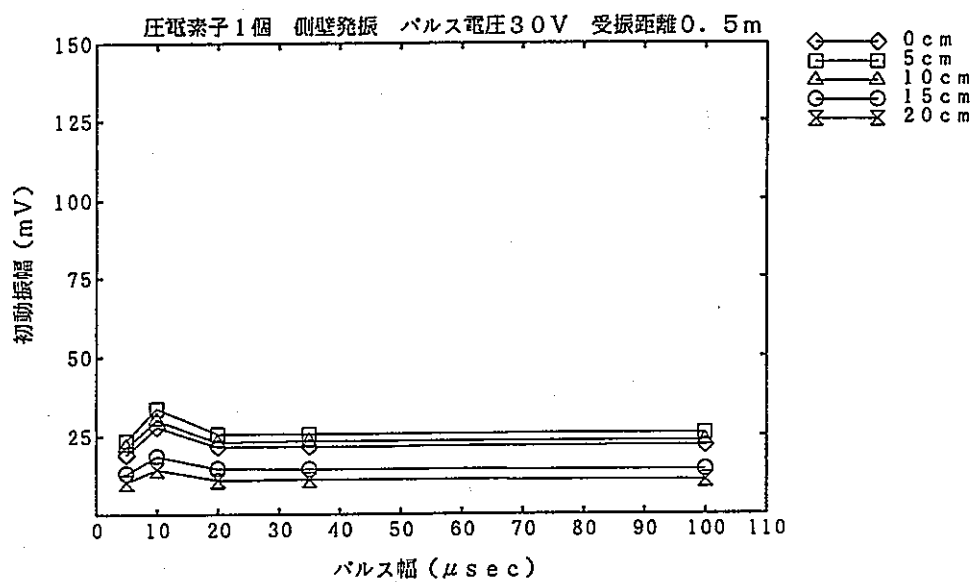


図-3.23 初動振幅 (発振1個の場合)

正電素子1個 側壁発振 中心からの距離5 cm 受振距離0.5 m パルス電圧30 V

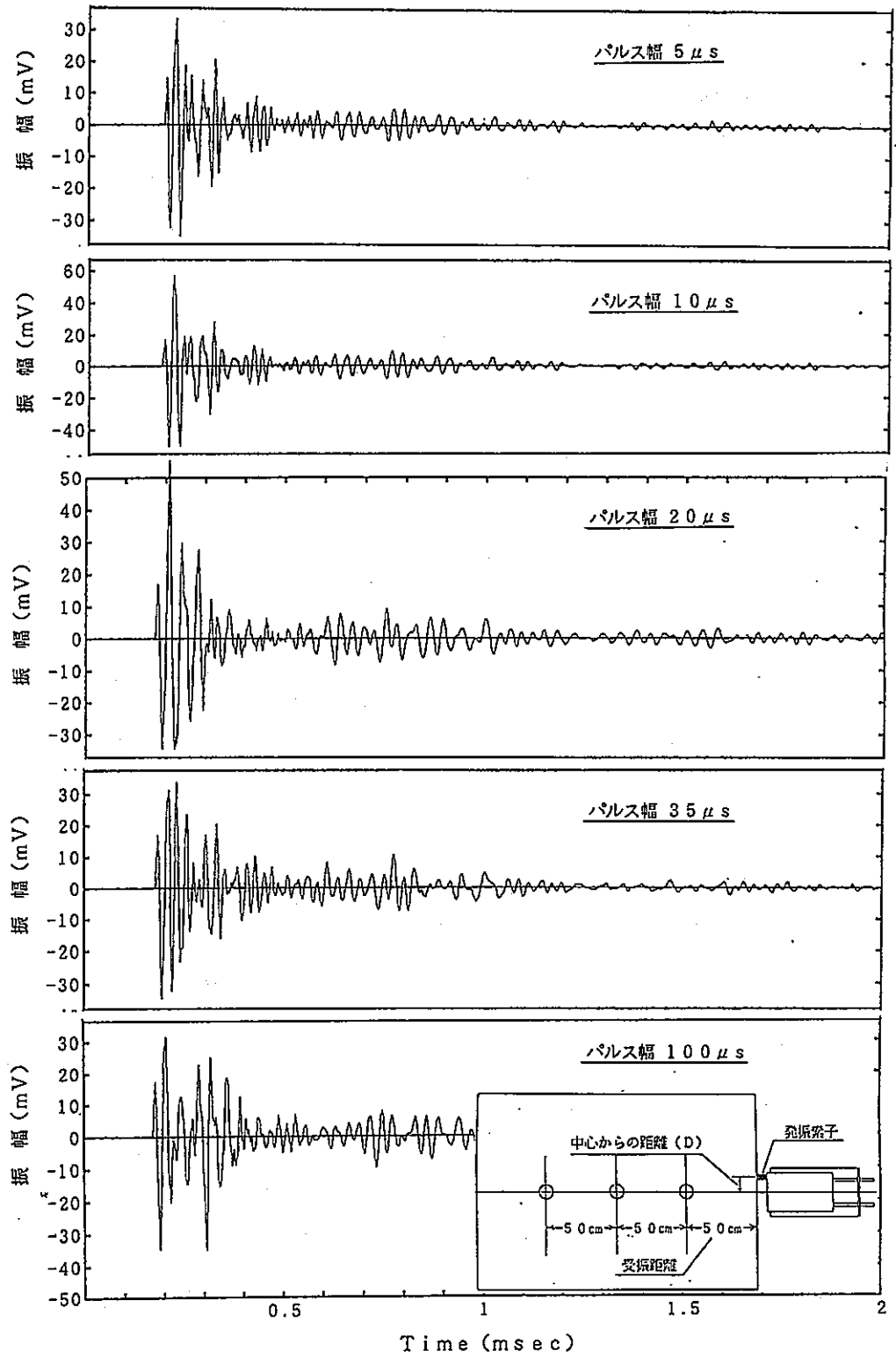


図-3.24 受振波動 (発振1個の場合)

(3) 素子間隔の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、電圧を30Vに固定し、2個の圧電素子間隔を5cm～20cmの4段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.25
- ② 初動周波数 : 図-3.26
- ③ P波速度 : 図-3.27
- ④ 矩形パルス幅 $10\mu s$ の場合の受振波動 : 図-3.28

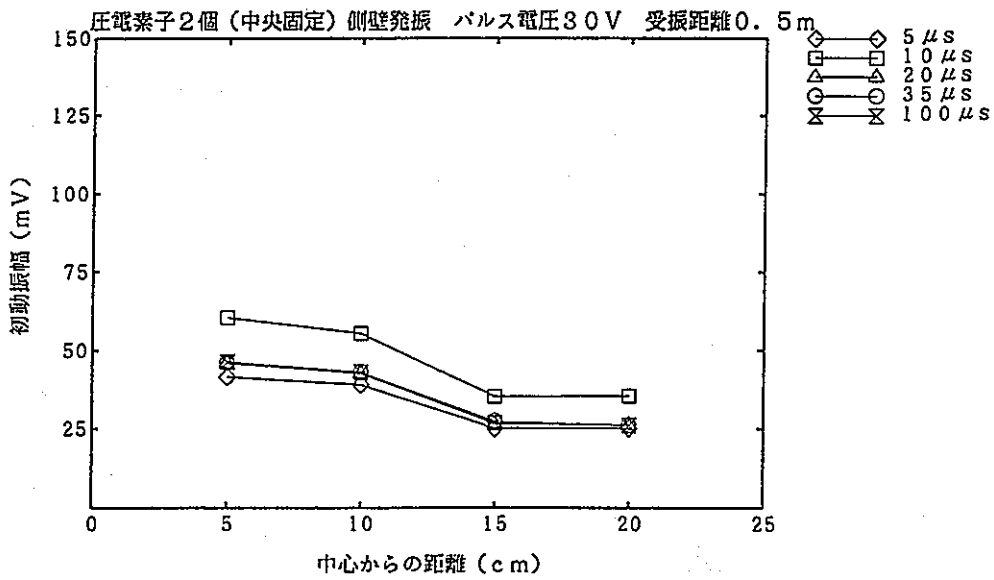


図-3.25 初動振幅の大きさ

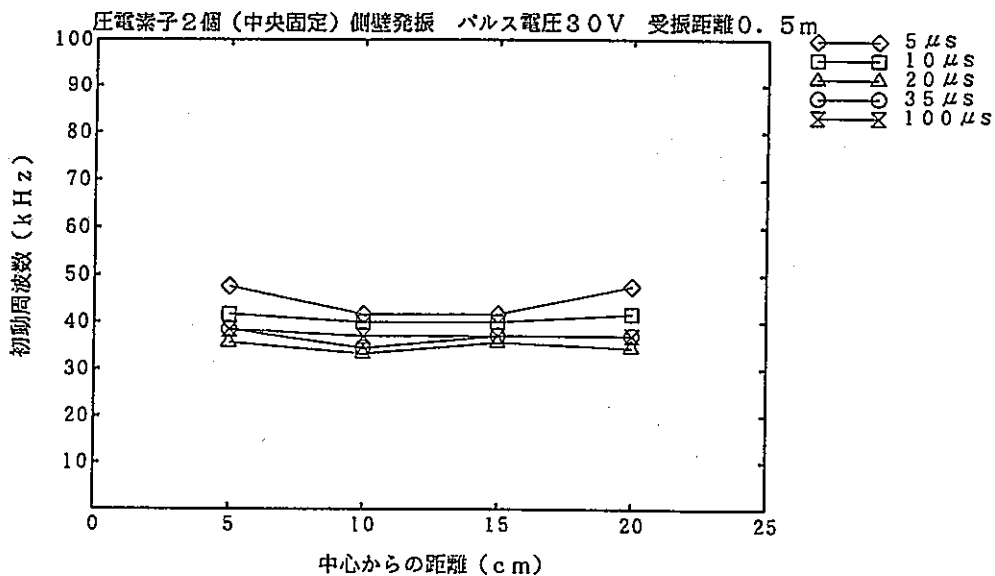


図-3.26 初動周波数

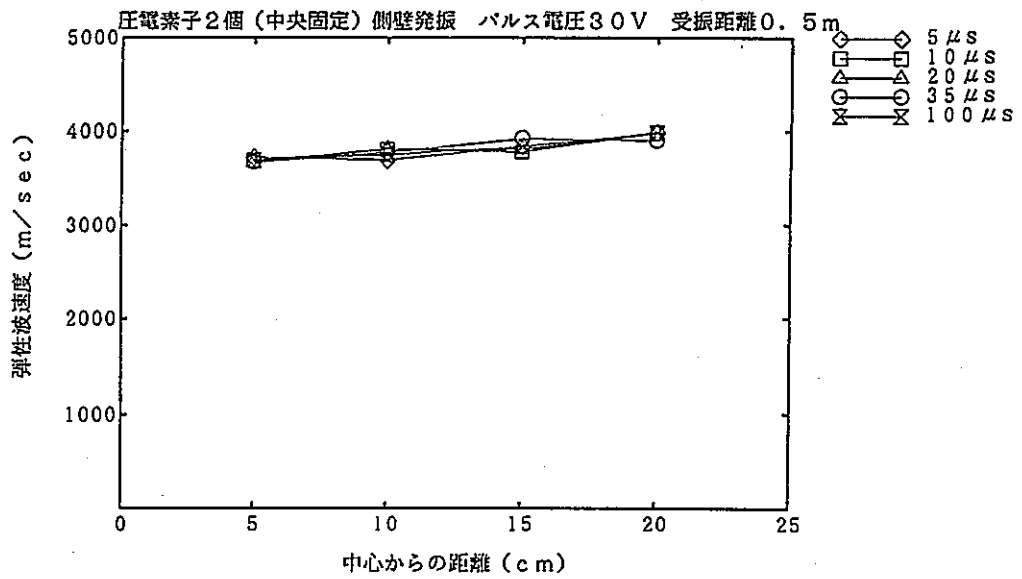


図-3.27 P波速度

素子間隔が広くなると初動振幅の大きさは小さくなる傾向にある。また、初動周波数は矩形パルス幅の大きさにより35kHz~45kHz程度のバラツキがあるが、素子間隔による影響はほとんど受けていない。一方、P波速度は素子間隔が大きくなるに伴い、徐々に速くなり、素子間隔5cmと20cmの場合では200m/s程度の開きが生じている。

圧電素子2個（1個中央固定）側壁発振 受振距離0.5m パルス電圧30V パルス幅10 μ s

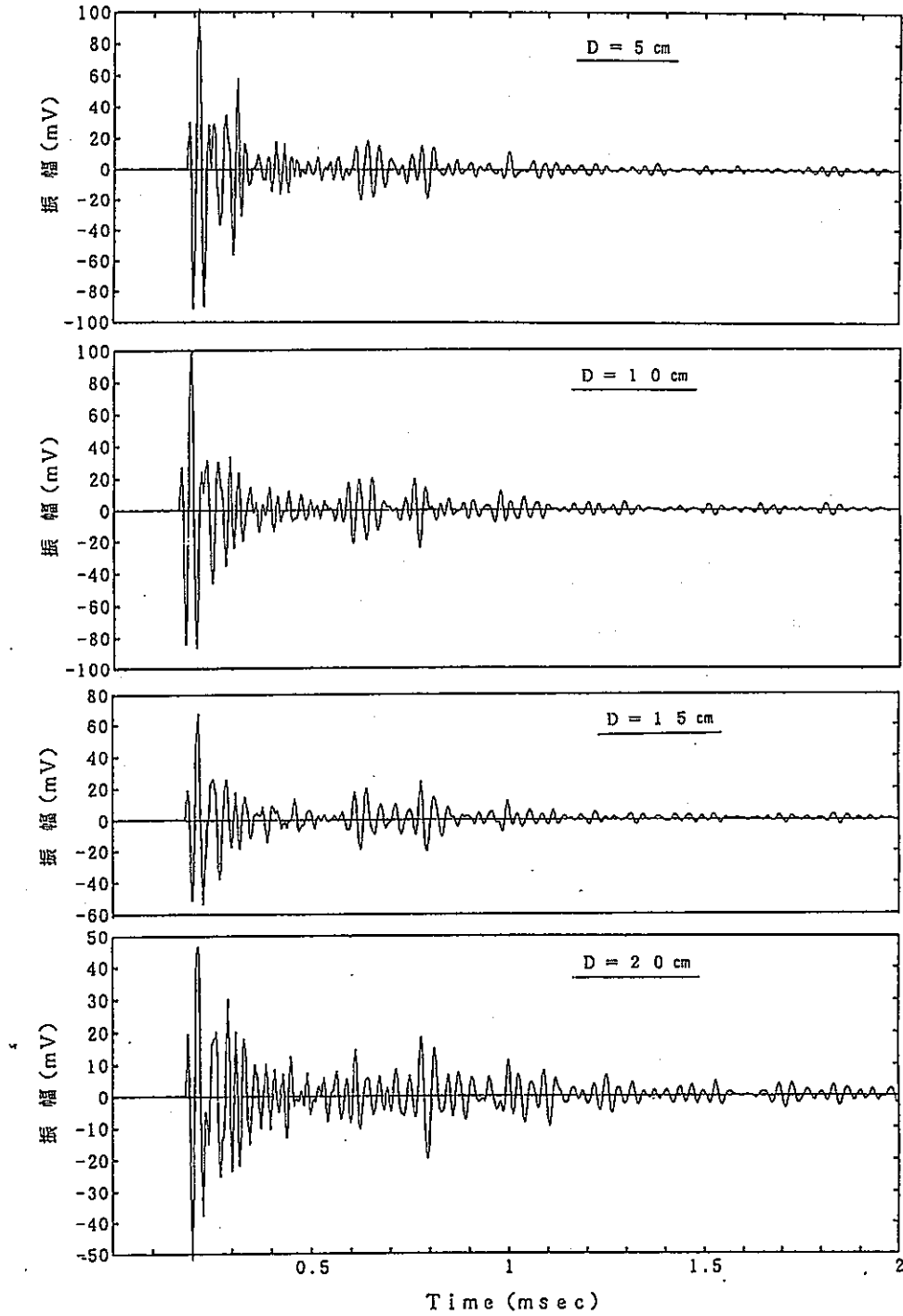
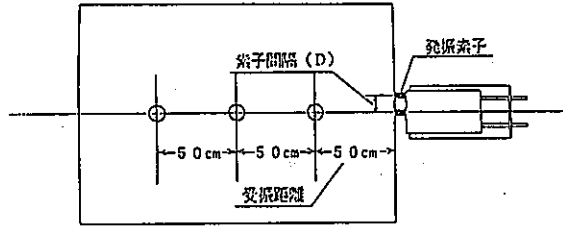


図-3.28 受振波動

(4) 発振・受振点間距離の影響

圧電素子に与える電圧を30V、矩形パルス幅を10 μ sで一定にし、発振・受振点間距離を50cm~1.5mの3段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.29
- ② 初動周波数 : 図-3.30
- ③ P波速度 : 図-3.31
- ④ 電圧30V、矩形パルス幅10 μ sの場合の受振波動 : 図-3.32、図-3.33

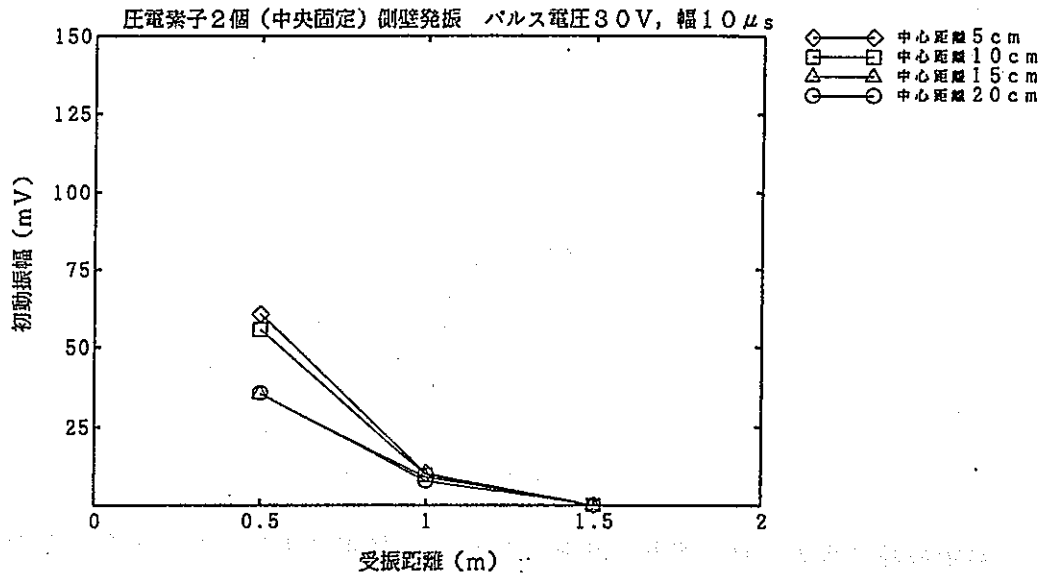


図-3.29 初動振幅の大きさ

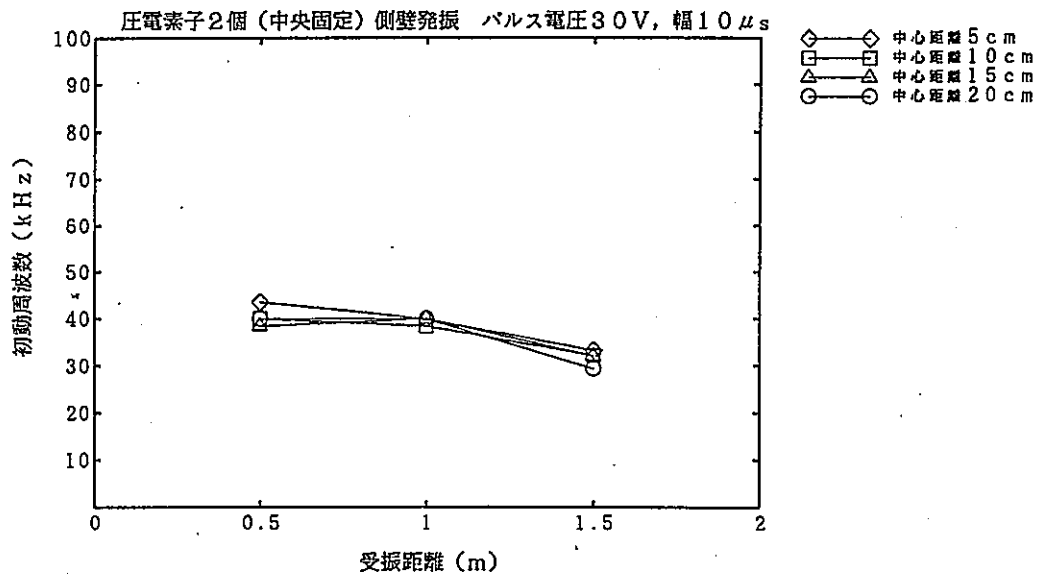


図-3.30 初動周波数

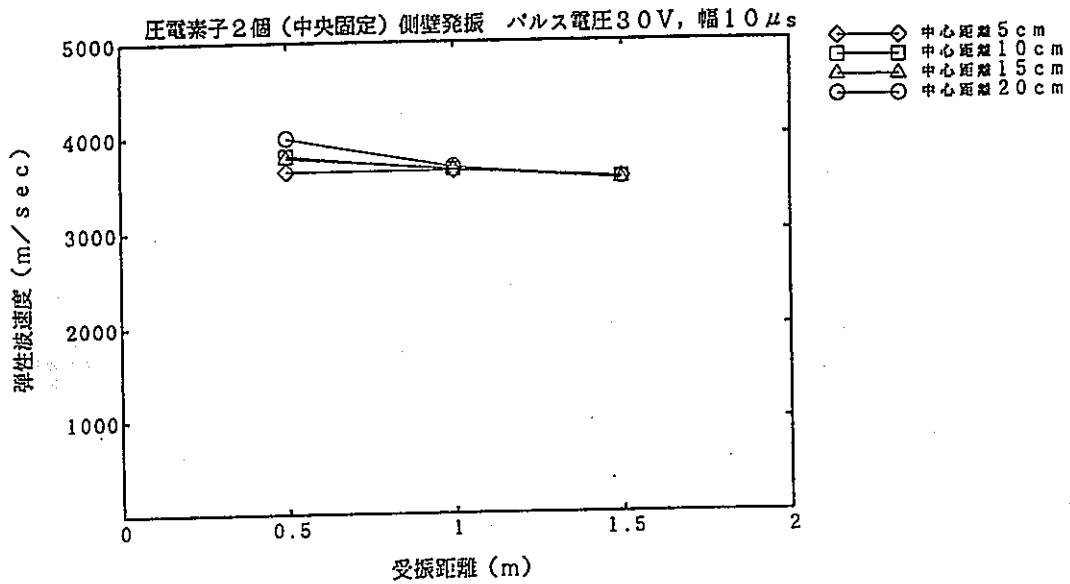


図-3.31 P波速度

初動振幅の大きさは、発振・受振点間距離の増加に伴い、小さくなっており、発振・受振点間距離50cmでは、素子間隔によりバラツキのあったものが、1m以上ではほとんど差がなくなっている。また、初動周波数も、40KHzから徐々に低下し、発振・受振点間距離1.5mでは、30KHz程度になっている。一方、P波速度についても、低下がみられる。

圧電素子2個（1個中央固定）側壁発振 素子間隔20cm パルス電圧30V パルス幅10 μ s

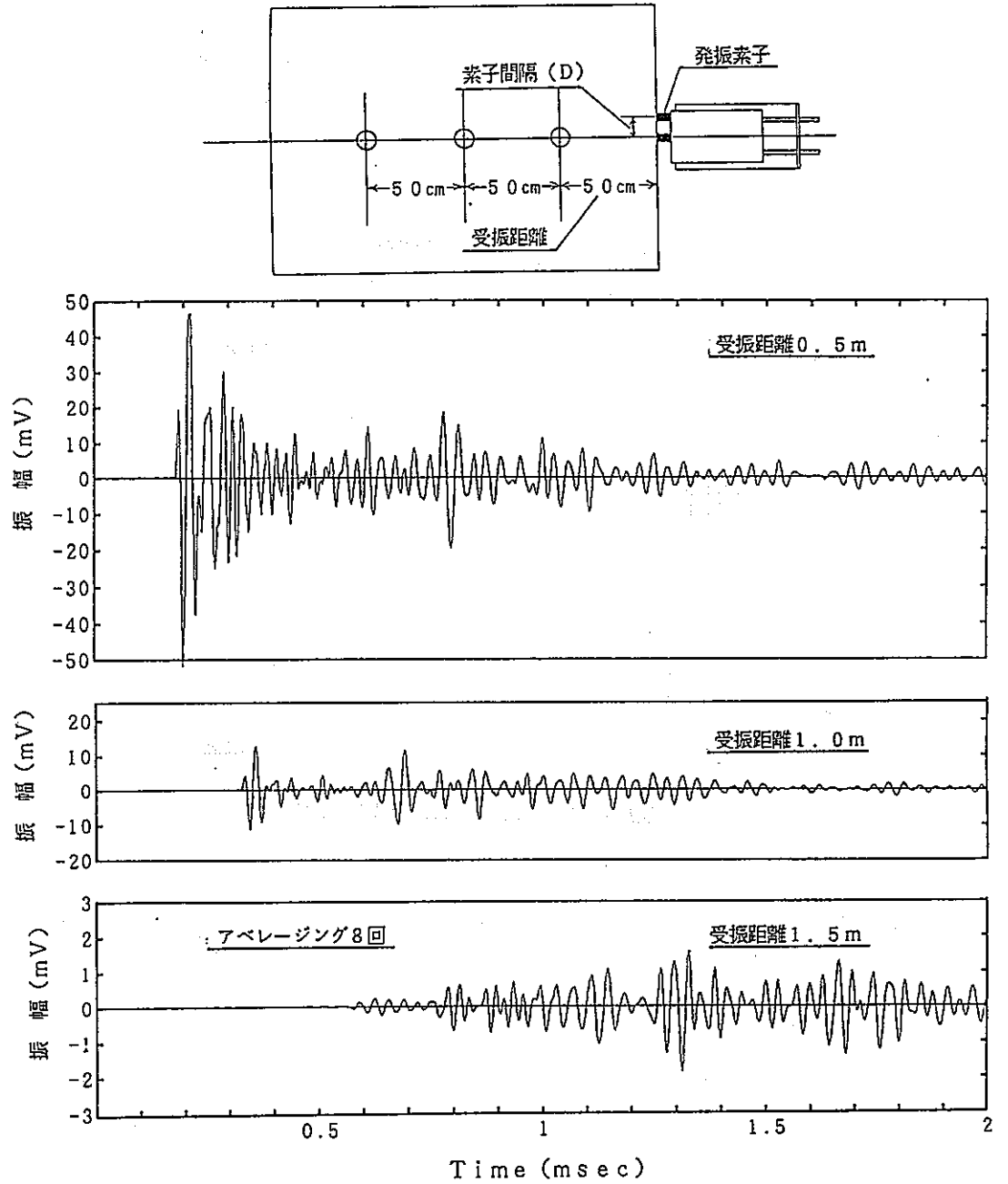


図-3.32 受振波動 (1)

圧電素子2個 (1個中央固定) 側壁発振 索子間隔5 cm パルス電圧30 V パルス幅10 μ s

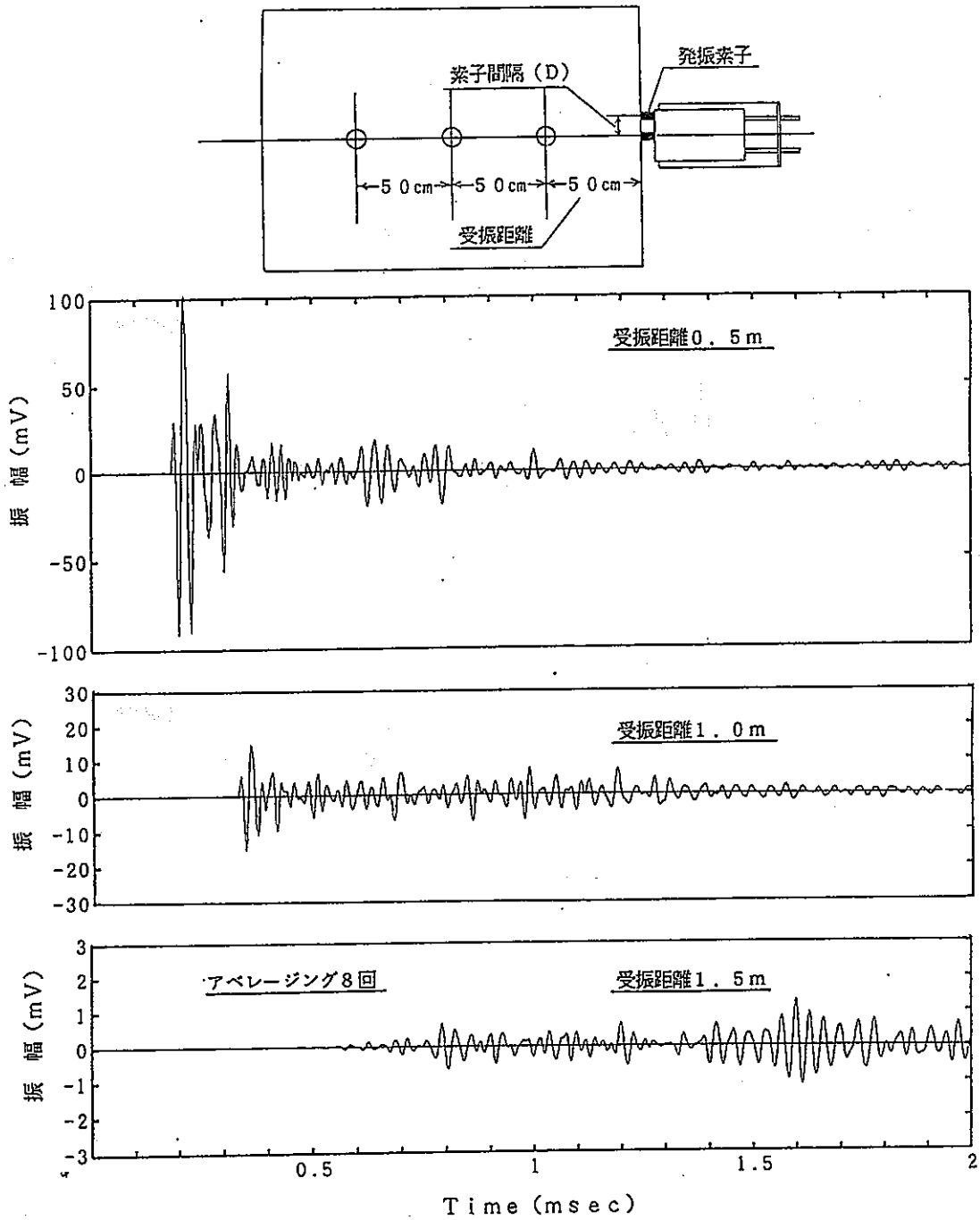


図-3.33 受振波動 (2)

3.3 実験3 (並列発振、中央振り分け)

実験3は実験2と同様に、2個の圧電素子を並列に並べて発振源とし、圧電素子に与える電圧、矩形パルス幅や発振・受振点間距離、および素子間隔の影響を測定した。圧電素子の配置は図-3.34に示すように、素子間の中央部を3孔の直線上に配置した(中央振り分けと呼ぶ)。測定結果一覧を表-3.3に示す。

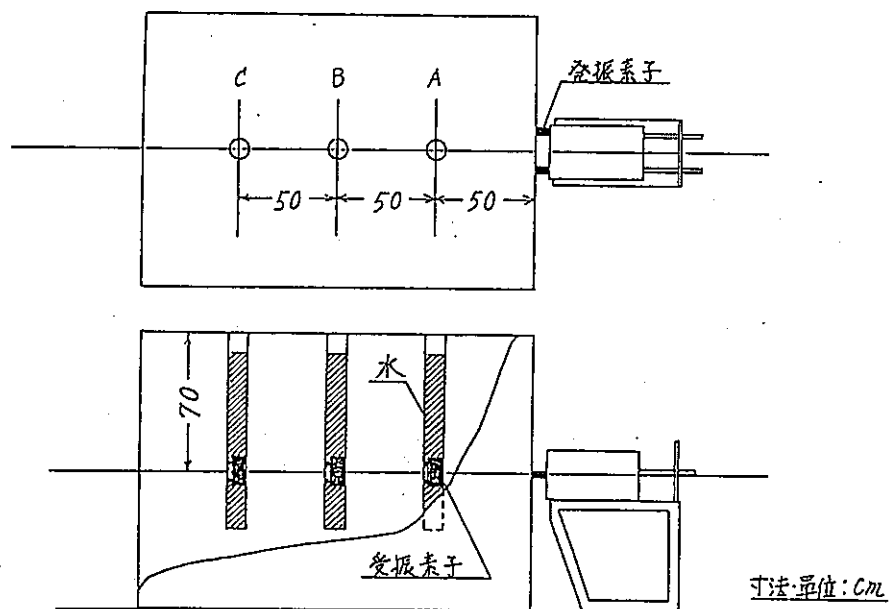


図-3.34 実験3の概要

表-3.3 測定結果一覧（実験3）

3-1. 受振距離50cm（A孔），パルス電圧30V，初動振幅（mV）

		圧電素子2個間の距離（cm）				圧電素子1個の中心からの距離（cm）				
		5	10	15	20	0	2.5	5.0	7.5	10.0
パルス幅 （ μ s）	5	41.60	48.24	44.34	40.63	22.97	28.13	25.63	22.50	20.86
	10	66.02	72.66	67.58	59.96	34.06	40.82	37.89	33.75	31.25
	20	50.20	54.30	50.00	45.12	25.47	30.23	28.52	25.47	23.36
	35	51.00	54.49	50.20	45.31	25.78	30.08	28.52	25.39	23.28
	100	51.17	54.69	50.98	44.92	25.63	30.23	28.44	25.55	23.13

3-2. 受振距離50cm（A孔），パルス幅10 μ s，初動振幅（mV）

		圧電素子2個間の距離（cm）			
		5	10	15	20
電圧 （V）	10	—	—	—	18.75
	20	—	—	—	37.70
	30	—	—	—	59.96
	40	—	—	—	74.22
	50	—	—	—	91.41

3-3. パルス電圧30V，パルス幅10 μ s，初動振幅（mV）

		圧電素子2個間の距離（cm）				圧電素子1個の中心からの距離（cm）				
		5	10	15	20	0	5	10	15	20
受振距離 （cm）	50	66.02	72.66	67.58	59.96	34.06	40.82	37.89	33.75	31.25
	100	12.30	10.70	8.16	9.06	5.11	5.70	5.47	3.47	5.73
	150	0.031	0.023	0.023	0.023	0.017	0.020	0.014	0.017	0.014

(1) 電圧の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、素子間隔を20cm、矩形パルス幅を $10\mu\text{s}$ に固定し、電圧を10V～50V間の5段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.35
- ② 初動周波数 : 図-3.36
- ③ P波速度 : 図-3.37
- ④ 矩形パルス幅 $10\mu\text{s}$ 、素子間隔20cmでの受振波動 : 図-3.38

圧電素子2個（中央振り分け）側壁発振 パルス幅 $10\mu\text{s}$ 間隔20cm 受振距離0.5m

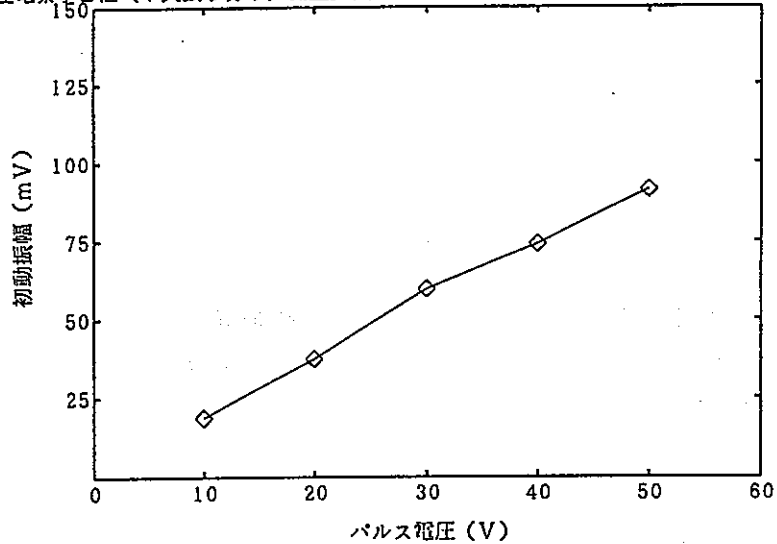


図-3.35 初動振幅の大きさ

圧電素子2個（中央振り分け）側壁発振 パルス幅 $10\mu\text{s}$ 間隔20cm 受振距離0.5m

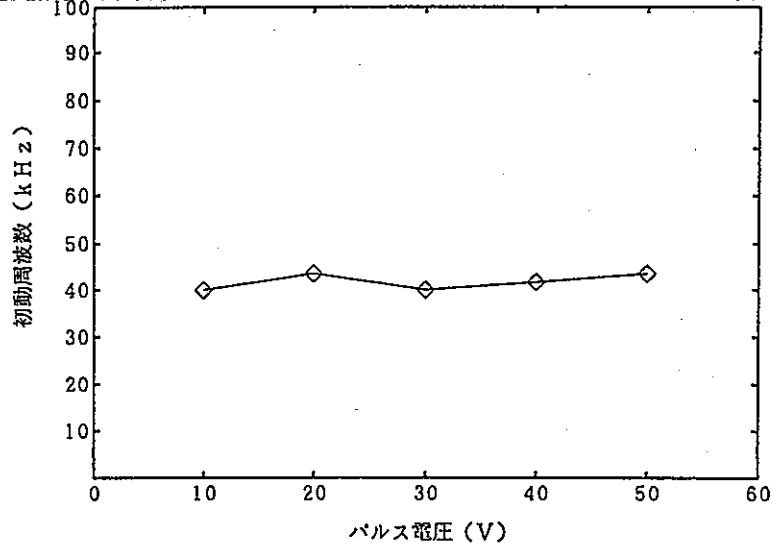


図-3.36 初動周波数

圧電素子2個(中央振り分け) 側壁発振 パルス幅10 μ s 間隔20cm 受振距離0.5m

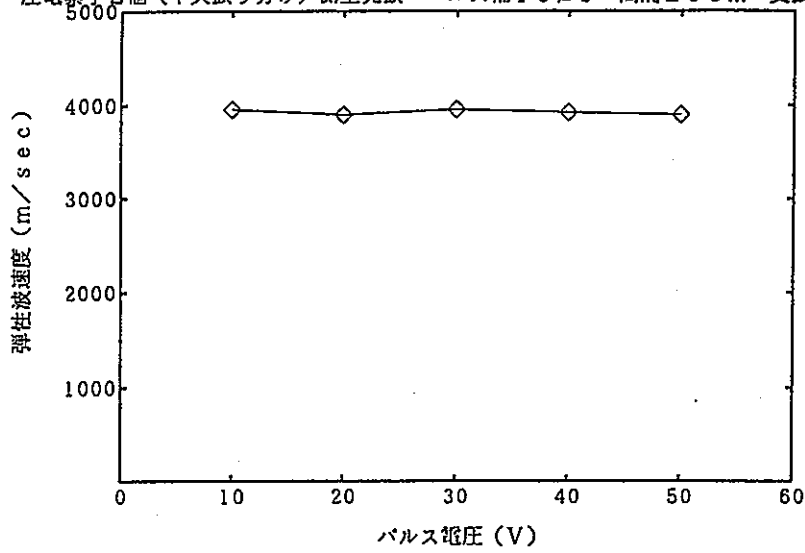


図-3.37 P波速度

初動振幅の大きさは電圧に比例して増加し、初動周波数は多少のバラツキはあるものの、ほぼ40kHz 付近の一定している。また、P波速度は4000m/s程度のほぼ一定した数値が得られている。

圧電素子2個(中心振り分け)側壁発振 索子間隔20 cm 受振距離0.5 m パルス幅10 μ s

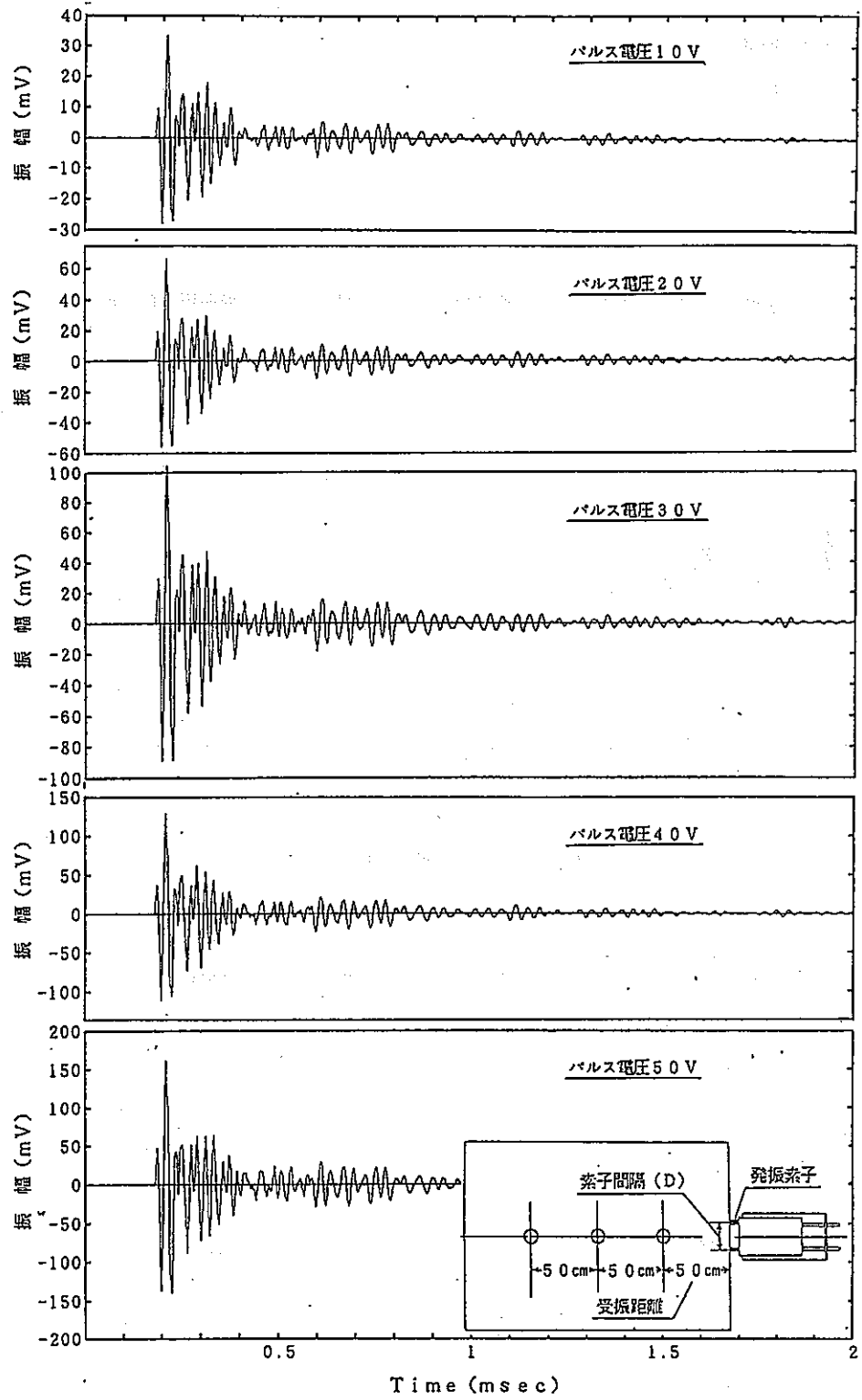


図-3.38 受振波動

(2) 矩形パルス幅の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、電圧を30Vに固定し、矩形パルス幅を $5\mu\text{s}$ ～ $100\mu\text{s}$ 間の5段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.39
- ② 初動周波数 : 図-3.40
- ③ P波速度 : 図-3.41
- ④ 電圧を30Vに一定した場合の受振波動 : 図-3.42、図-3.43

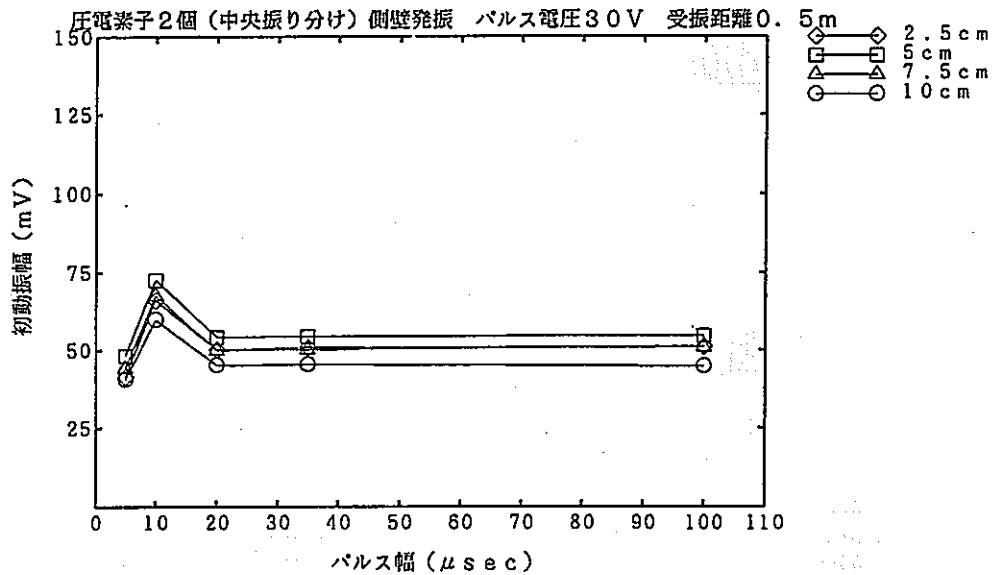


図-3.39 初動振幅の大きさ

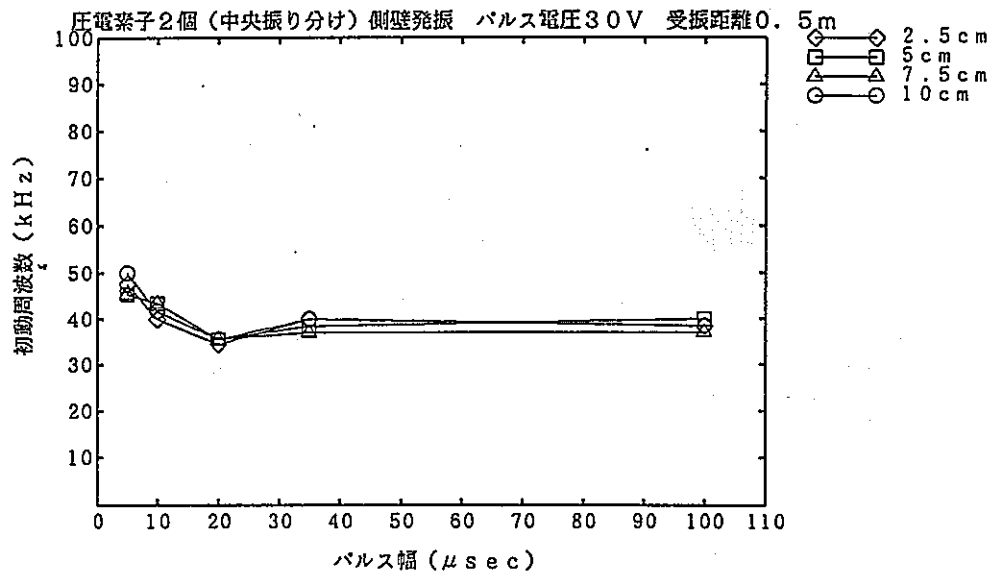


図-3.40 初動周波数

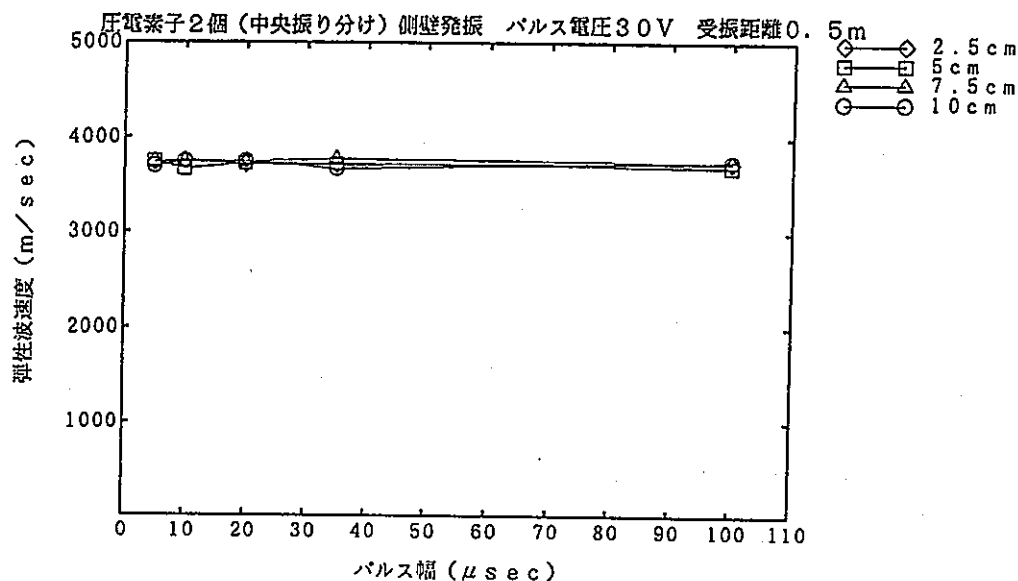


図-3.41 P波速度

初動振幅の大きさは矩形パルス幅が $5 \mu s$ の場合にやや小さくなるが、 $10 \mu s$ で最も大きい振幅が測定され、 $20 \mu s$ 以上ではほとんど一定である。また、初動周波数は矩形パルス幅 $5 \mu s$ の場合に $45 \sim 50 \text{ KHz}$ の最も高い周波数となり、矩形パルス幅の増加とともに徐々に低くなるが、 $35 \mu s$ 以上では 40 KHz 程度で一定である。一方、P波速度は矩形パルス幅の大きさにかかわらず、 3800 m/s 程度で一定である。

圧電素子2個 (中心振り分け) 側壁発振 素子間隔5 cm 受振距離0.5 m パルス電圧30 V

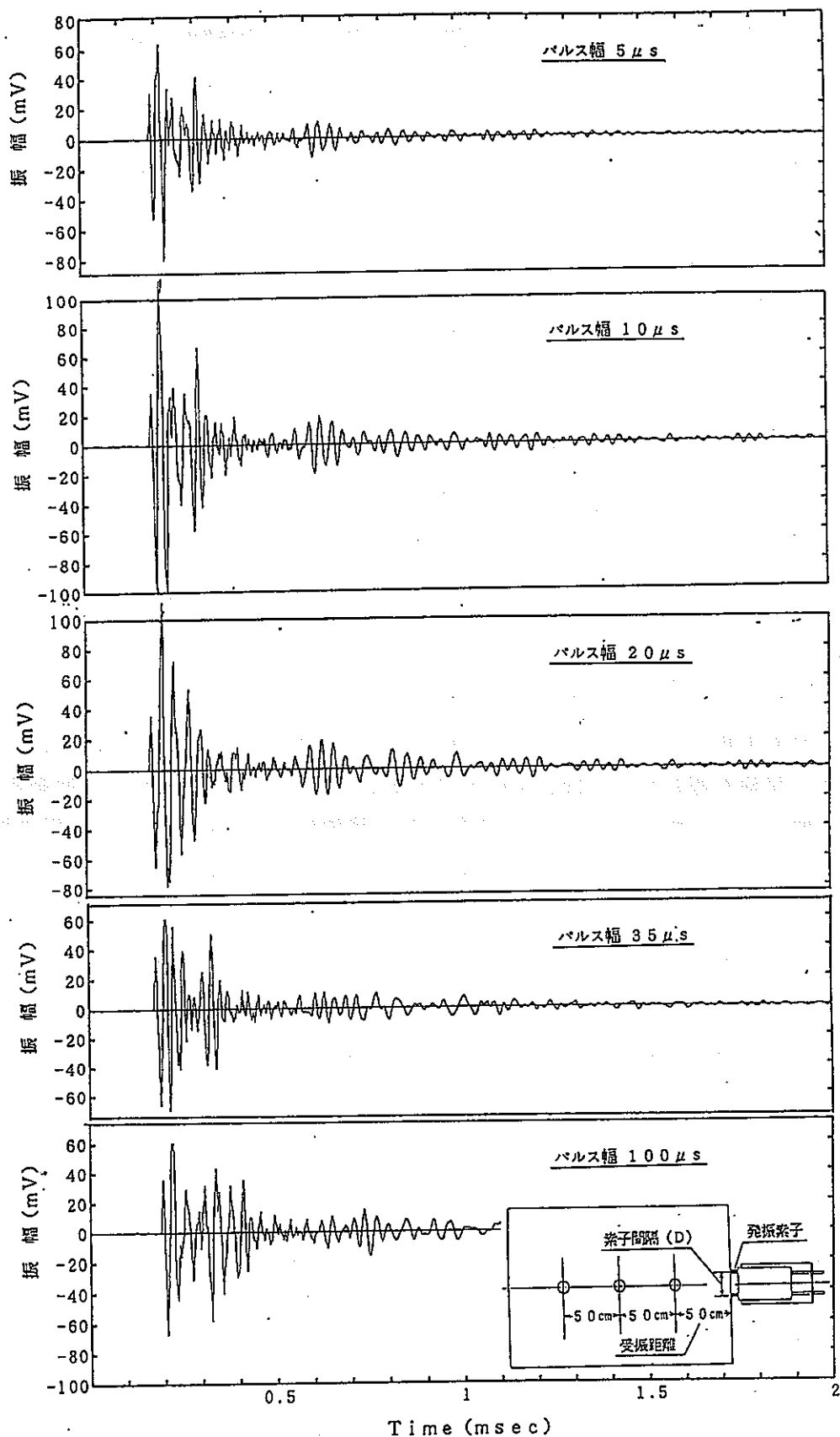


図-3.42 受振波動 (1)

圧電素子2個（中心振り分け）側壁発振 素子間隔5 cm 受振距離0.5 m パルス電圧30 V

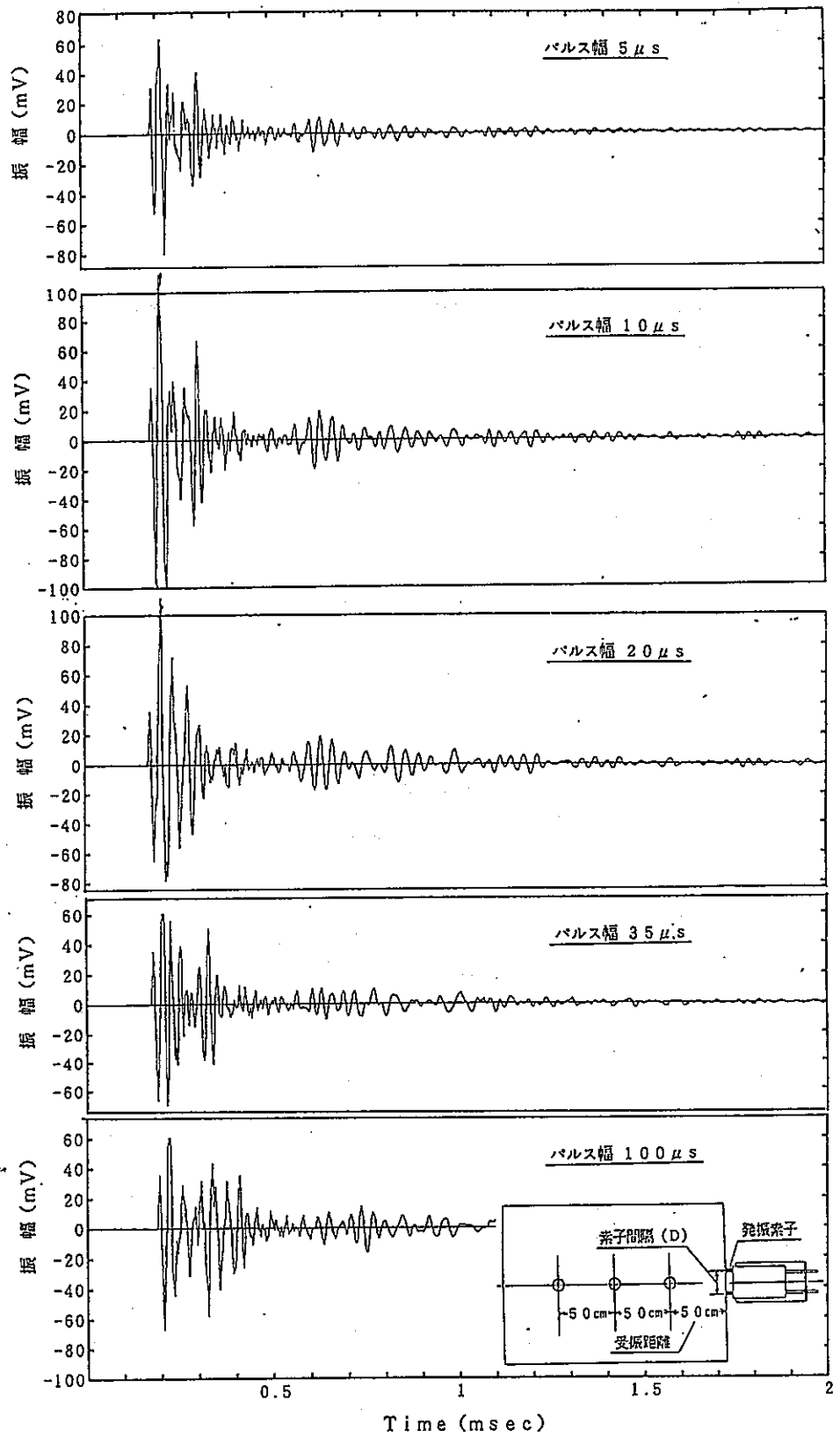


図-3.43 受振波動 (2)

(3) 素子間隔の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、電圧を30Vに固定し、2個の圧電素子間隔を5cm~20cmの4段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.44
- ② 初動周波数 : 図-3.45
- ③ P波速度 : 図-3.46
- ④ 矩形パルス幅10 μ sの場合の受振波動 : 図-3.47

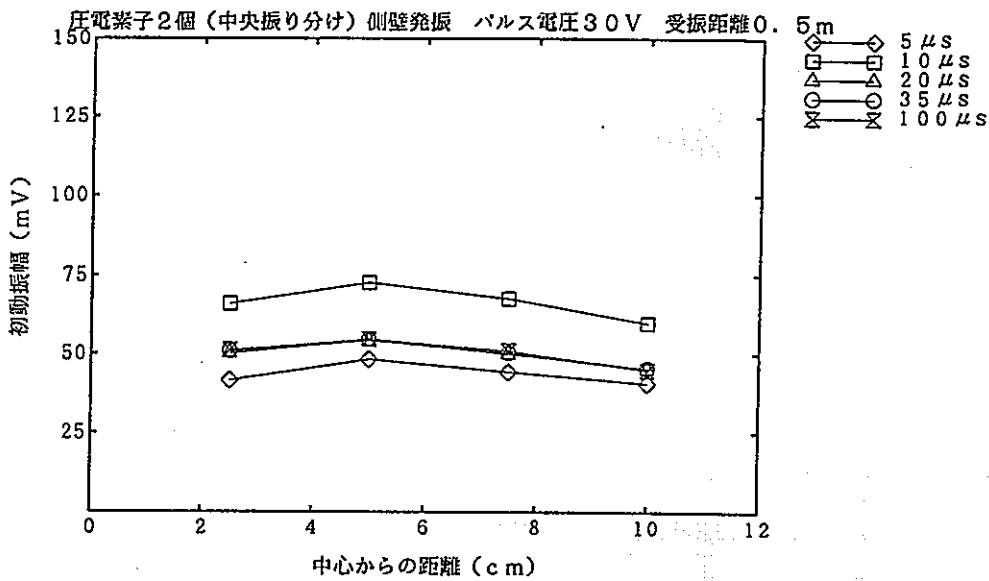


図-3.44 初動振幅の大きさ

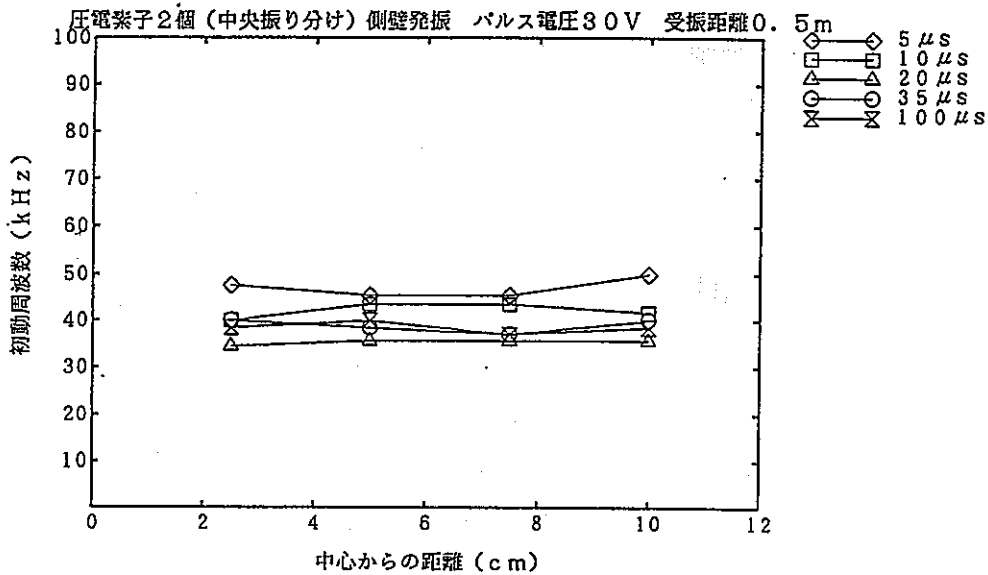


図-3.45 初動周波数

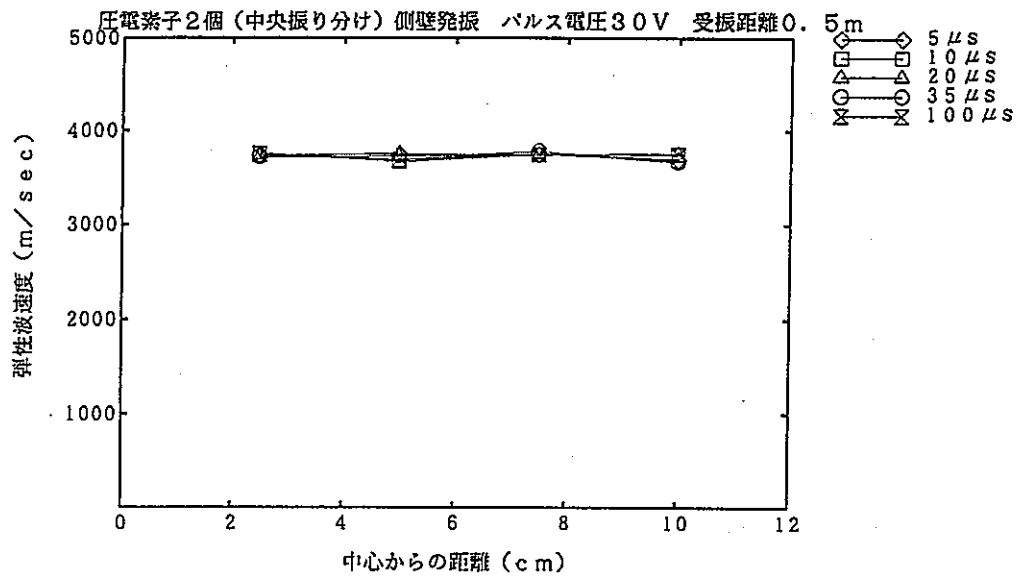


図-3.46 P波速度

初動振幅の大きさは素子間隔10cm（素子の中心からの距離5cm）の場合に最も大きくなり、素子間隔が小さくあるいは大きくなるにつれて徐々に振幅の大きさが小さくなっている。また、初動周波数は素子間隔に影響を受けずほぼ一定で、矩形パルス幅5 μs の場合に50kHz程度と最も周波数が高い。一方、P波速度は素子間隔にかかわらず一定で、サンプル試料の超音波速度測定による結果よりやや小さい値となっている。

圧電素子2個(中心振り分け)側壁発振 受振距離0.5m パルス電圧30V パルス幅10 μ s

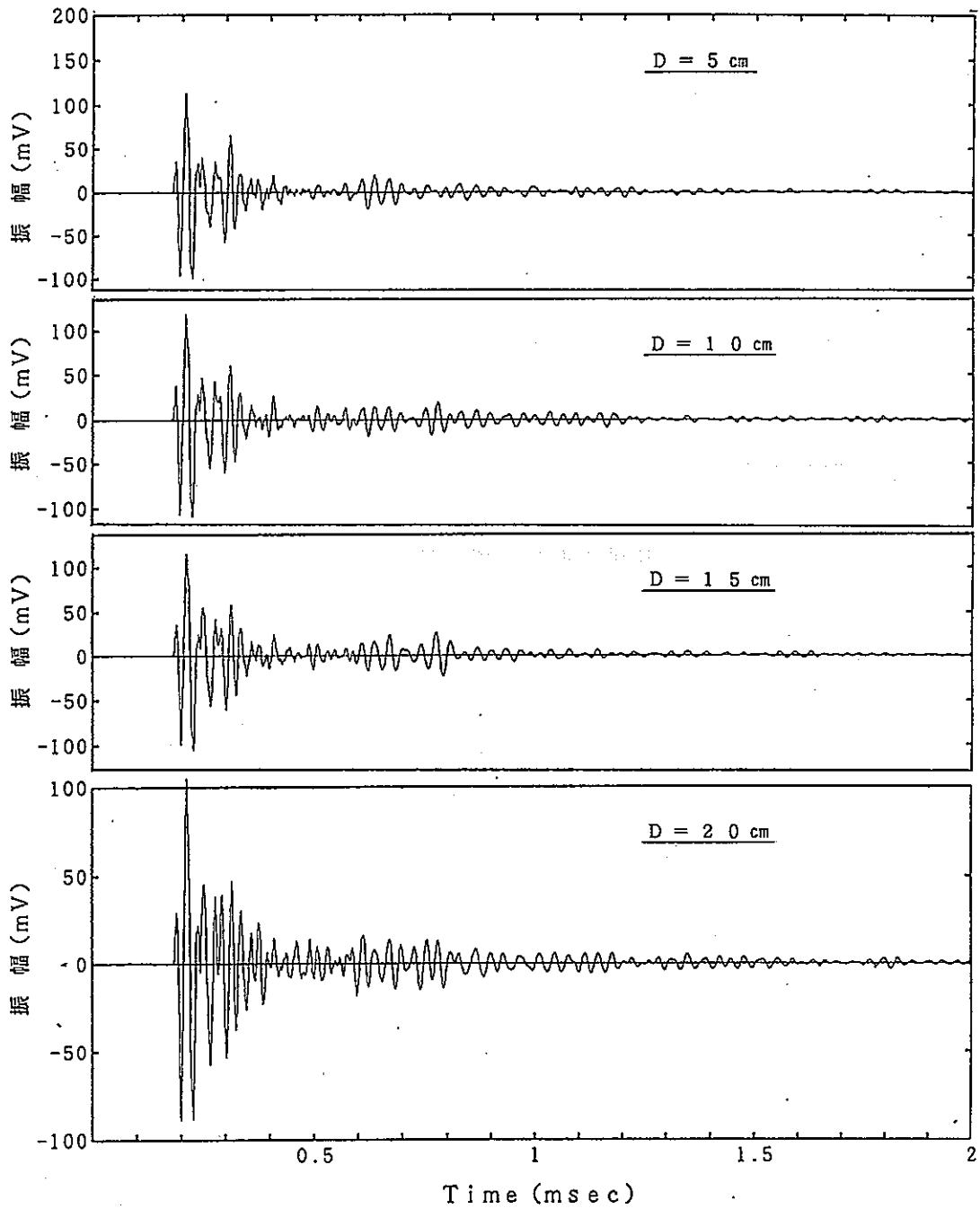
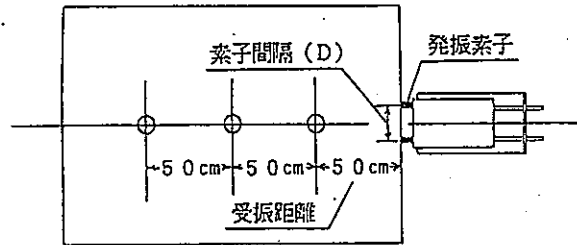


図-3.47 受振波動

(4) 発振・受振点間距離の影響

圧電素子に与える電圧を30V、矩形パルス幅を $10\mu\text{s}$ で一定にし、発振・受振点間距離を50cm~1.5mの3段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.48
- ② 初動周波数 : 図-3.49
- ③ P波速度 : 図-3.50
- ④ 電圧30V、矩形パルス幅 $10\mu\text{s}$ の場合の受振波動 : 図-3.51、図-3.52

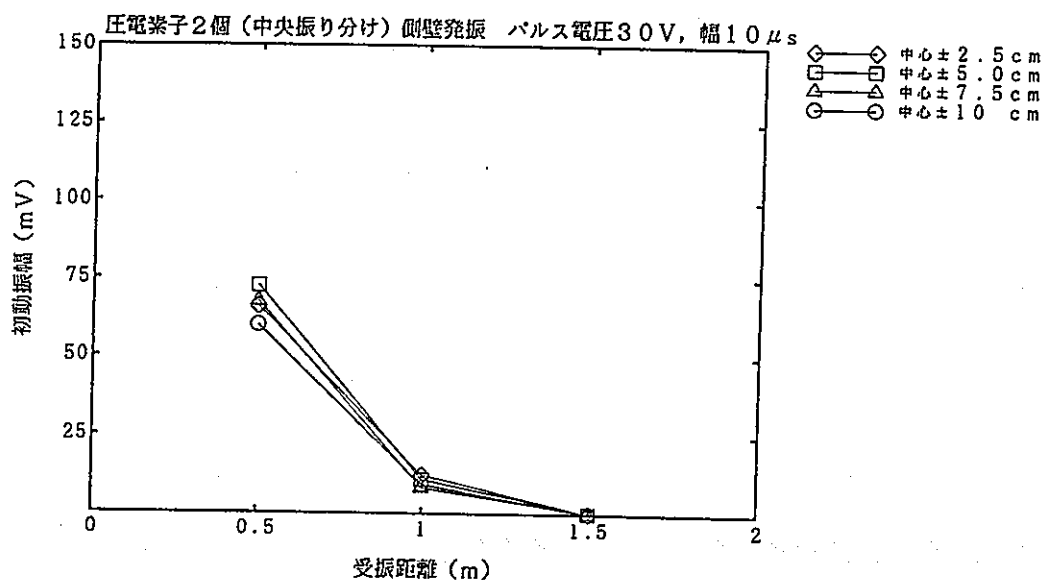


図-3.48 初動振幅の大きさ

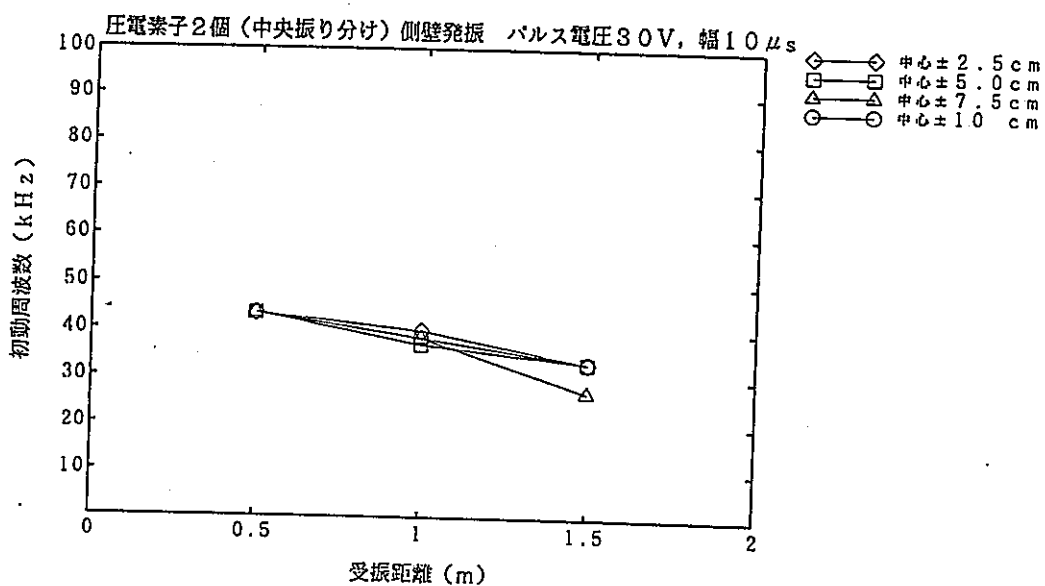


図-3.49 初動周波数

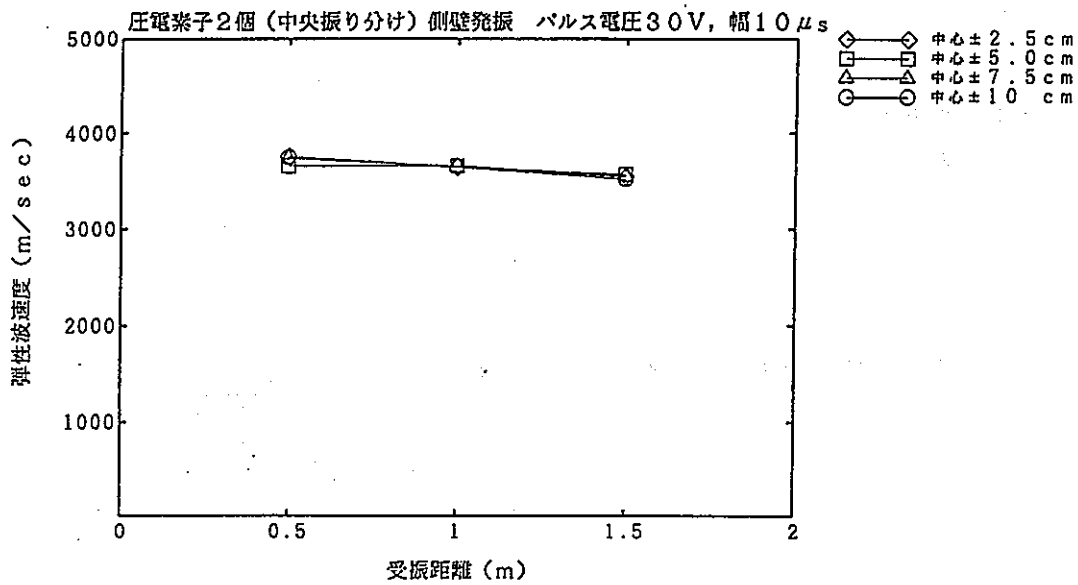


図-3.50 P波速度

発振・受振点間距離が大きくなると衝動振幅の大きさは小さくなっている。また、初動周波数は発振・受振点間距離が大きくなるにつれて45KHzから徐々に35KHz程度まで小さくなっている。一方、P波速度も同様に徐々に速度が遅くなる傾向がある。

圧電素子2個（中心振り分け）側壁発振 素子間隔5 cm パルス電圧30 V パルス幅10 μ s

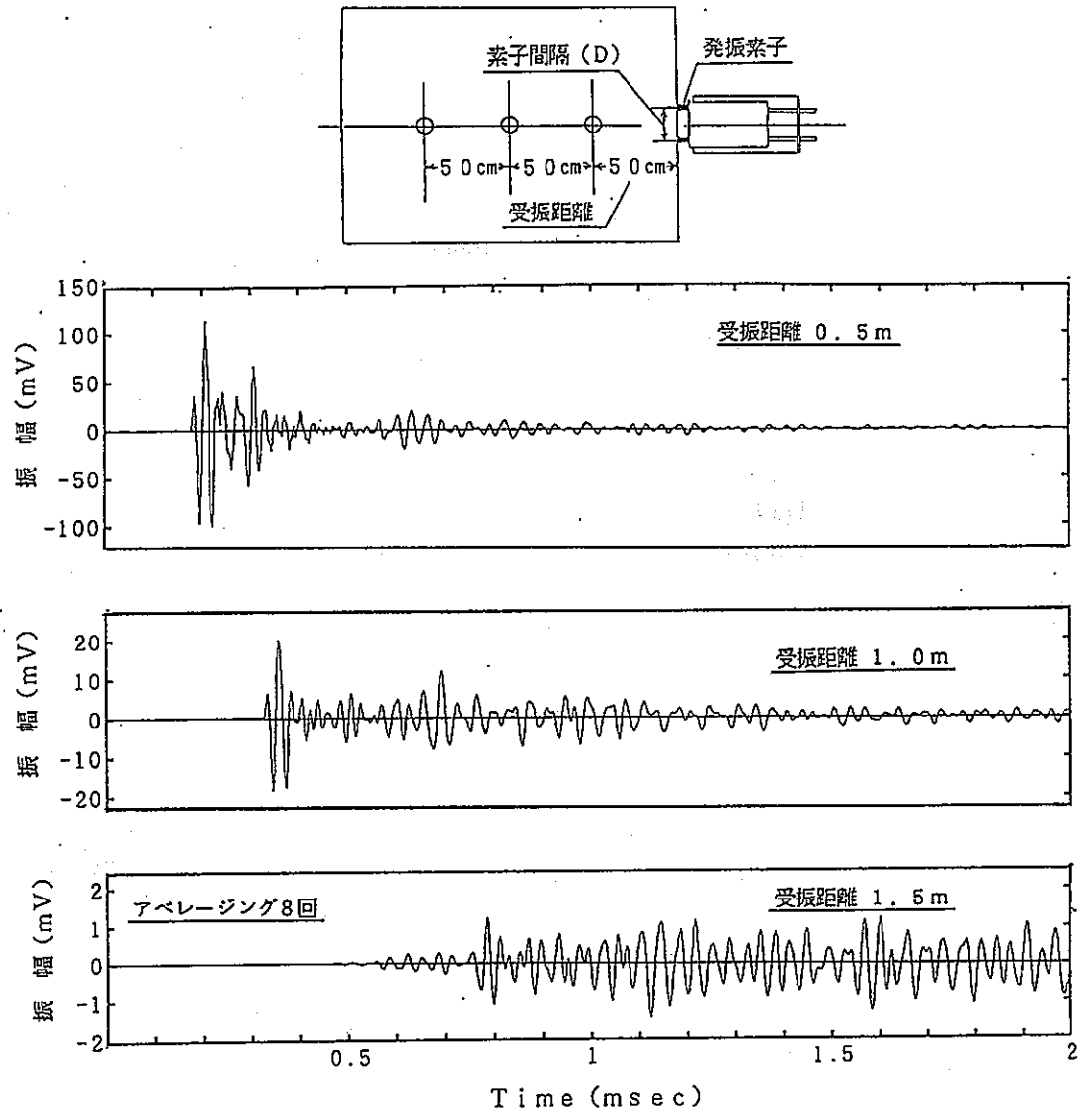


図-3.51 受振波動 (1)

圧電素子2個（中心振り分け）側壁発振 素子間隔20cm パルス電圧30V パルス幅10 μ s

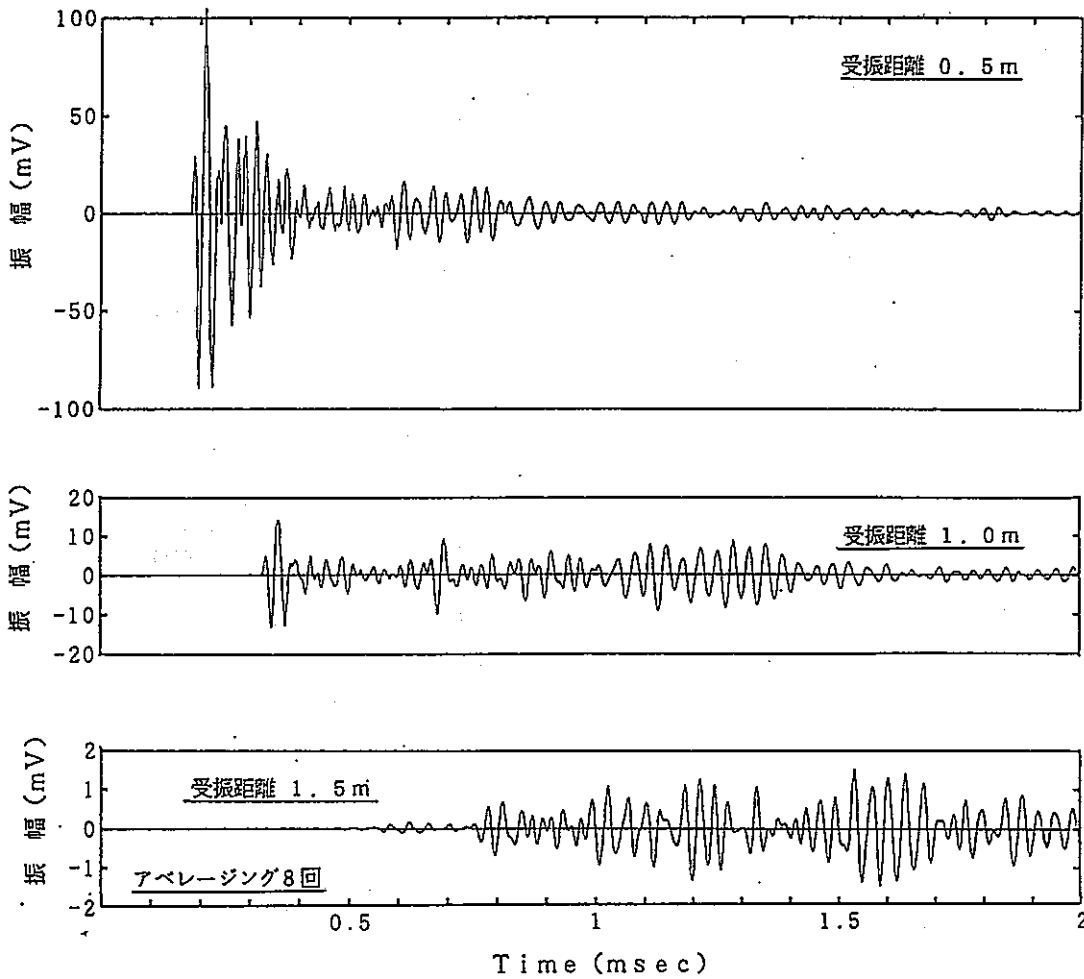
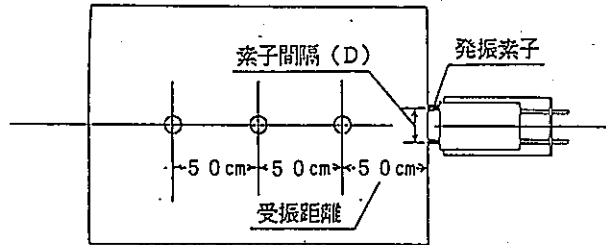


図-3.52 受振波動 (2)

3.4 実験4（並列発振）

実験4では図-3.53に示すように、3個の圧電素子を並列に並べて発振源とし、圧伝素子に与える電圧、矩形パルス幅や発振・受振点間距離、および素子間隔の影響を測定した。測定結果一覧を表-3.4に示す。

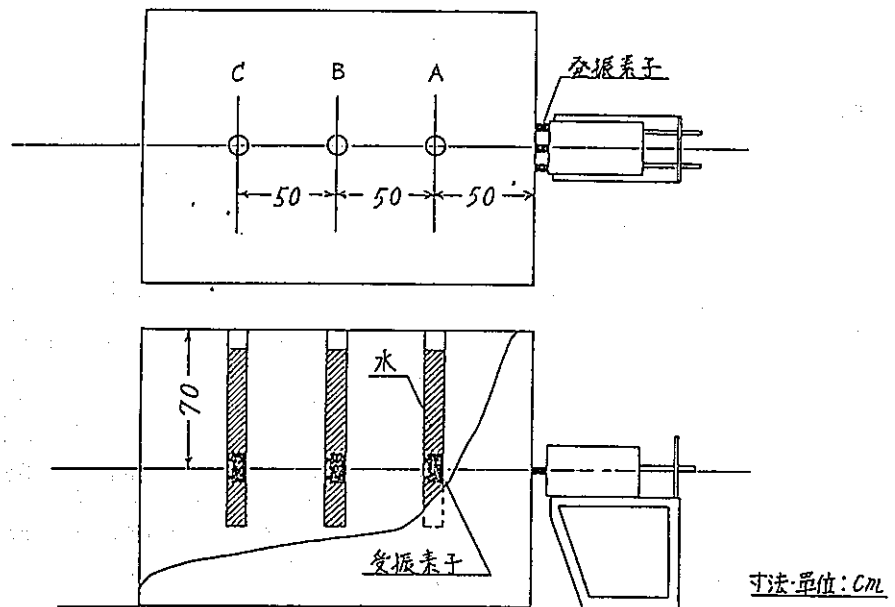


図-3.53 実験4の概要

表-3.4 測定結果一覧(実験4)

4-1. 受振距離50cm(A孔), 素子間隔; 中心振り分け5cm, 初動振幅(mV)

		電 圧 (V)				
		10	20	30	40	50
パ ル ス 幅 (μ s)	5	17.58	35.23	52.54	69.14	91.80
	10	26.56	53.91	79.69	104.30	130.86
	20	19.53	39.45	58.20	77.73	96.88
	35	19.45	38.87	58.98	77.54	96.68
	100	19.45	38.67	57.22	75.78	97.46

4-2. 受振距離50cm(A孔), 素子間隔; 中心振り分け10cm, 初動振幅(mV)

		電 圧 (V)				
		10	20	30	40	50
パ ル ス 幅 (μ s)	5	16.72	29.69	44.34	58.98	74.22
	10	25.39	44.14	66.41	88.67	112.11
	20	17.34	34.18	50.59	66.80	84.38
	35	17.03	33.44	49.02	65.82	81.64
	100	16.25	32.34	48.05	62.70	77.73

4-3. パルス電圧30V, パルス幅10 μ s, 初動振幅(mV)

		素子間隔 (cm)	
		5	10
受 振 距 離 (cm)	50	79.69	66.41
	100	12.66	16.64
	150	0.051	0.051

(1) 電圧の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、素子間隔を10cm、矩形パルス幅を $10\mu s$ に固定し、電圧を10V～50V間の5段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.54
- ② 初動周波数 : 図-3.55
- ③ P波速度 : 図-3.56
- ④ 矩形パルス幅 $10\mu s$ 、素子間隔10cmでの受振波動 : 図-3.57

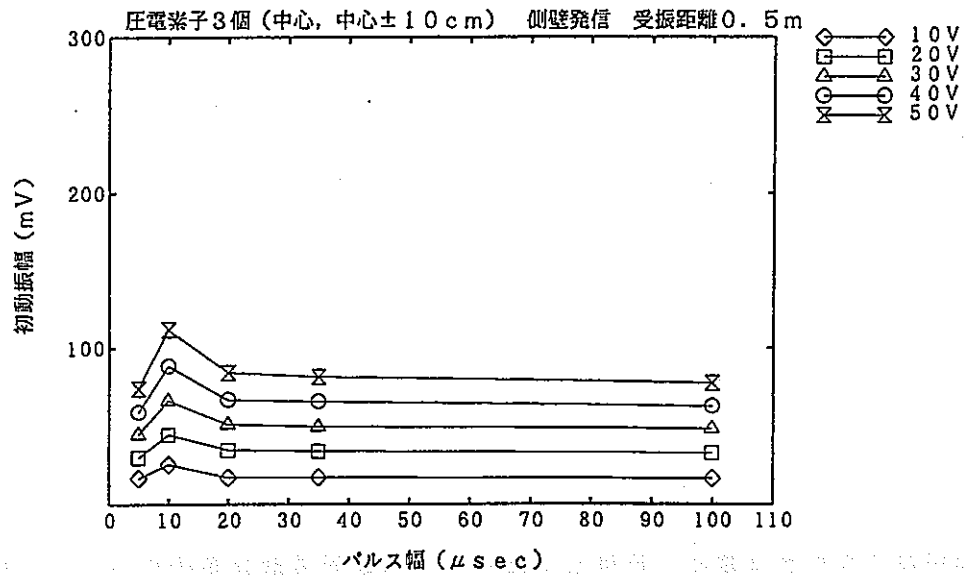


図-3.54 初動振幅の大きさ

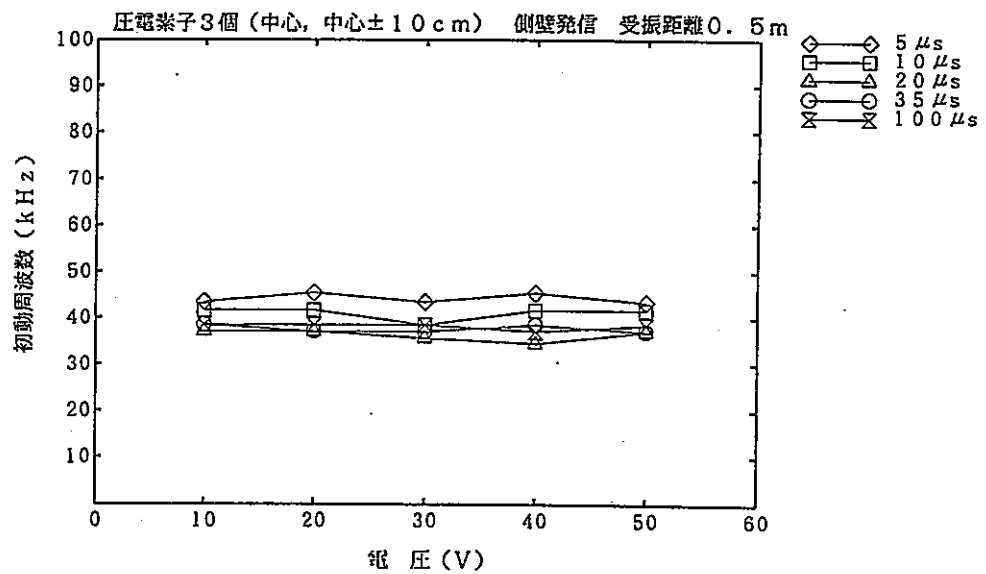


図-3.55 初動周波数

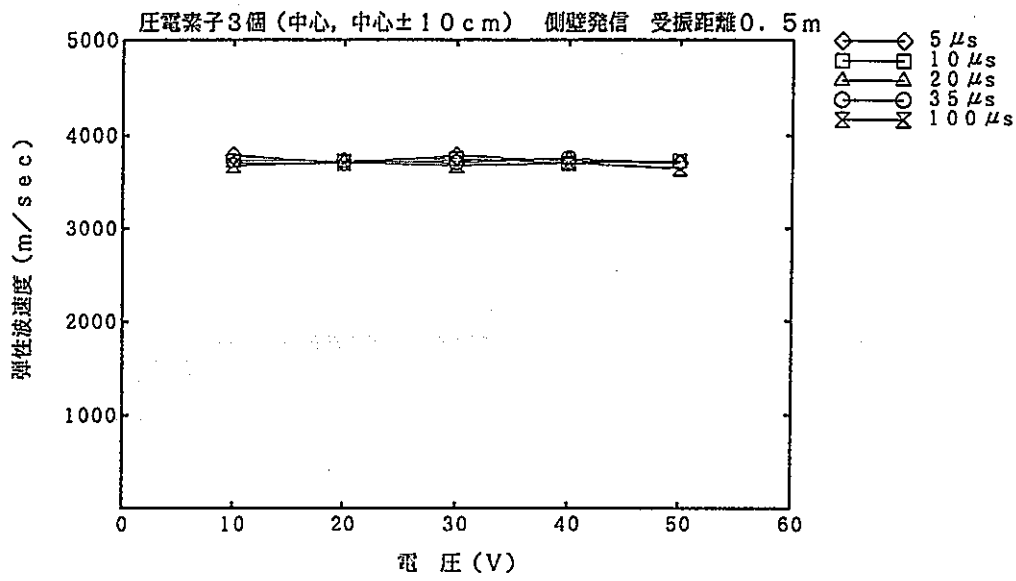


図-3.56 P波速度

初動振幅の大きさは電圧に比例して増加し、初動周波数は多少のバラツキはあるものの、ほぼ40KHz付近の一定した周波数である。また、P波速度は3800m/s程度の速度値が得られている。

圧電素子3個(1個中央固定)側壁発振 素子間隔10cm 受振距離0.5m パルス幅10 μ s

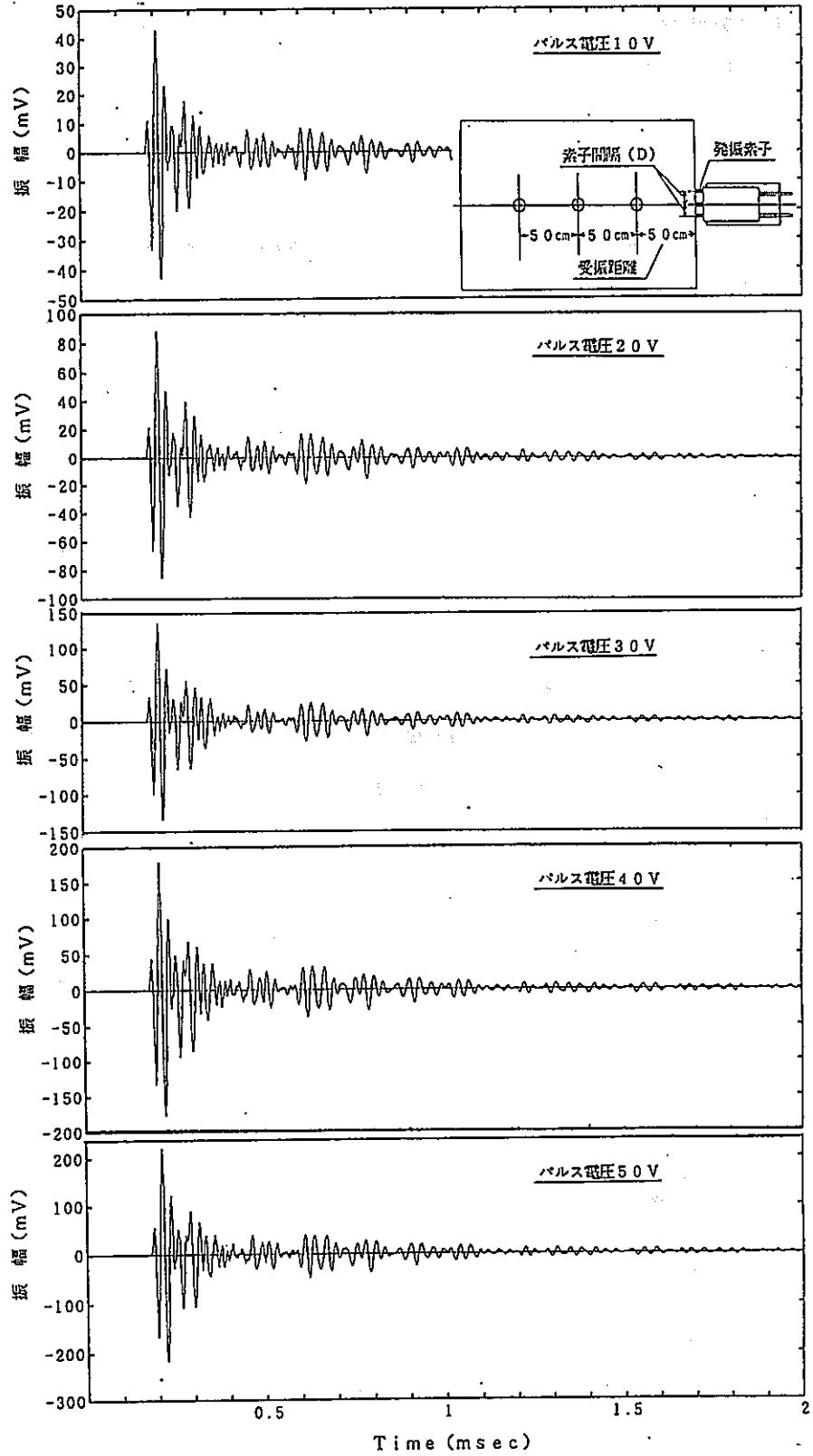


図-3.57 受振波動

(2) 矩形パルス幅の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、素子間隔を10cmに固定し、矩形パルス幅を $5\mu s \sim 100\mu s$ 間の5段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.58
- ② 初動周波数 : 図-3.59
- ③ P波速度 : 図-3.60
- ④ 電圧30Vに一定した場合の受振波動 : 図-3.61

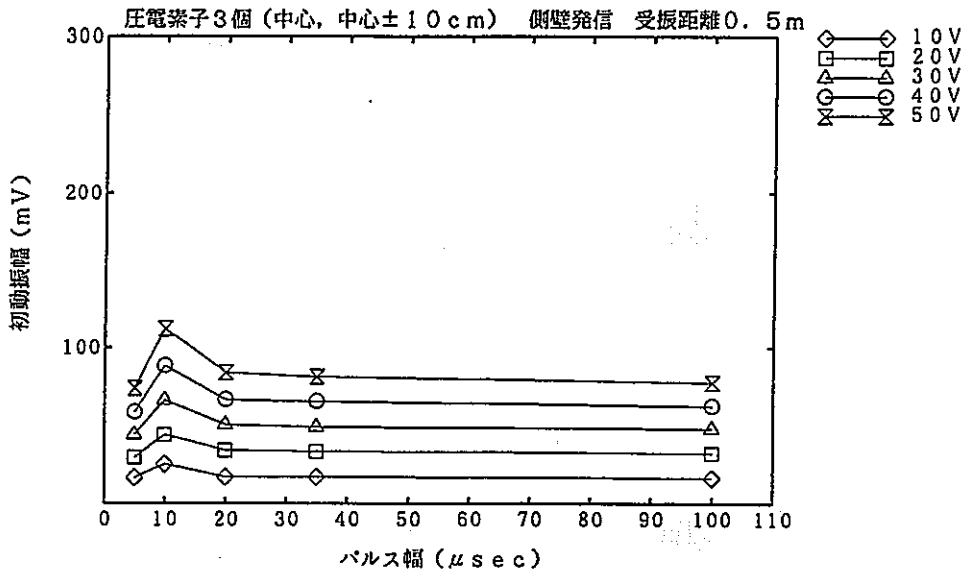


図-3.58 初動振幅の大きさ

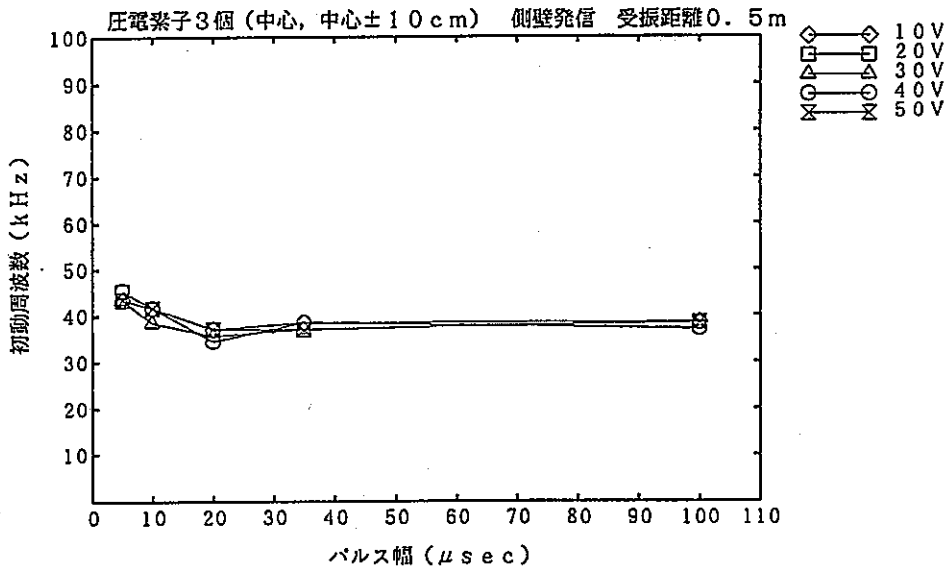


図-3.59 初動周波数

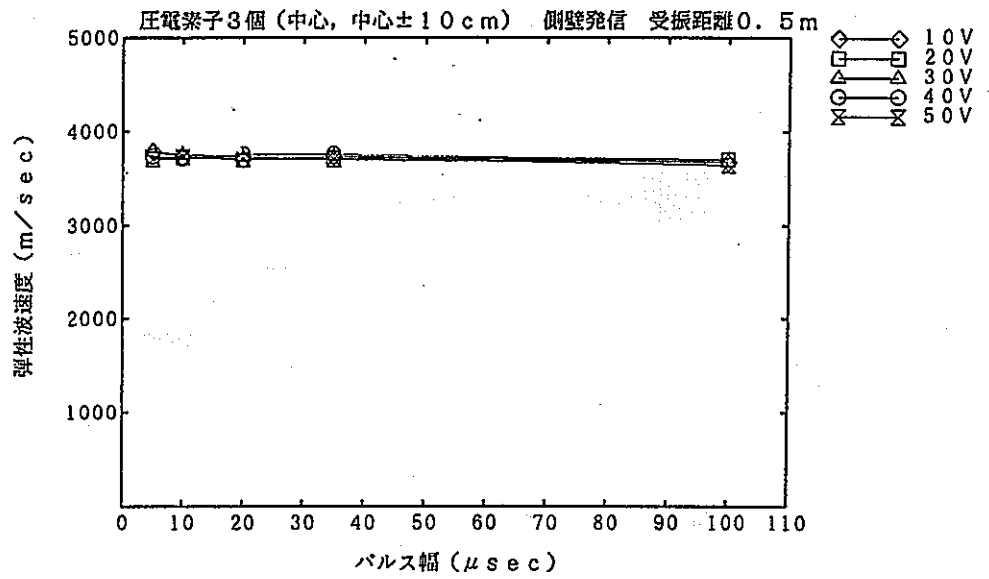


図-3.60 P波速度

初動振幅の大きさは矩形パルス幅が $5\mu s$ の場合にやや小さくなるが、 $10\mu s$ で最も大きい振幅が測定され、 $20\mu s$ 以上ではほとんど一定である。また、初動周波数は矩形パルス幅 $5\mu s$ の場合に $45\sim 50\text{kHz}$ の最も高い周波数となり、矩形パルス幅の増加とともに徐々に低くなるが、 $35\mu s$ 以上では 40kHz 程度で一定である。一方、P波速度は矩形パルス幅の大きさにかかわらず、 3800m/s 程度で一定である。

圧電素子3個(1個中央固定)側壁発振 索子間隔10cm 受振距離0.5m パルス電圧30V

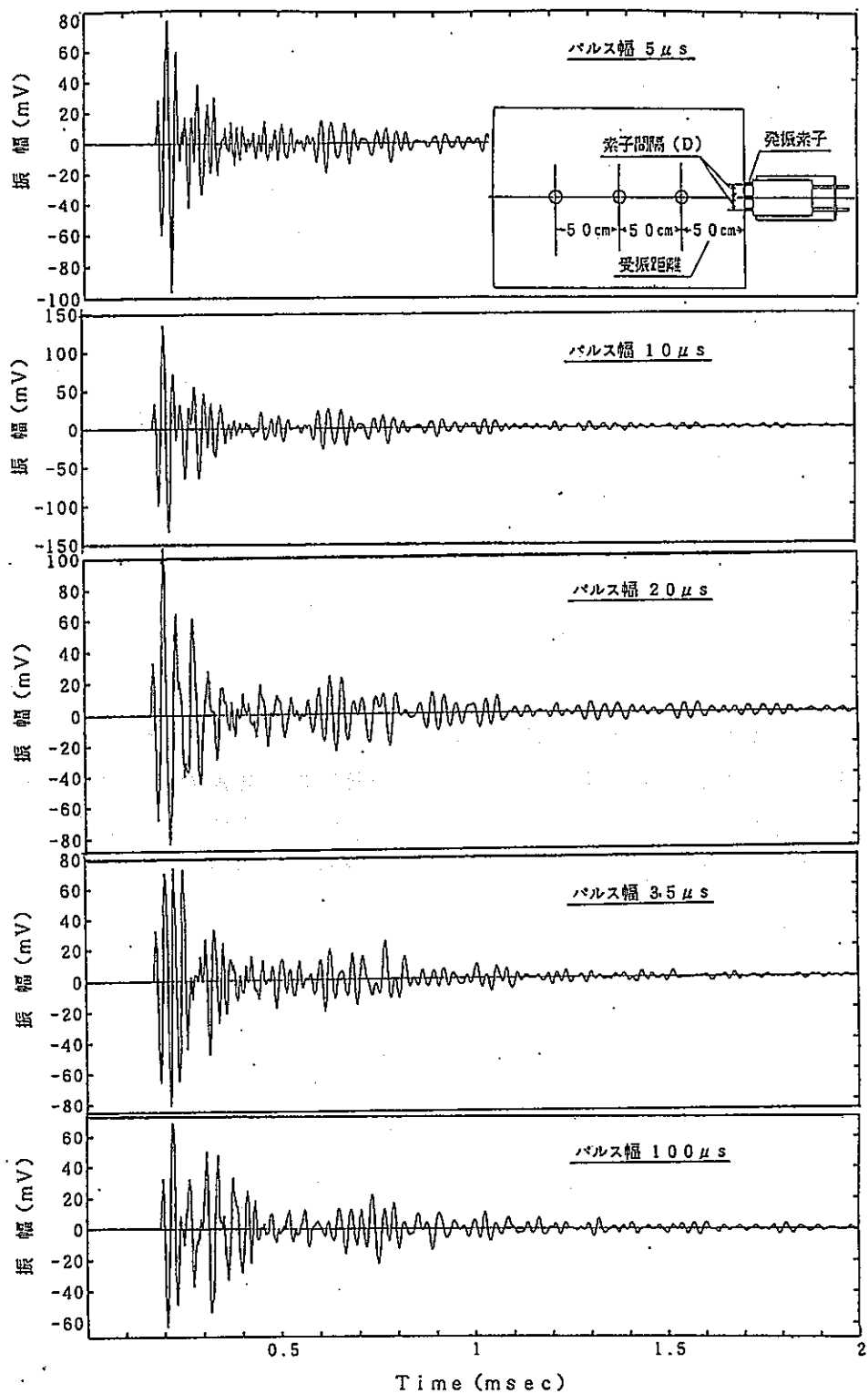


図-3.61 受振波動

(3) 素子間隔の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、素子間隔を5cmにした場合の初動振幅の測定結果を以下の図に示す。

- ① 電圧による変化 : 図-3.62
- ② 矩形パルス幅による変化 : 図-3.63
- ③ 受振波動 : 図-3.64

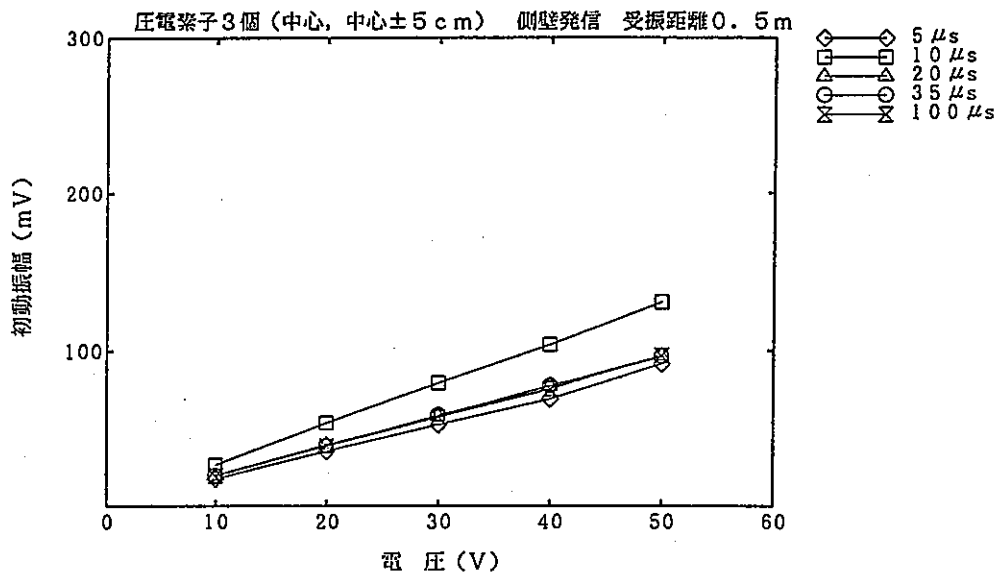


図-3.62 電圧による初動振幅の変化

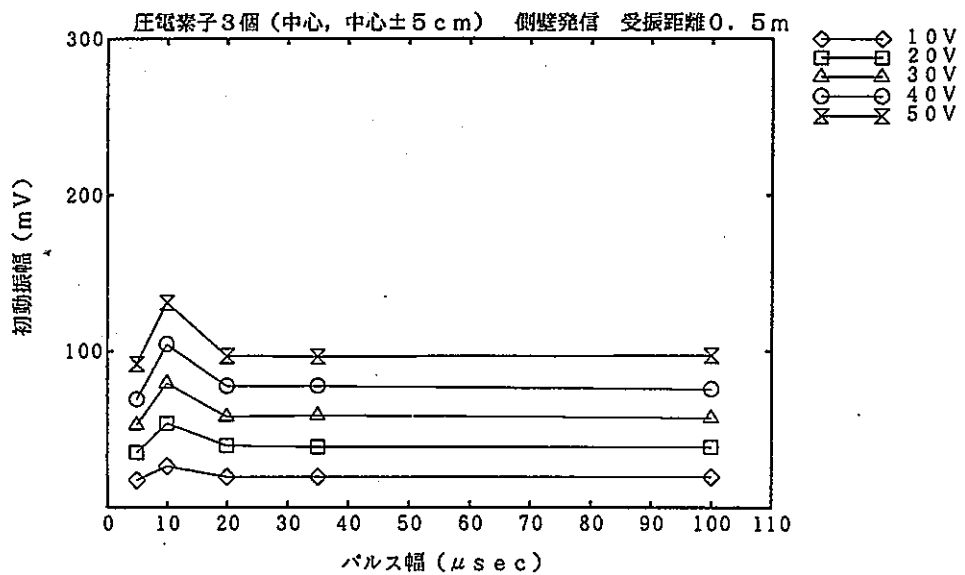


図-3.63 矩形パルス幅による初動振幅の変化

圧電素子3個（1個中央固定）側壁発振 受振距離0.5m パルス電圧30V パルス幅10 μ s

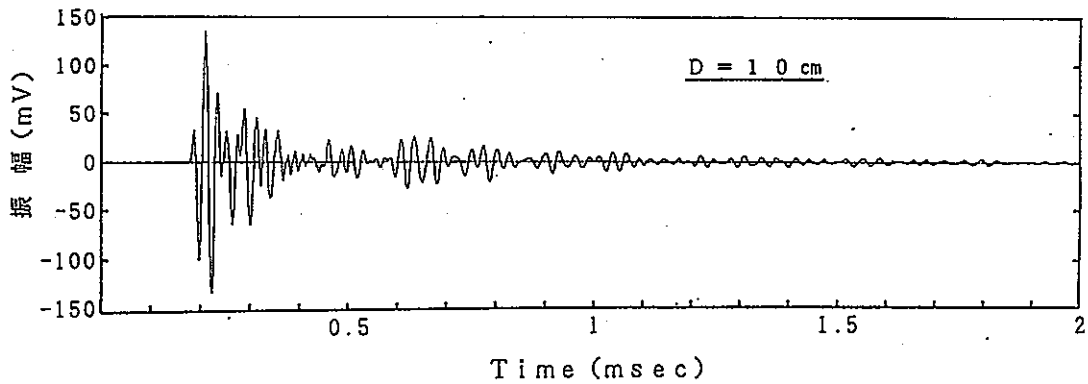
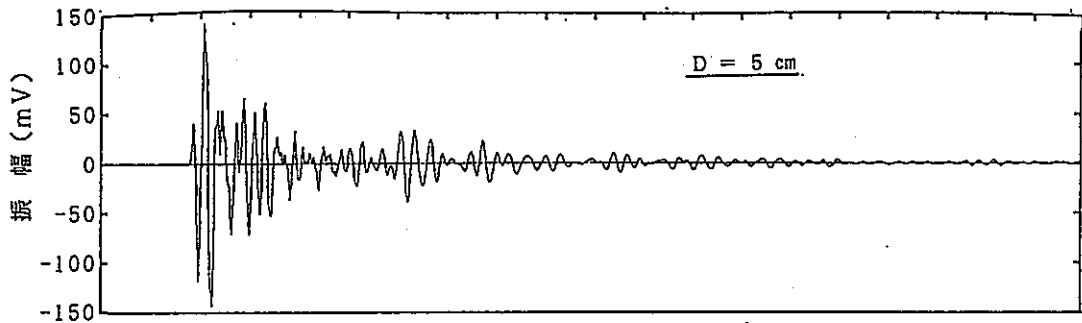
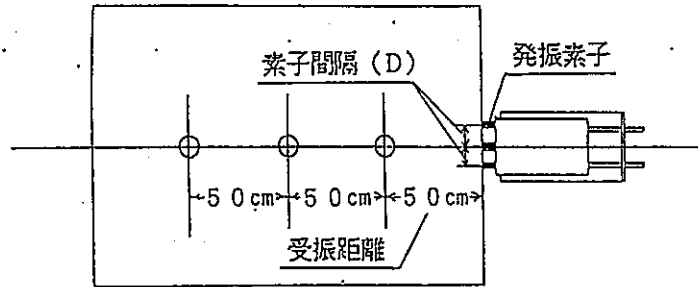


図-3.64 受振波動

これらの結果を素子間隔10cmの場合での結果である図-3.54（初動振幅の大きさ）、図-3.58（初動周波数）と比較すると、多少、素子間隔の小さい方が初動振幅が大きくなる傾向はあるものの、素子間隔による影響はほとんど受けていないことが分かる。

(4) 発振・受振点間距離の影響

圧電素子に与える電圧を30V、矩形パルス幅を $10\mu s$ で一定にし、発振・受振点間距離を50cm~1.5mの3段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.65
- ② 初動周波数 : 図-3.66
- ③ P波速度 : 図-3.67
- ④ 素子間隔10cmでの受振波動 : 図-3.68

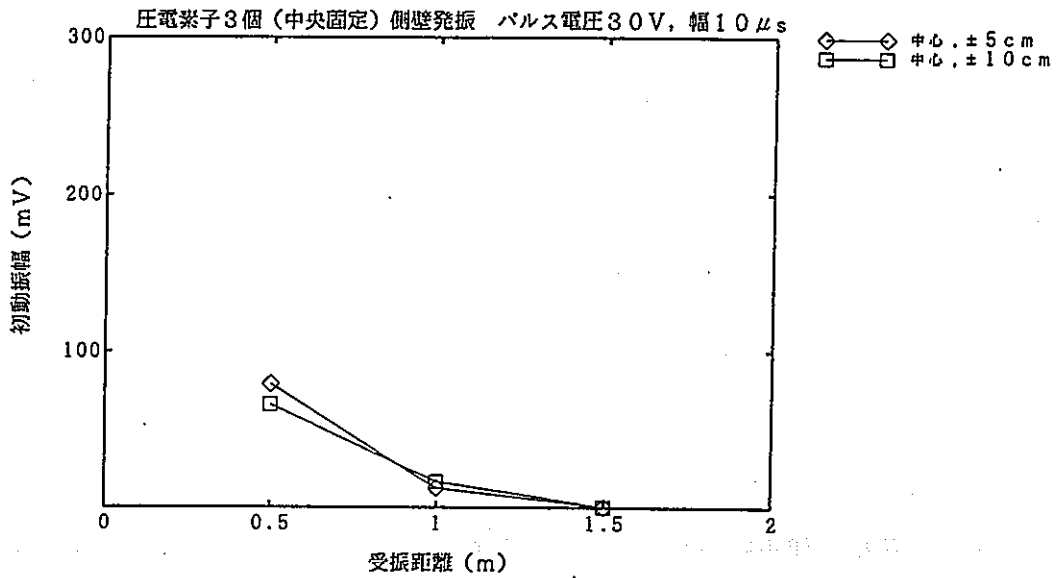


図-3.65 初動振幅の大きさ

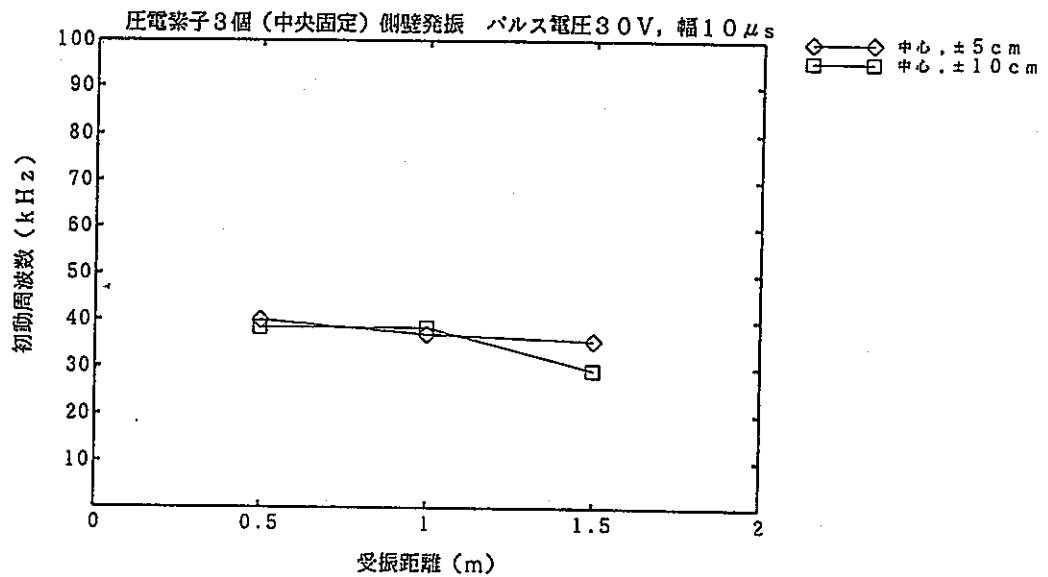


図-3.66 初動周波数

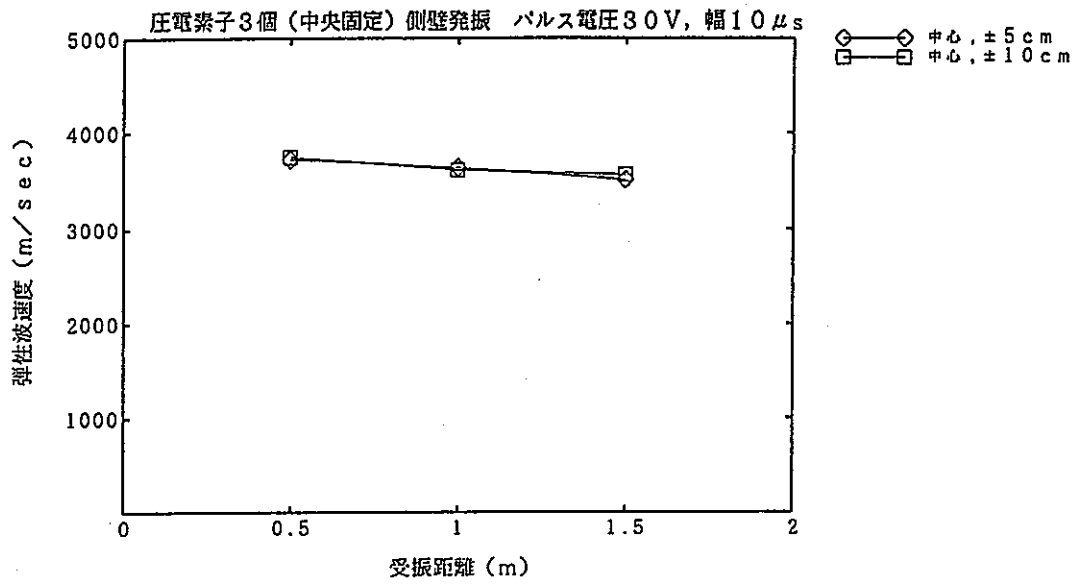


図-3.67 P波速度

発振・受振点間距離が大きくなると衝動振幅の大きさは小さくなっている。また、初動周波数は発振・受振点間距離が大きくなるにつれて40KHzから35KHz程度までわずかではあるが小さくなっている。一方、P波速度も同様に徐々に速度が遅くなる傾向がある。

圧電素子3個(1個中央固定)側壁発振 素子間隔5 cm パルス電圧30 V パルス幅10 μ s

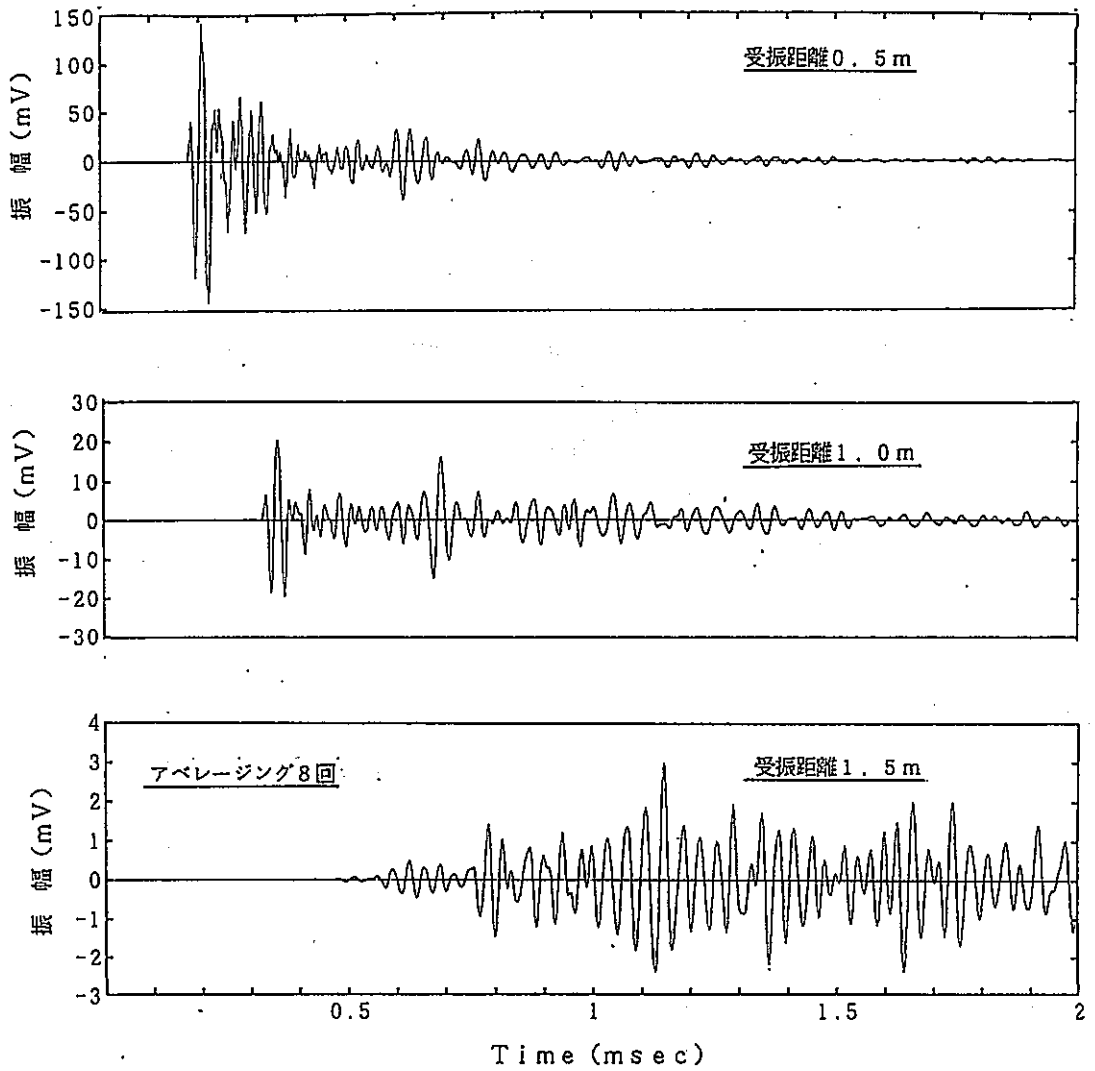
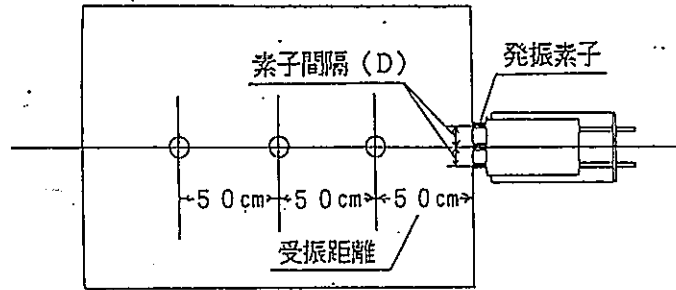


図-3.68 受振波動

3.5 実験5 (直列発振)

実験5では、図-3.69に示すように2個の圧電素子を直列に並べて発振源とし、発振点・受振点間距離の影響を測定した。測定結果一覧を表-3.5に示す。

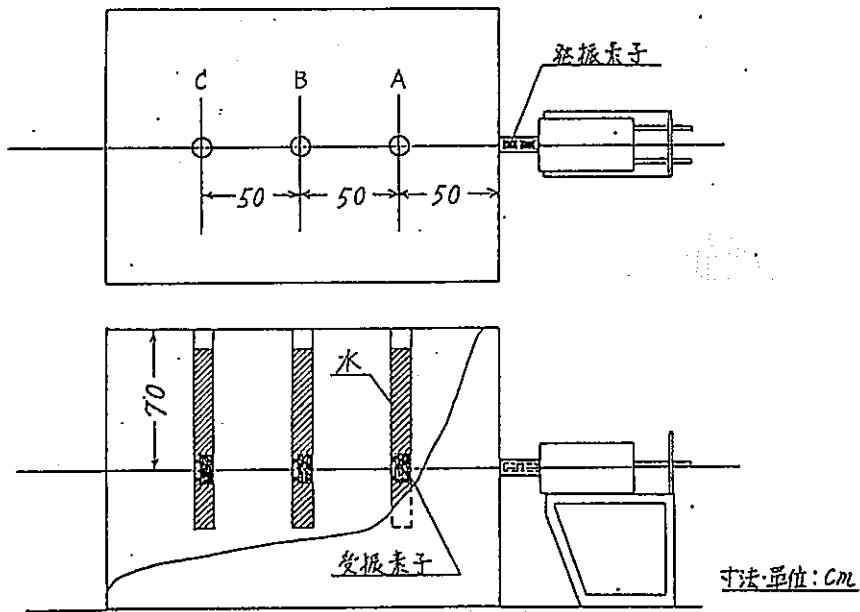


図-3.69 実験5の概要

表-3.5 測定結果一覧 (実験5)

5-1. パルス電圧30V, パルス幅10 μ s, 初動振幅 (mV)

		初期振幅(mV)
受振距離 (cm)	50	0.128
	100	0.039
	150	0.006

(1) 発振・受振点間距離の影響

圧電素子に与える電圧を30V、矩形パルス幅を $10\mu s$ で一定にし、発振・受振点間距離を50cm~1.5mの3段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-3.70
- ② 初動周波数 : 図-3.71
- ③ P波速度 : 図-3.72
- ④ 受振波動 : 図-3.73

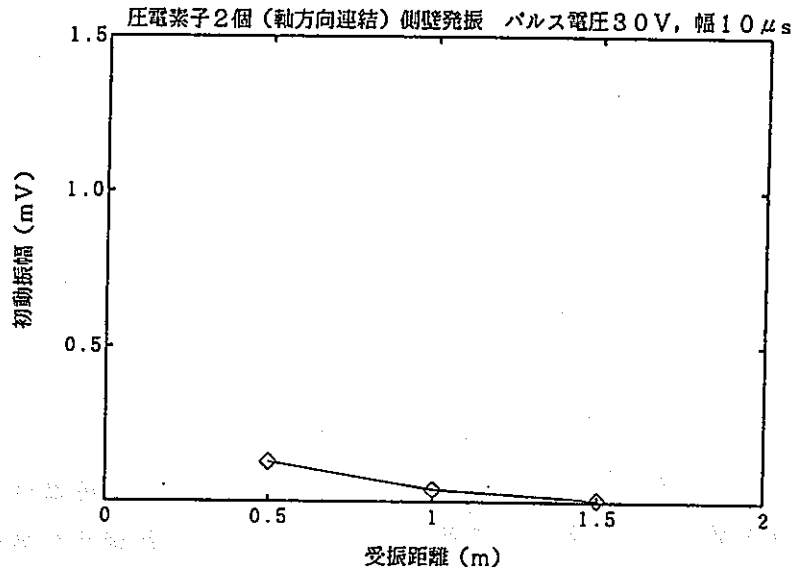


図-3.70 初動振幅の大きさ

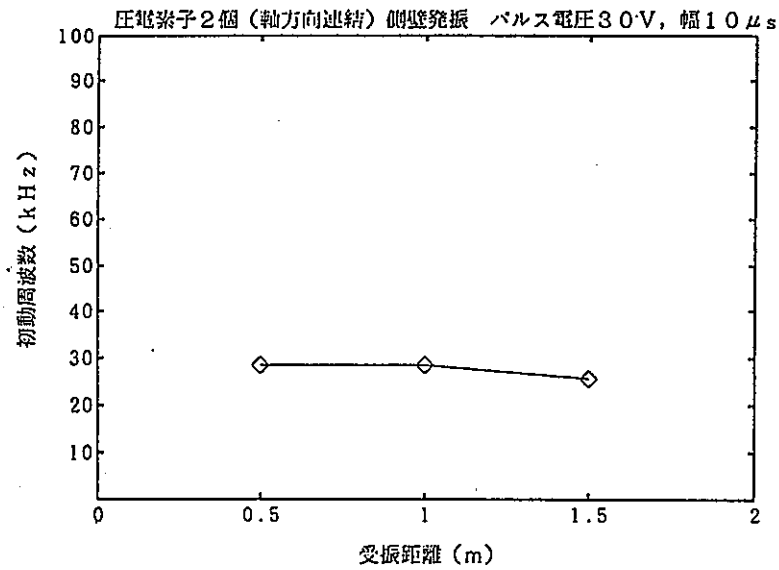


図-3.71 初動周波数

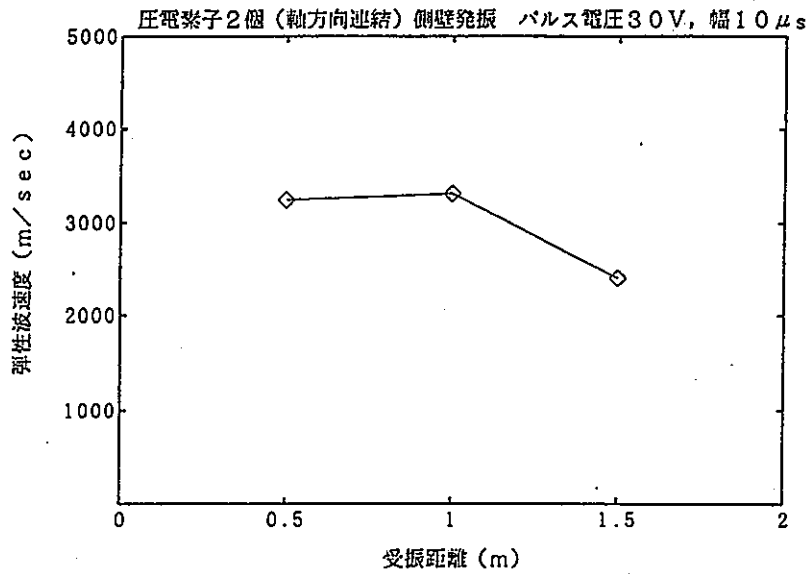


図-3.72 P波速度

初動振幅の大きさは発振・受振点間距離が大きくなるに伴い、直線的に小さくなっており、初動周波数も徐々に低くなる傾向にある。また、P波速度は発振・受振点間距離が50cm、1mの場合には、3200~3400m/sと、サンプル試料による超音波測定の結果(4100~4200m/s)よりかなり遅い数値であり、かつ、1.5mでは3000m/s以下の測定結果になっている。

圧電素子2個（軸方向連結） 側壁発振 パルス電圧30V パルス幅10 μ s

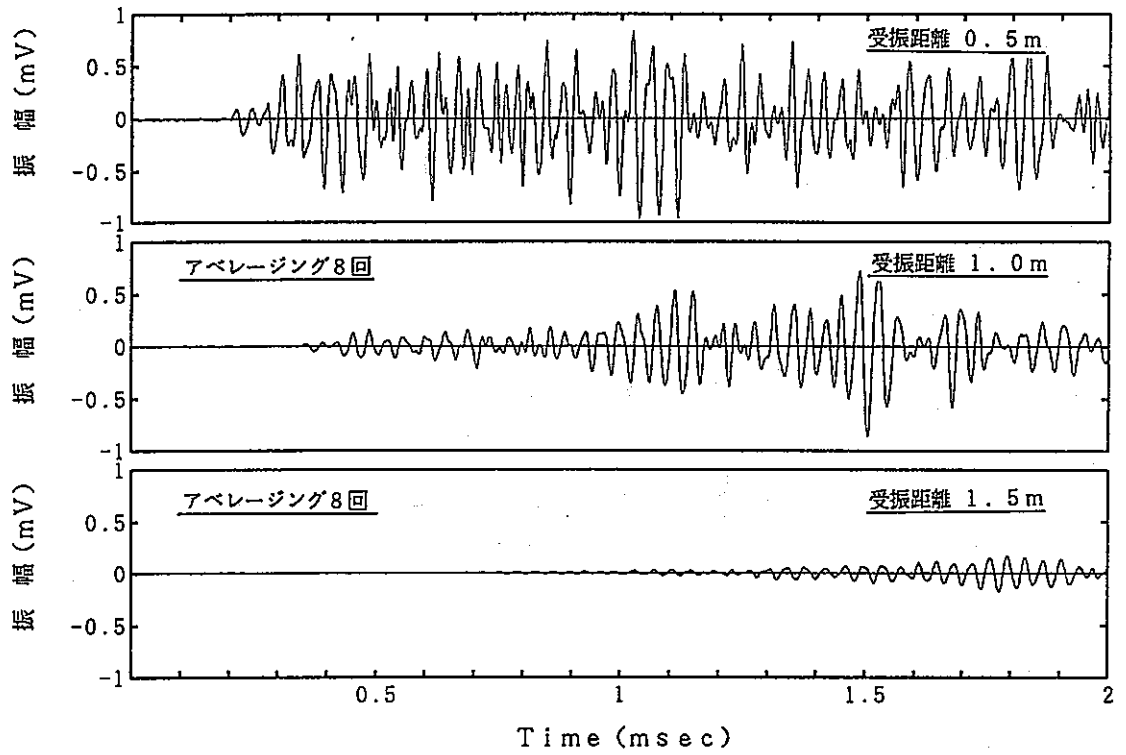
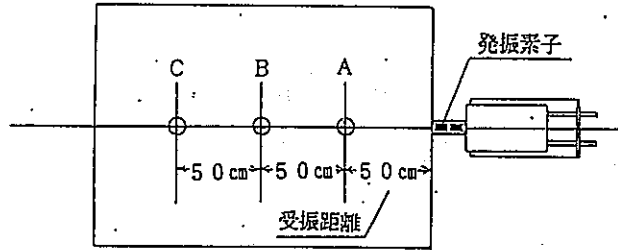


図-3.73 受振波動

4. 圧電アクチュエータによる周波数・振幅試験

圧電アクチュエータによる周波数・振幅試験では、前章で述べた圧電素子と同様に、発振源として1個を用いた場合（実験6）、2個あるいは3個を並列に用いた場合（実験7～9）、2個を直列に用いた場合（実験10）の測定を行った。

4.1 実験6（単体発振）

実験6は図-4.1に示すように、1個の圧電アクチュエータを発振源とし、A、B、C孔の3ヶ所で受振を行い、電圧、矩形パルス幅や発振・受振点間距離の影響を測定した。測定結果（初動振幅）一覧を表-4.1に示す。

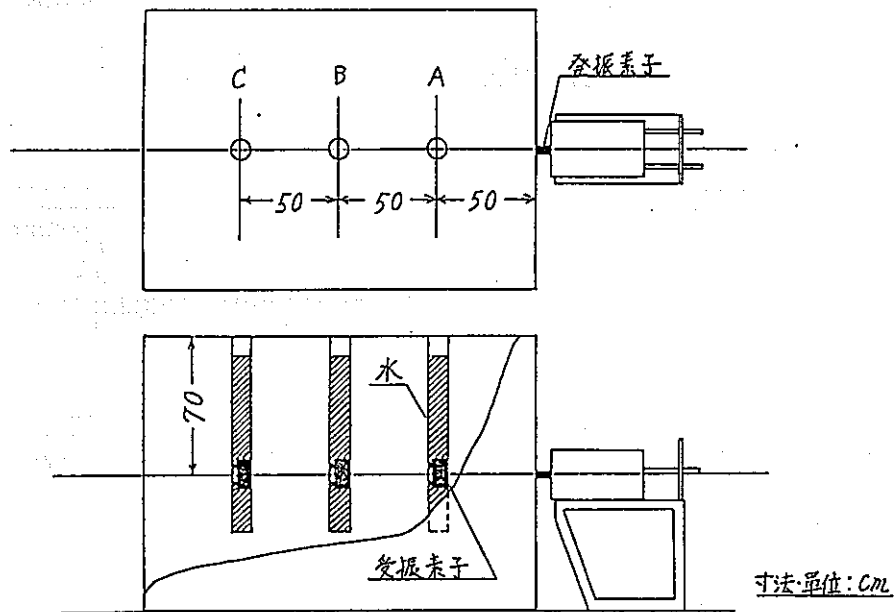


図-4.1 実験6の概要

表-4.1 測定結果一覧 (実験6)

6-1. 受振距離50cm (A孔), 初動振幅 (mV)

		電 圧 (V)				
		3	5	10	20	50
パ ル ス 幅 (μ s)	5	16.33	26.25	29.06	37.11	45.39
	10	25.94	41.88	40.08	45.78	47.42
	30	20.08	32.03	27.73	29.69	32.50
	60	20.47	32.73	28.20	29.92	32.81
	100	20.63	32.73	28.67	30.47	34.18

6-2. 受振距離100cm (B孔), 初動振幅 (mV)

		電 圧 (V)				
		3	5	10	20	50
パ ル ス 幅 (μ s)	5	3.48	5.56	6.75	8.32	10.00
	10	5.98	9.61	9.18	10.23	11.17
	30	4.45	7.15	6.25	6.60	7.27
	60	4.57	7.34	6.37	6.72	7.42
	100	4.53	7.54	6.37	6.91	7.58

6-3. 受振距離150cm (C孔)

		電 圧 (V)
		10
パ ル ス 幅 (μ s)	30	0.234

(1) 電圧の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、電圧を3V～50V間の5段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- | | |
|-------------------------|---------|
| ①初動振幅の大きさ | : 図-4.2 |
| ②初動周波数 | : 図-4.3 |
| ③初動周波数 | : 図-4.4 |
| ④矩形パルス幅30 μ sでの受振波動 | : 図-4.5 |

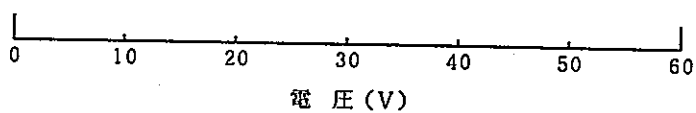


図-4.3 初動周波数

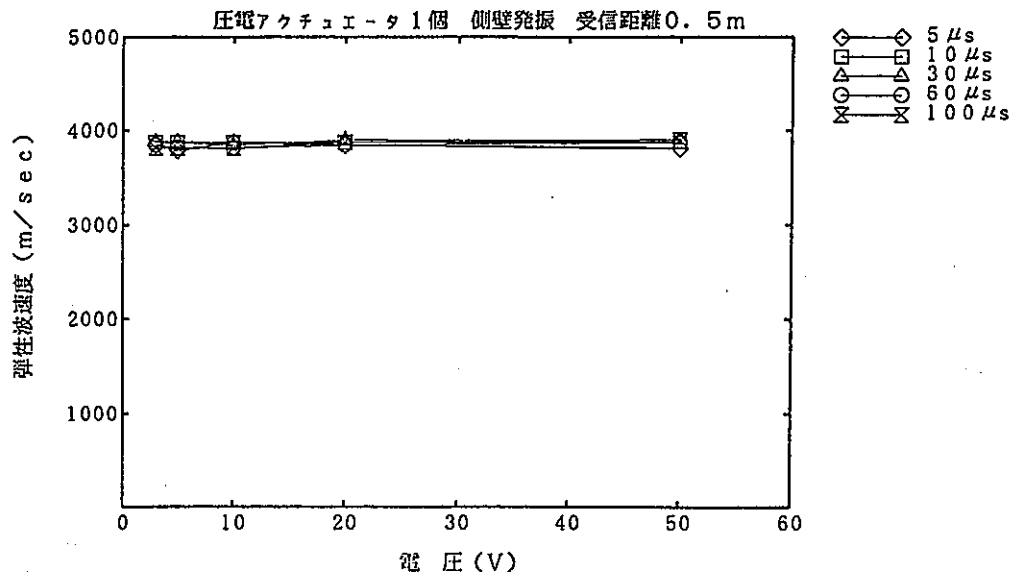


図-4.4 P波速度

電圧が5V～20V間では、電圧が大きい方が初動振幅の大きさが大きくなる傾向にあるが、20V以上では電圧によらず一定状態である。また、初動周波数は電圧が5Vの場合には30kHz～40kHz程度と高いが、電圧10Vでは20kHz～30kHzと周波数が低くなり、20V以上では30kHz程度で一定である。一方、P波速度は電圧の大きさによらず3900m/s程度で一定である。

圧電アクチュエータ1個 側壁発振 受振距離0.5 m パルス幅30 μ s

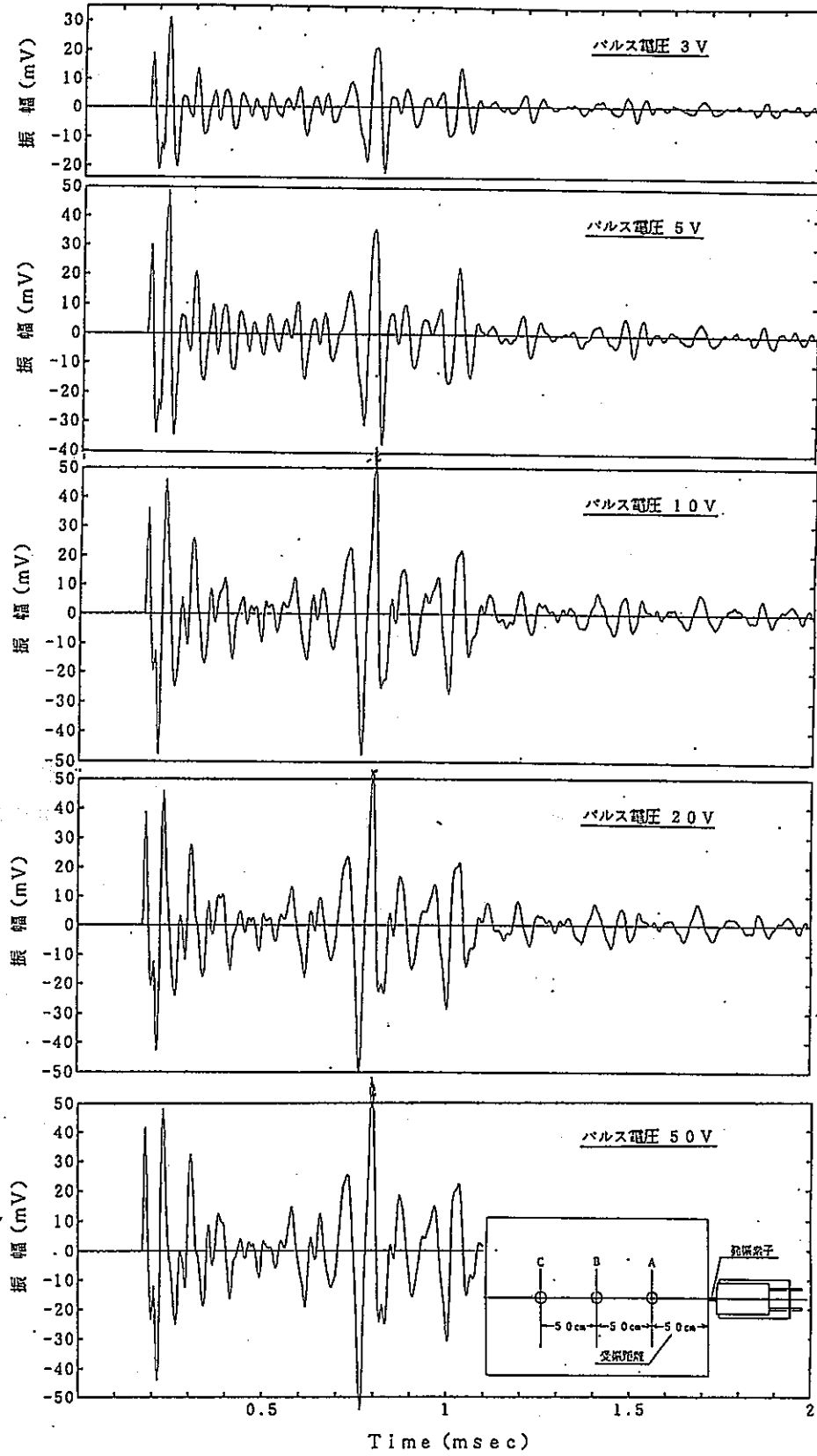


図-4.5 受振波動

(2) 矩形パルス幅の影響

電圧の場合と同様に、A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、矩形パルス幅を $5\mu s \sim 100\mu s$ 間の5段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-4.6
- ② 初動周波数 : 図-4.7
- ③ P波速度 : 図-4.8
- ④ 電圧10Vでの受振波動 : 図-4.9

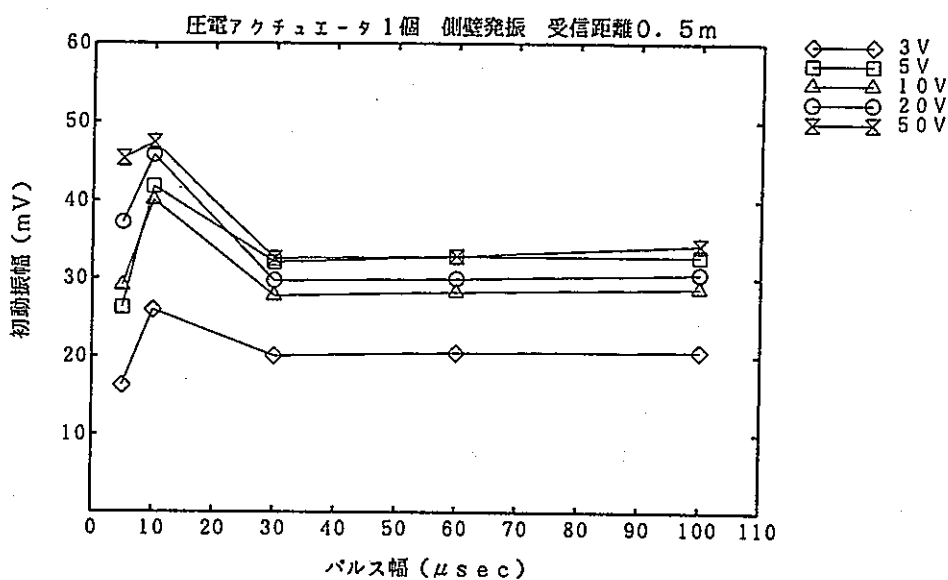


図-4.6 初動振幅の大きさ

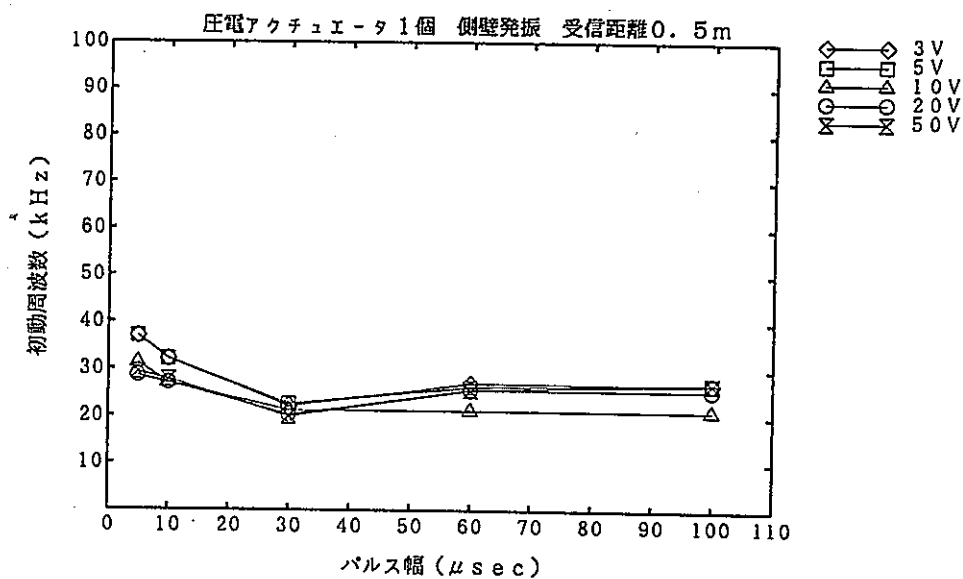


図-4.7 初動周波数

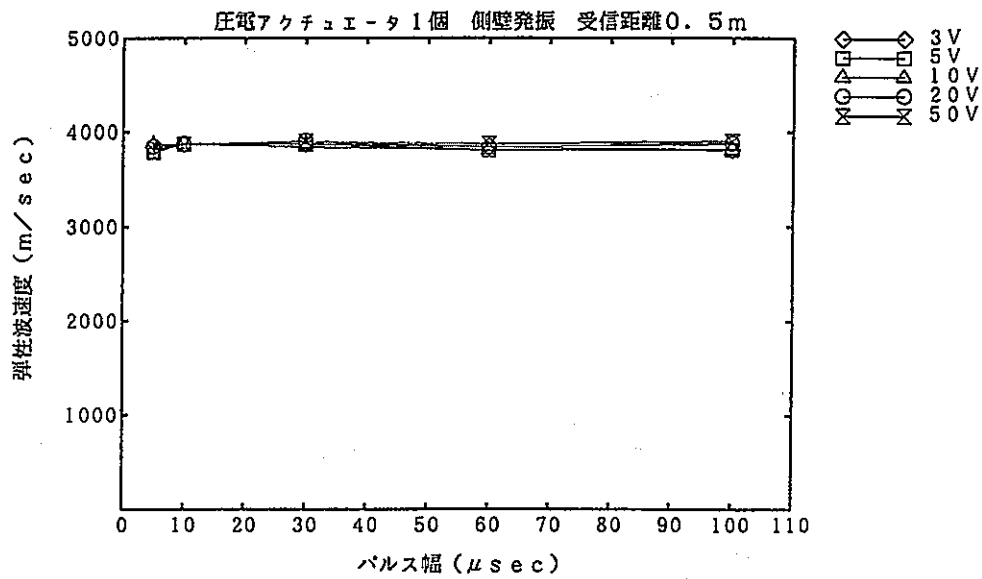


図-4.8 P波速度

初動振幅の大きさは矩形パルス幅が $10\mu s$ の場合に最も大きくなるが、 $30\mu s$ 以上では一定である。また、初動周波数は矩形パルス幅が小さい場合にやや高くなる傾向にあり、 $60\mu s$ 以上では一定である。一方、P波速度は矩形パルス幅にかかわらず $3900m/s$ 程度で一定である。

圧電アクチュエータ1個 射撃発振 受振距離0.5m パルス電圧10V

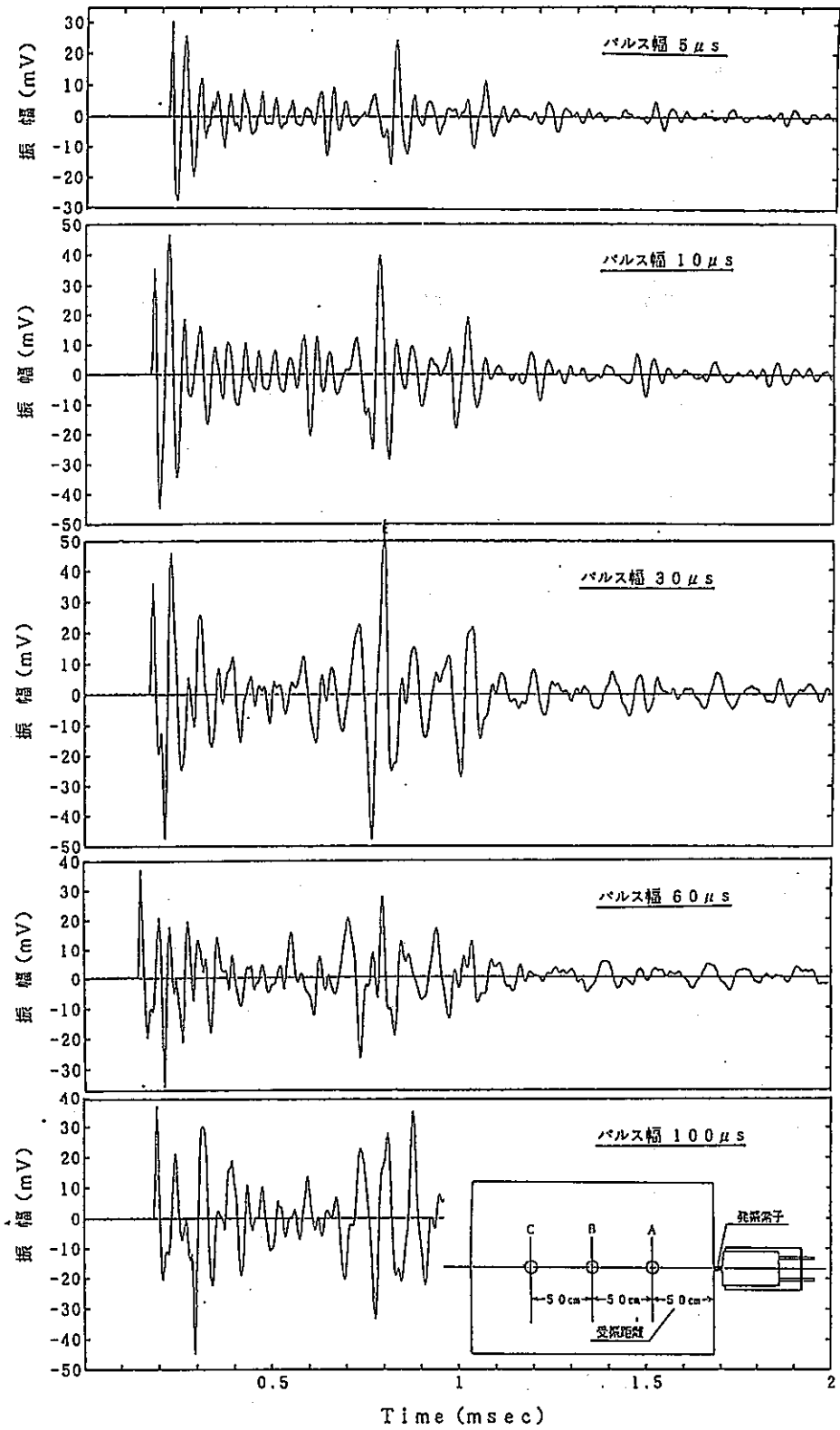


図-4.9 受振波動

(3) 発振・受振点間距離の影響

電圧を10V、矩形パルス幅を $30\mu\text{s}$ で一定にし、発振・受振点間距離を50cm~1.5mの3段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- | | |
|------------|----------|
| ① 初動振幅の大きさ | : 図-4.10 |
| ② 初動周波数 | : 図-4.11 |
| ③ P波速度 | : 図-4.12 |
| ④ 受振波動 | : 図-4.13 |

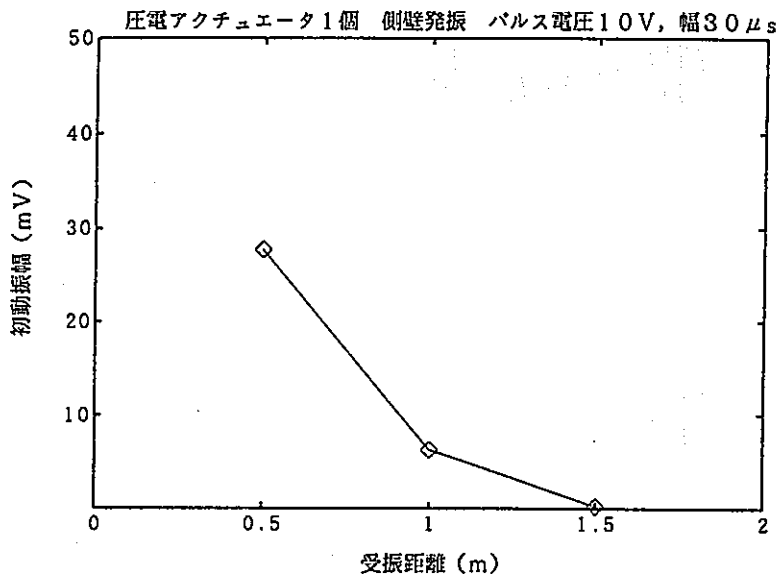


図-4.10 初動振幅の大きさ

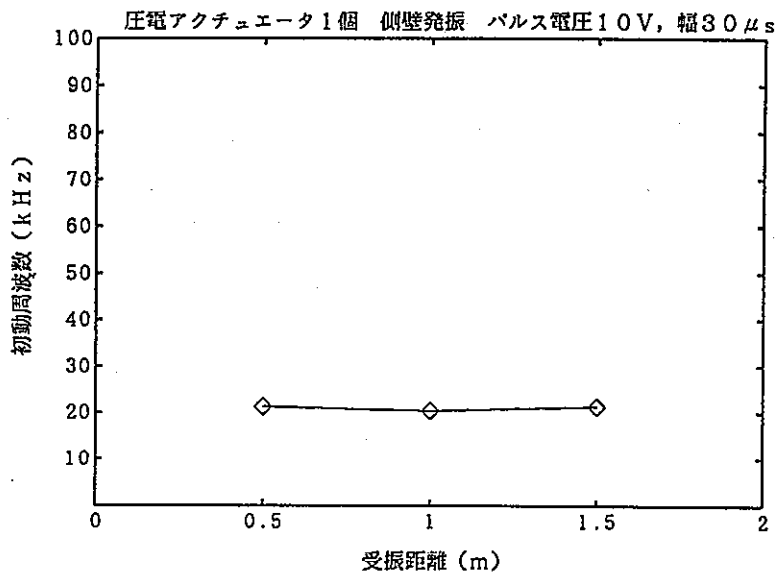


図-4.11 初動周波数

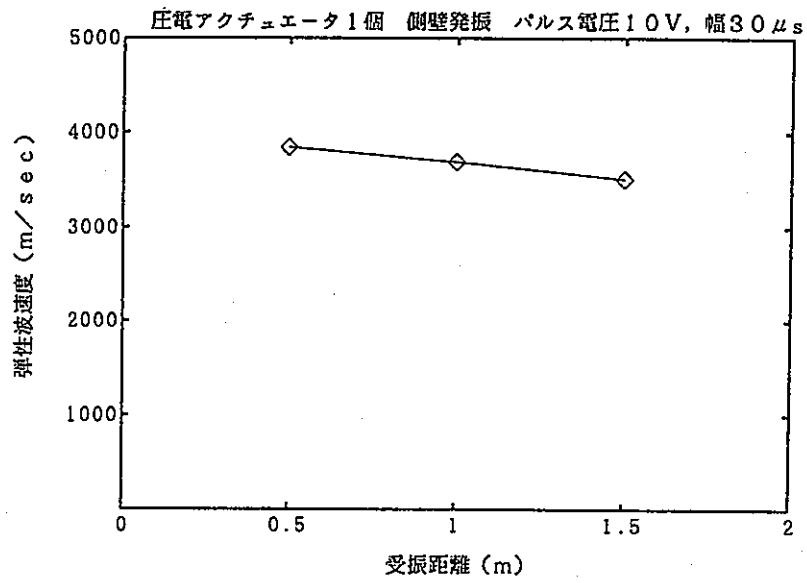


図-4.12 P波速度

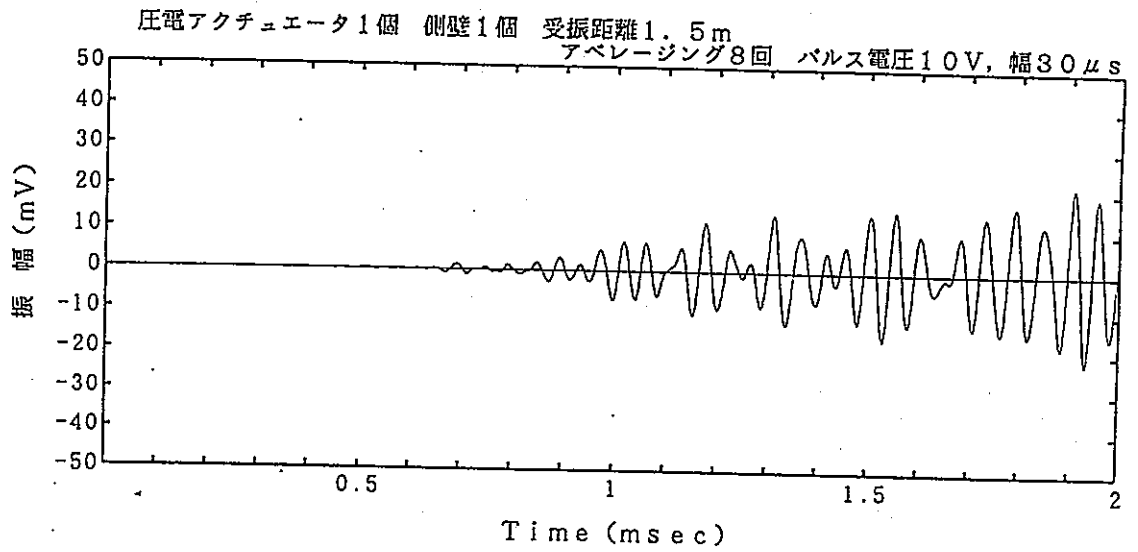


図-4.13 受振波動

初動振幅の大きさは発振・受振点間距離が大きくなるに伴い、振幅が小さくなるが、初動周波数は、20KHz程度で一定である。また、発振受振点間距離が大きくなるに伴い、P波速度が遅くなっている。

4.2 実験7（並列発振、中央固定）

実験7では図-4.14 に示すように、2個の圧電アクチュエータを並列に並べて発振源とし、素子間隔や発振・受振点間距離の影響を測定した。このとき、1個の圧電アクチュエータは3孔の直線上に配置し、他方bは直線上からずらした配置とした（中央固定と呼ぶ）。測定結果一覧を表-4.2に示す。

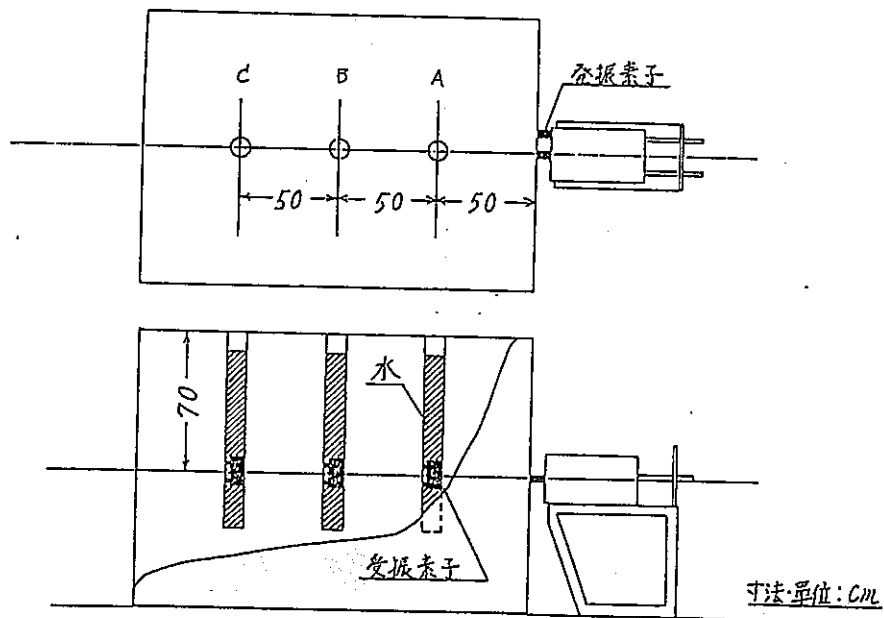


図-4.14 実験7の概要

表-4.2 測定結果一覧（実験7）

7-1. パルス電圧10V, パルス幅30 μ s, 初動振幅(mV)

		圧電素子2個間の距離 (cm)				圧電素子1個の中心からの距離 (cm)				
		5	10	15	20	0	5	10	15	20
受振距離 (cm)	50	42.97	33.01	20.31	15.86	50.78	39.84	24.80	20.70	15.16
	100	13.87	13.59	10.16	10.94	15.04	12.30	11.52	10.35	7.50
	150	0.188	0.172	0.094	0.137	0.234	0.156	0.195	0.156	0.117

(1) 素子間隔の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、電圧を10V、矩形パルス幅30 μ sに固定し、2個の圧電アクチュエータ間隔を5cm~20cmの4段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-4.15
- ② 初動周波数 : 図-4.16
- ③ P波速度 : 図-4.17
- ④ 受振波動 : 図-4.18

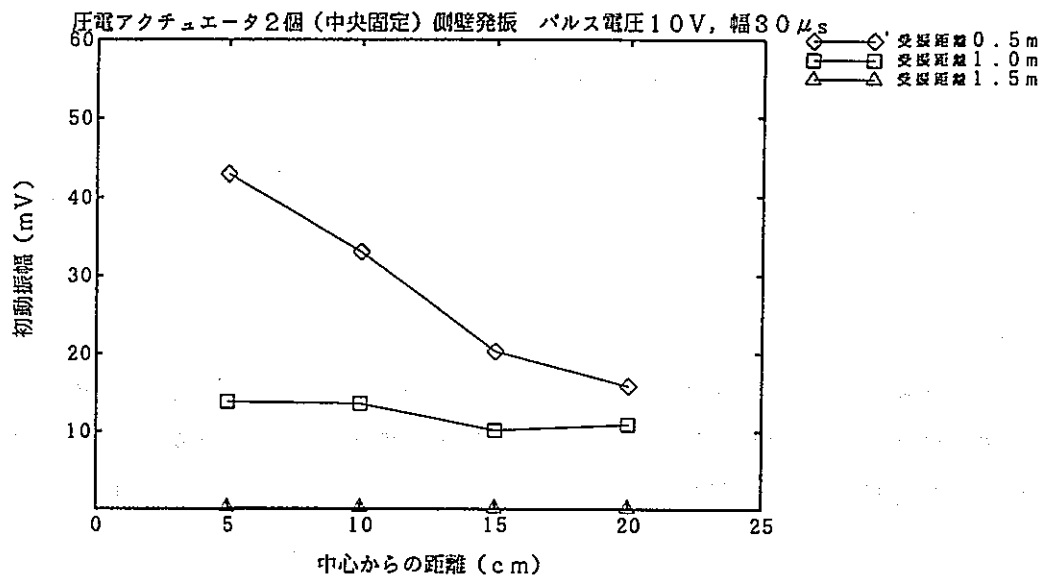


図-4.15 初動振幅の大きさ

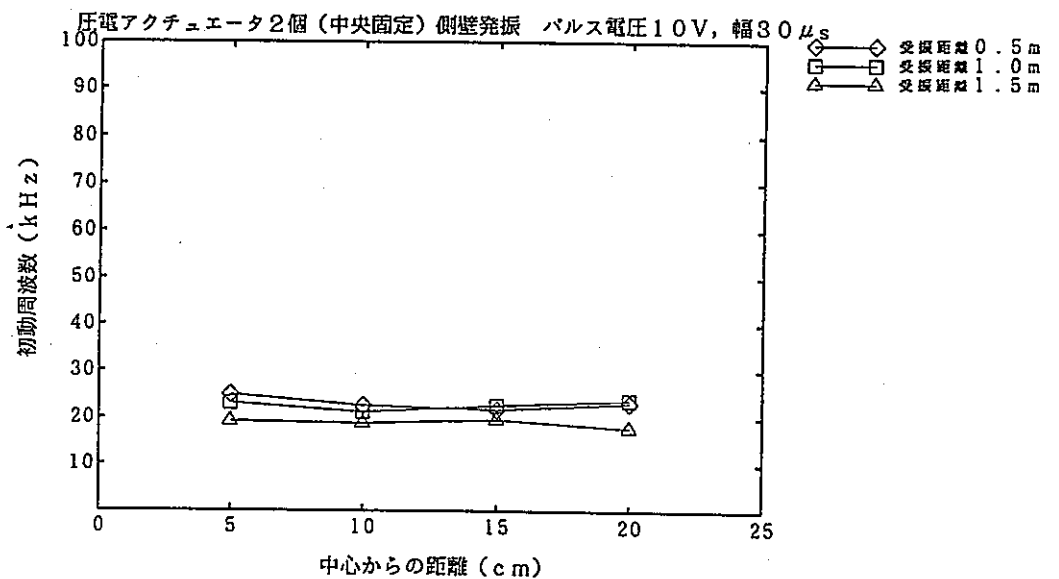


図-4.16 初動周波数

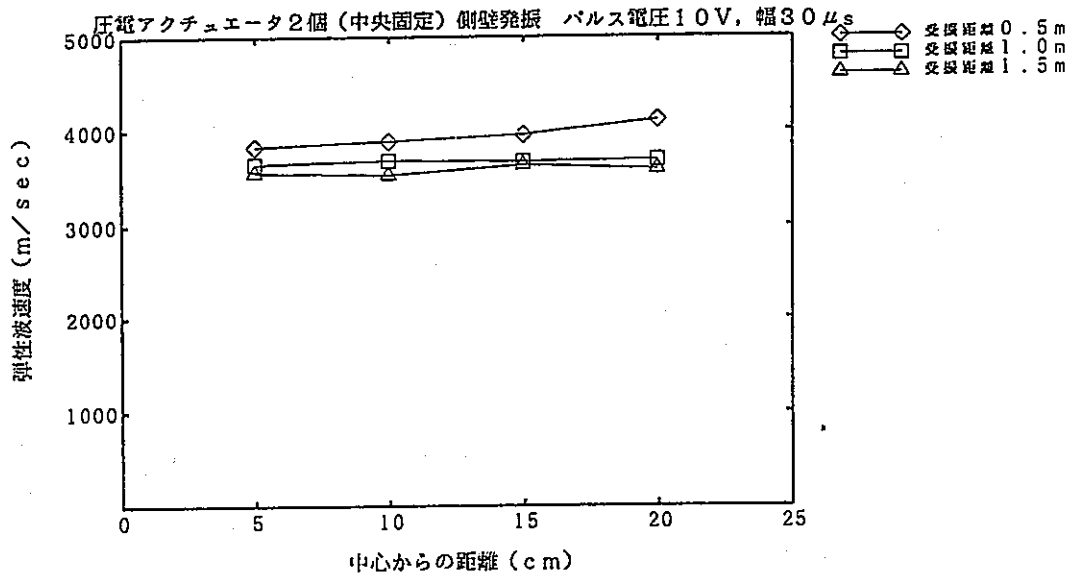


図-4.17 P波速度

初動振幅の大きさは素子間隔が大きくなると振幅が小さくなる傾向にあるが、この傾向は特に発振・受振点間距離の小さい場合に顕著である。初動周波数は20KHz~30KHz程度で、素子間隔による影響はほとんど受けていない。また、P波速度では、発振・受振点間距離50cmの場合に素子間隔が大きくなるに伴い、速度が速くなる傾向があるが、他の場合には、素子間隔にかかわり無く一定である。

圧電アクチュエータ2個(1個中央固定)側壁発振 受振距離0.5m パルス電圧10V パルス幅30 μ s

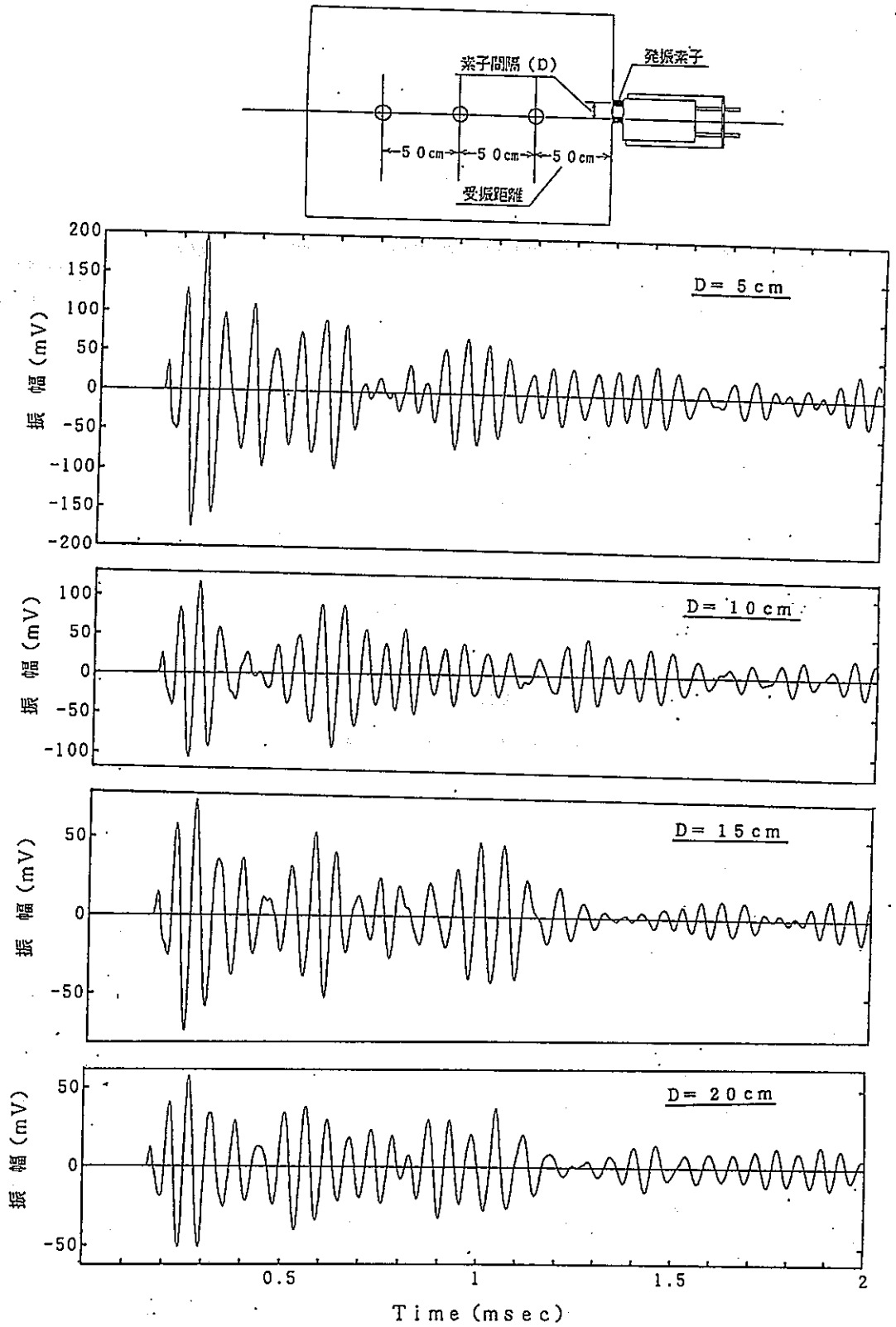


図-4.18 受振波動

(2) 発振・受振点間距離の影響

電圧を10V、矩形パルス幅を30 μ sで一定にし、発振・受振点間距離を50cm~1.5mの3段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-4.19
- ② 初動周波数 : 図-4.20
- ③ P波速度 : 図-4.21
- ④ 素子間隔5cmの場合の受振波動 : 図-4.22

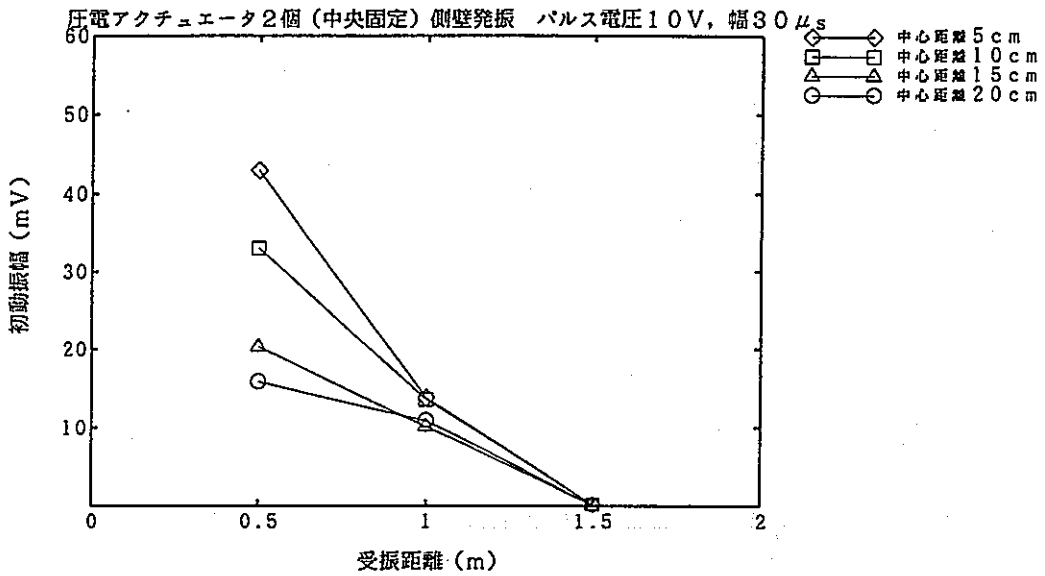


図-4.19 初動振幅の大きさ

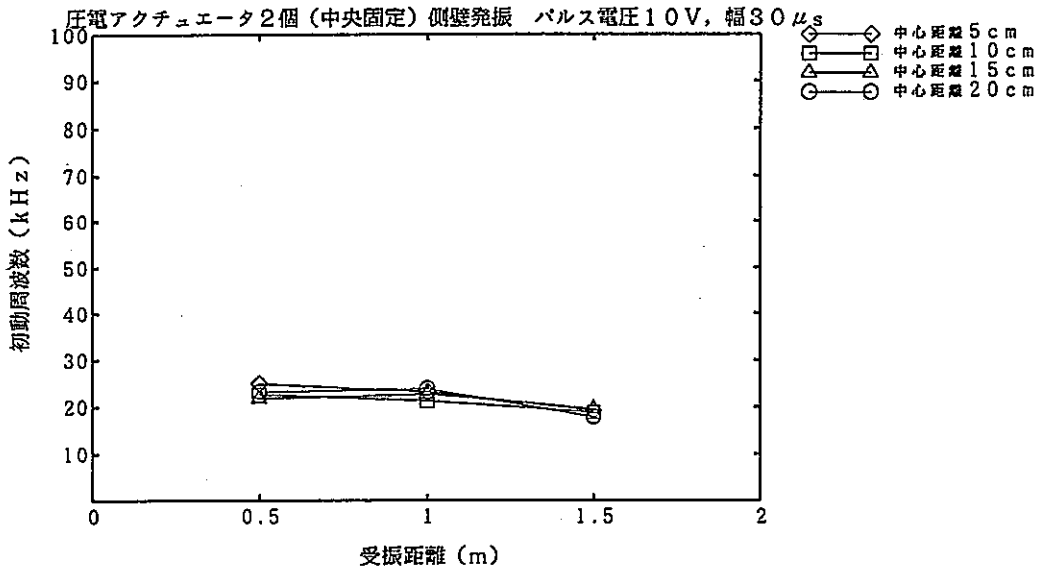


図-4.20 初動周波数

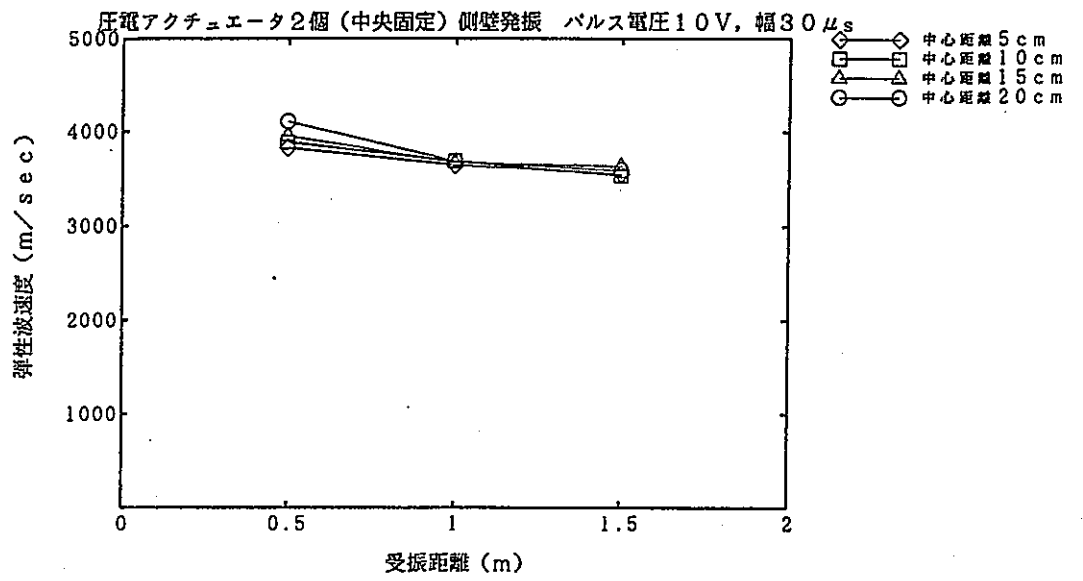


図-4.21 P波速度

初動振幅の大きさは発振・受振点間距離が大きくなるに伴い、振幅が小さくなり、初動周波数も、わずかではあるが低くなる傾向にある。また、発振受振点間距離が大きくなるに伴い、P波速度が遅くなっている。

圧電アクチュエータ2個(1個中央固定) 側壁発振 索子間隔5 cm パルス電圧10 V パルス幅30 μ s

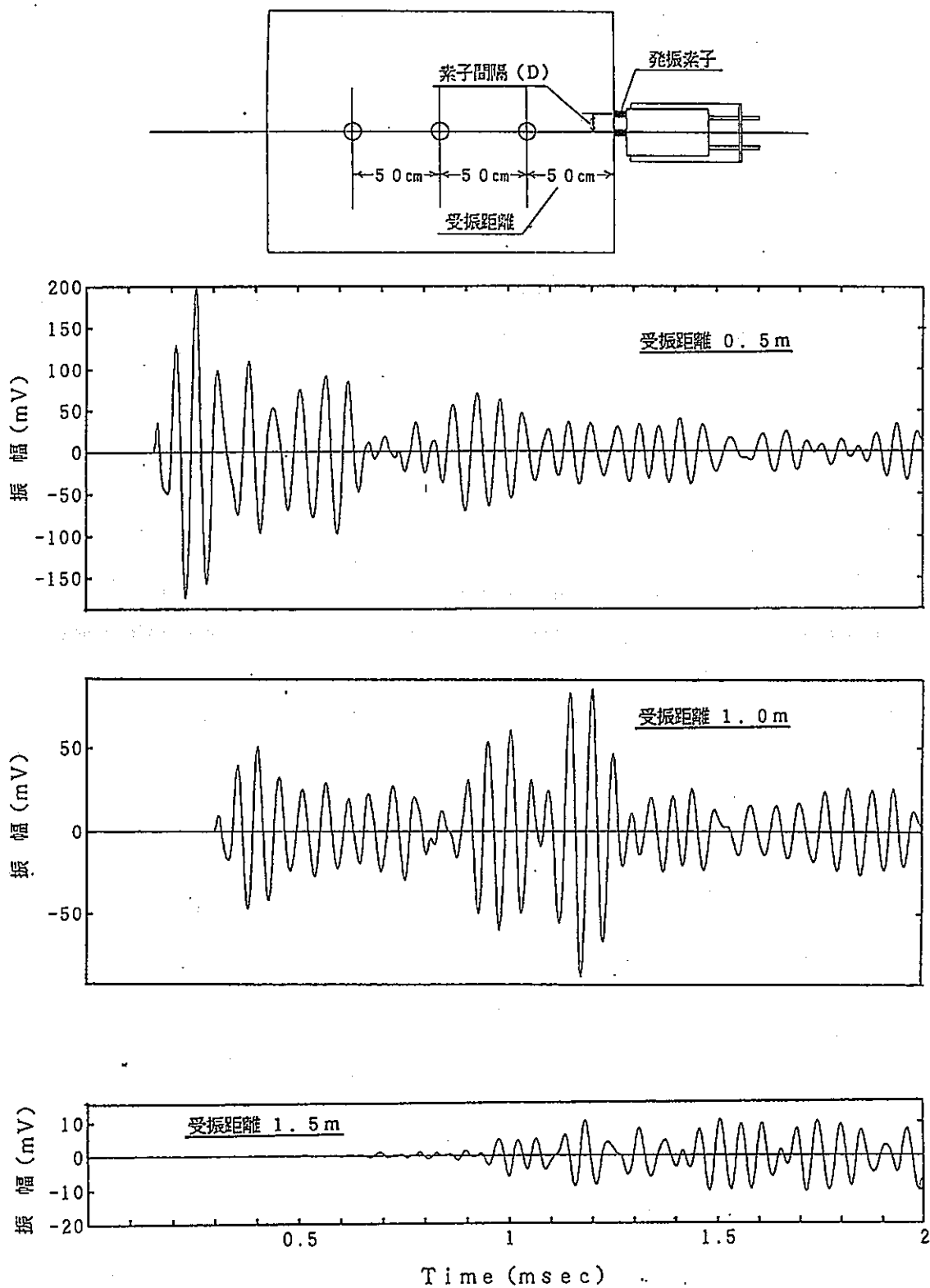


図-4.22 受振波動

4.3 実験8（並列発振、中央振り分け）

実験8は実験7と同様に、2個の圧電アクチュエータを並列に並べて発振源とし、素子間隔および発振・受振点間距離の影響を測定した。圧電アクチュエータの配置は図-4.23に示すように、素子間の中央部を3孔の直線上に配置した（中央振り分けと呼ぶ）。測定結果一覧を表-4.3に示す。

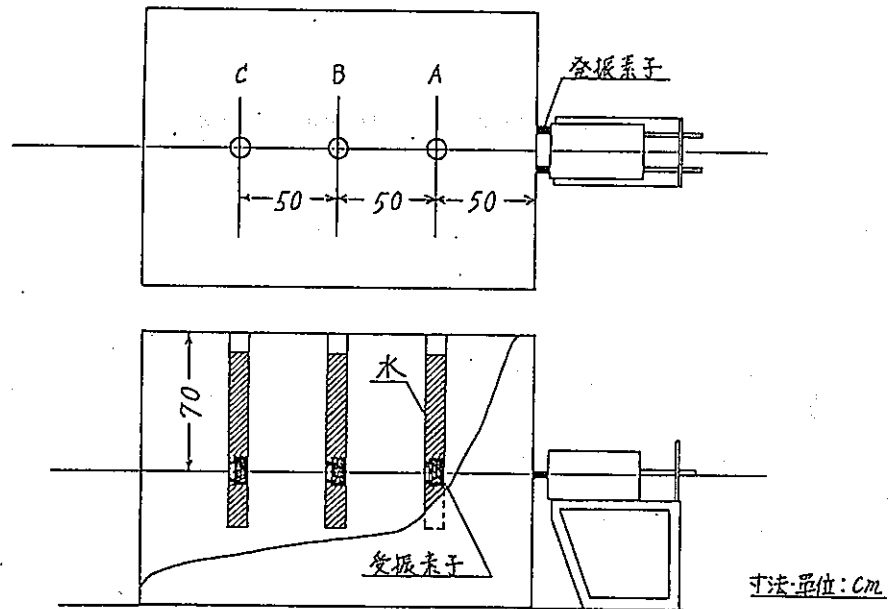


図-4.23 実験8の概要

表-4.3 測定結果一覧（実験8）

8-1. パルス電圧10V, パルス幅30 μ s, 初動振幅(mV)

		圧電素子2個間の距離 (cm)				圧電素子1個の中心からの距離 (cm)				
		5	10	15	20	0	2.5	5.0	7.5	10.0
受振距離 (cm)	50	26.76	34.38	24.61	30.66	50.7	28.32	39.84	19.92	24.80
	100	11.25	10.94	10.23	12.11	15.04	10.55	12.30	8.20	11.52
	150	0.141	0.141	0.141	0.141	0.234	0.109	0.156	0.109	0.195

(1) 素子間隔の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、電圧を10V、矩形パルス幅30 μ sに固定し、2個の素子間隔を5cm~20cmの4段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-4.24
- ② 初動周波数 : 図-4.25
- ③ P波速度 : 図-4.26
- ④ 受振波動 : 図-4.27

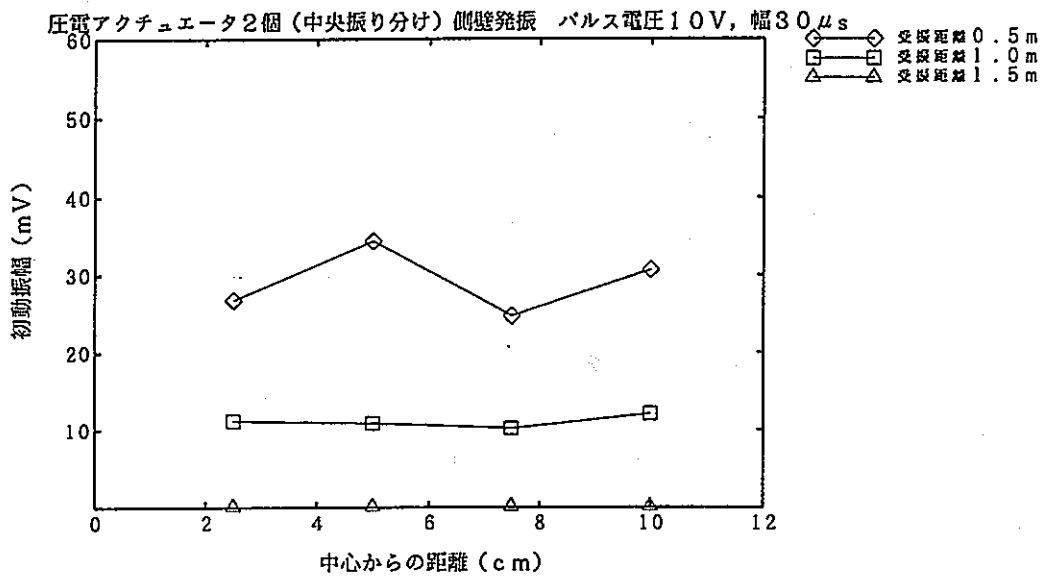


図-4.24 初動振幅の大きさ

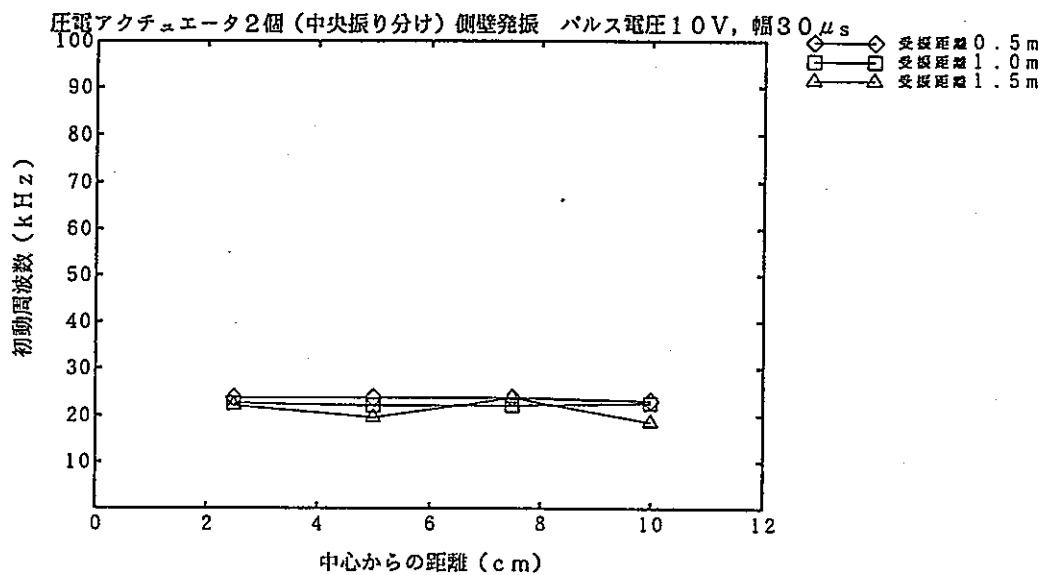


図-4.25 初動周波数

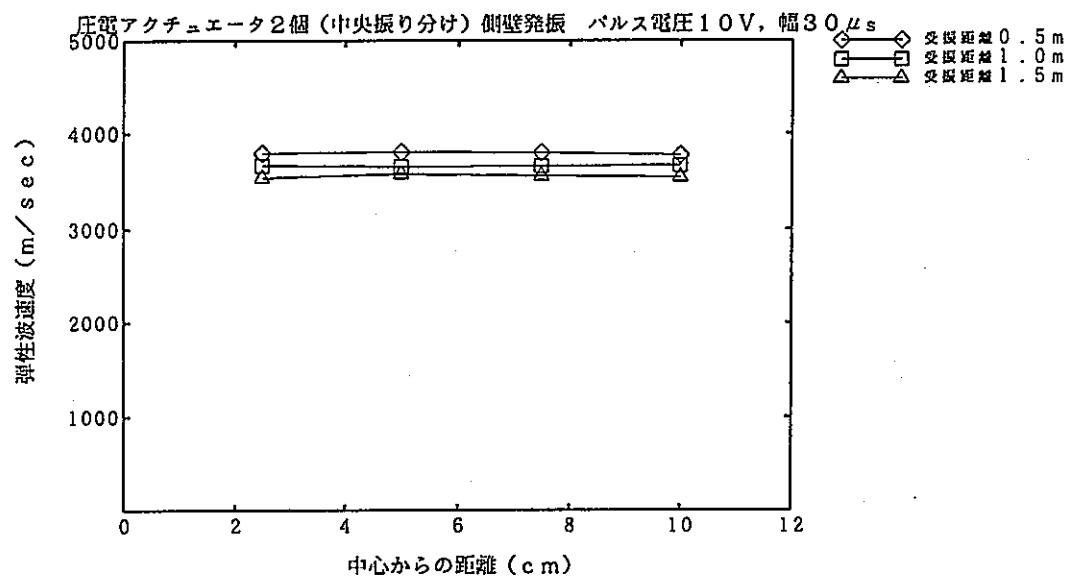


図-4.26 P波速度

初動振幅の大きさは発振・受振点間距離50cmの場合に多少のバラツキがあるものの、他の場合には素子間隔による影響はほとんど受けていない。また、初動周波数、P波速度ともに素子間隔にかかわらず、一定である。

圧電アクチュエータ2個（中心振り分け）側壁発振 受振距離0.5m パルス電圧10V パルス幅30 μ s

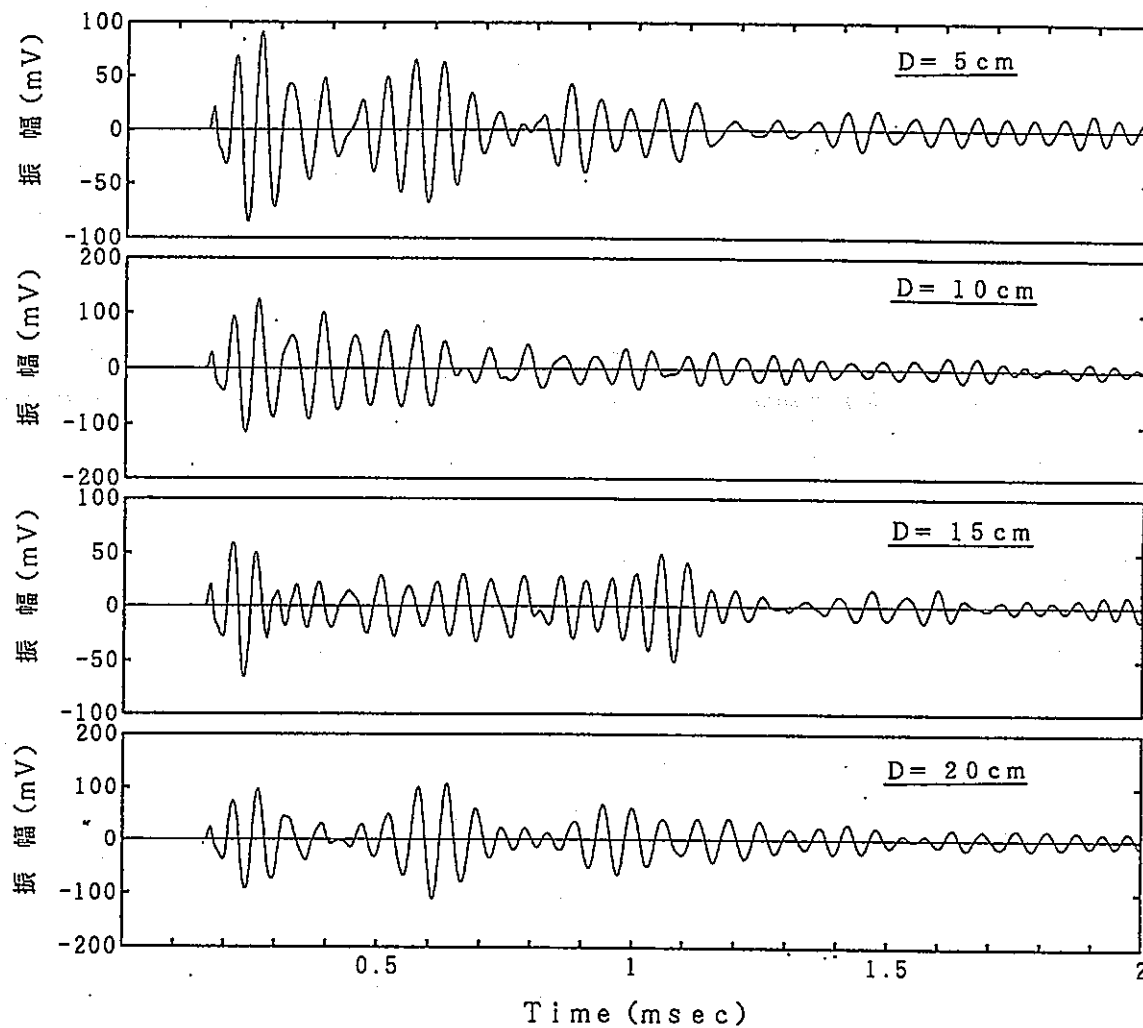
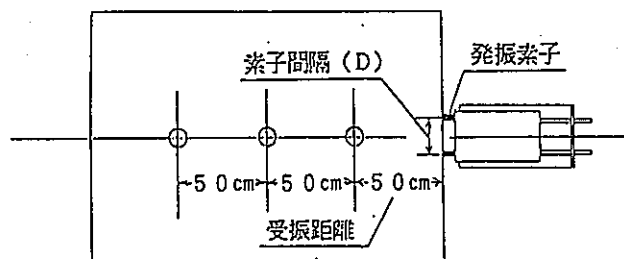


図-4.27 受振波動

(2) 発振・受振点間距離の影響

電圧10V、矩形パルス幅 $30\mu s$ で一定にし、発振・受振点間距離を50cm~1.5mの3段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-4.28
- ② 初動周波数 : 図-4.29
- ③ P波速度 : 図-4.30
- ④ 素子間隔5cmの場合の受振波動 : 図-4.31

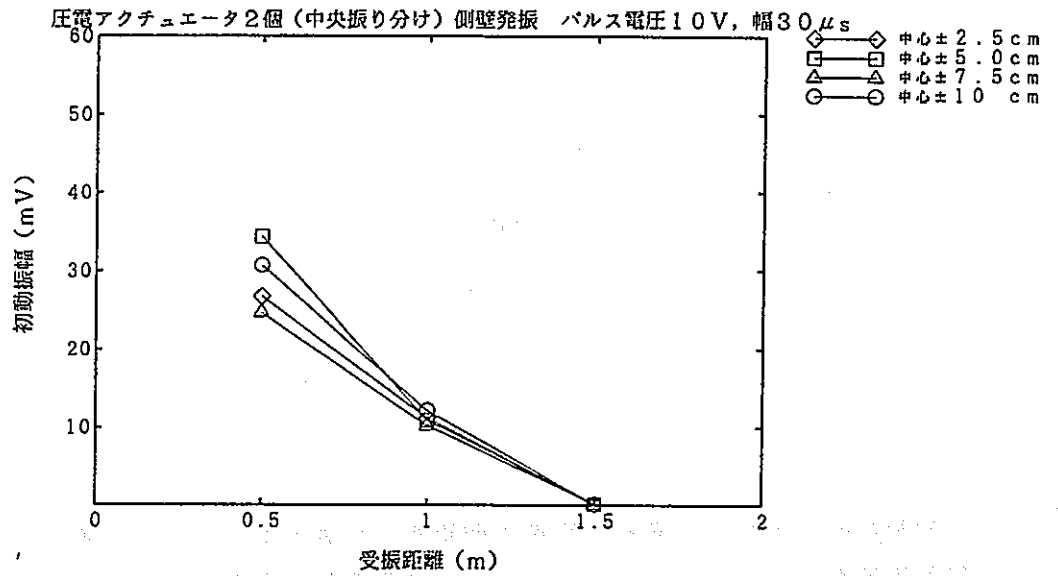


図-4.28 初動振幅の大きさ

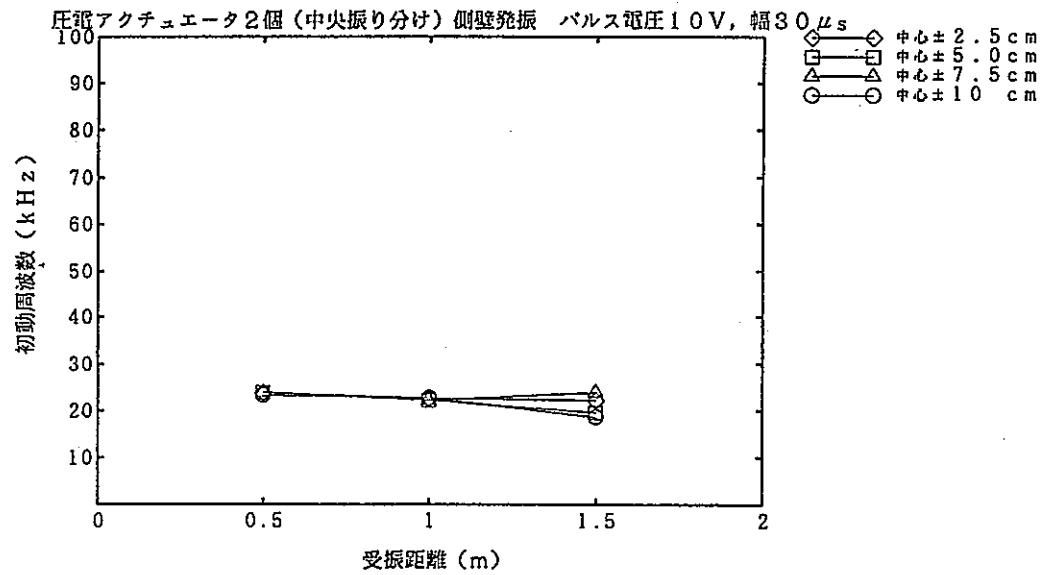


図-4.29 初動周波数

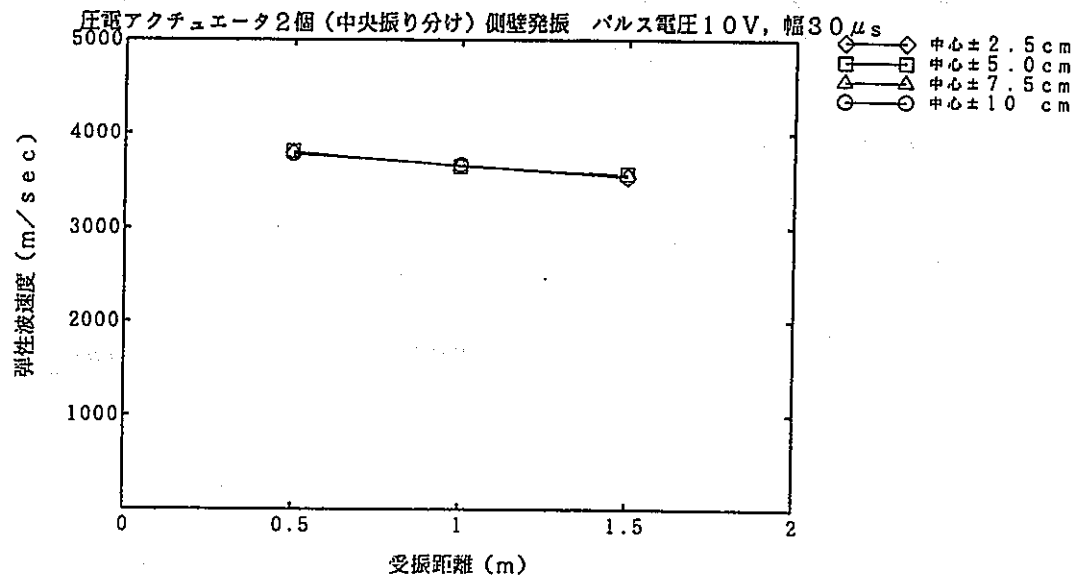


図-4.30 P波速度

初動振幅の大きさは発振・受振点間距離が大きくなるに伴い、振幅が小さくなるが、初動周波数は、ほぼ一定である。また、発振受振点間距離が大きくなるに伴い、P波速度が遅くなっている。

圧電アクチュエータ2個（中心振り分け）側壁発振 索子間隔5 cm パルス電圧10 V パルス幅30 μ s

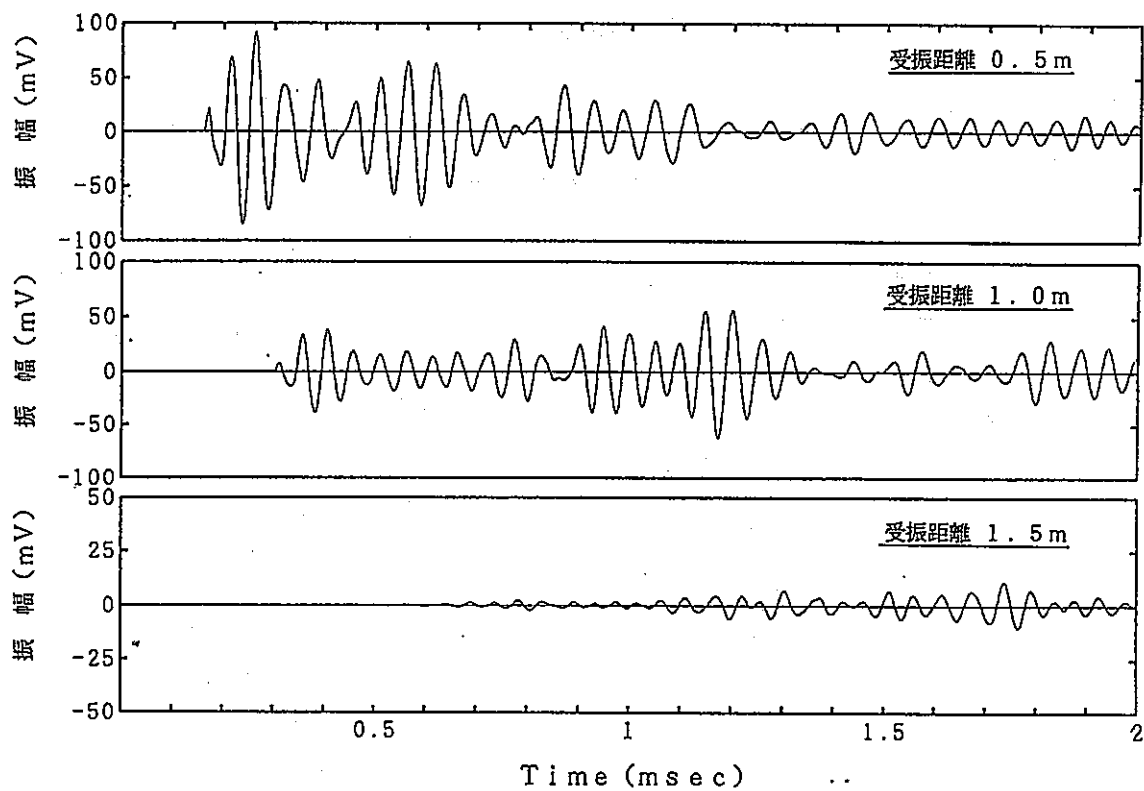
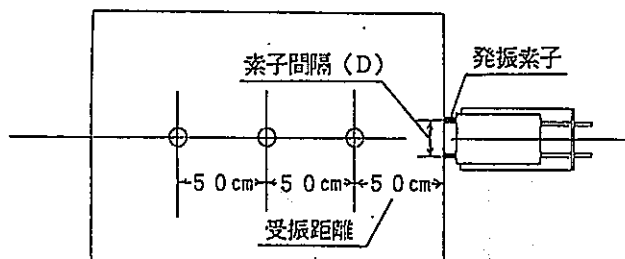


図-4.31 受振波動

4.4 実験9（並列発振）

実験9では図-4.32に示すように、3個の圧電アクチュエータを並列に並べて発振源とし、素子間隔および発振・受振点間距離の影響を測定した。測定結果一覧を表-4.4に示す。

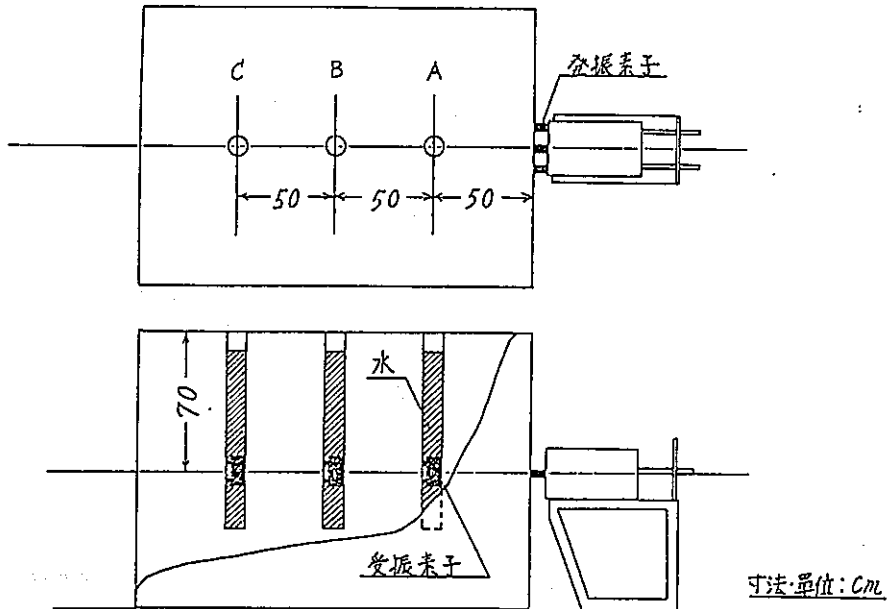


図-4.32 実験9の概要

(1) 素子間隔の影響

A孔での受振結果（発振・受振点間距離50cm）から、電圧を10V、矩形パルス幅30 μ sに固定し、2個の素子間隔を10cmと20cmの2段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 表-4.4参照
- ② 受振波動 : 図-4.33

表-4.4 測定結果一覧（実験9）

9-1. パルス電圧10V, パルス幅30 μ s, 初動振幅 (mV)

		素子間隔 (cm)	
		5	10
受振距離 (cm)	50	34.77	28.71
	100	11.02	11.95
	150	0.156	0.156

表-4.4によると発振・受振点間距離50cmでは索子間隔が小さい方が初動振幅が大きくなっている。しかし、発振・受振点間距離が1 m以上では索子間隔の影響はほとんど受けていない。

圧電アクチュエータ3個（1個中央固定）側壁発振 受振距離0.5m パルス電圧10V パルス幅30 μ s

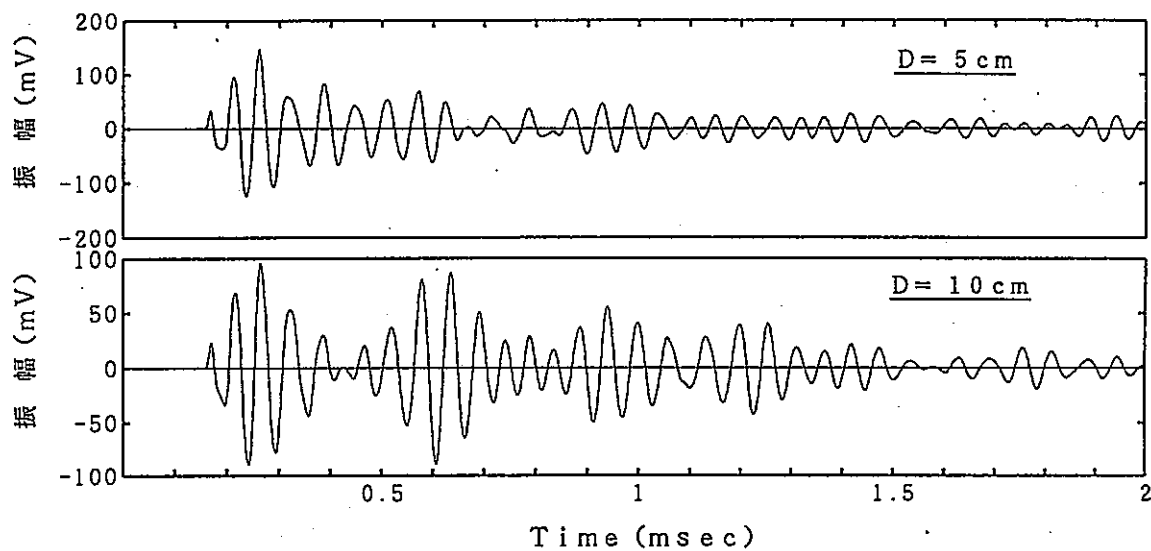
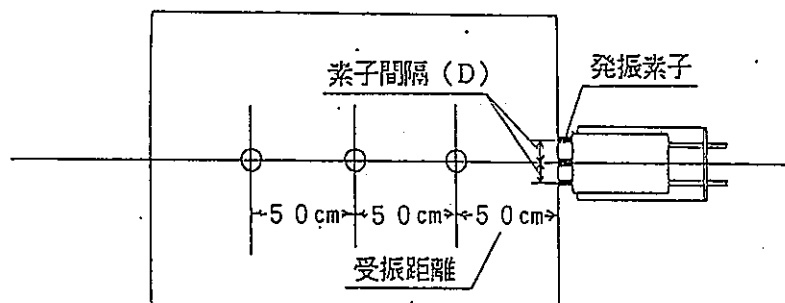


図-4.33 受振波動

(2) 発振・受振点間距離の影響

電圧10V、矩形パルス幅30 μ sで一定にし、発振・受振点間距離を50cm~1.5mの3段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- | | |
|-------------------|----------|
| ① 初動振幅の大きさ | : 図-4.34 |
| ② 初動周波数 | : 図-4.35 |
| ③ P波速度 | : 図-4.36 |
| ④ 素子間隔5cmの場合の受振波動 | : 図-4.37 |

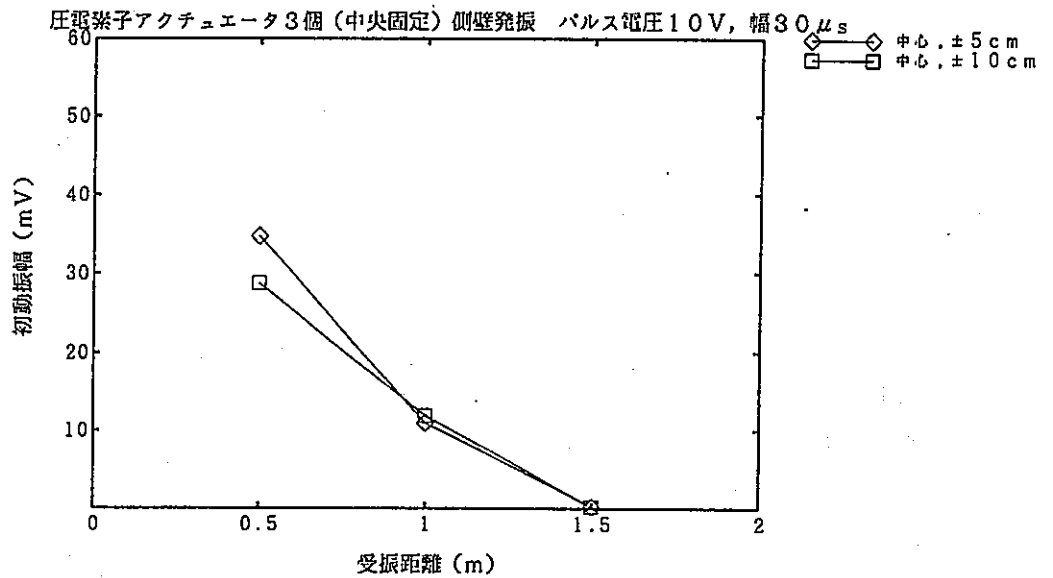


図-4.34 初動振幅の大きさ

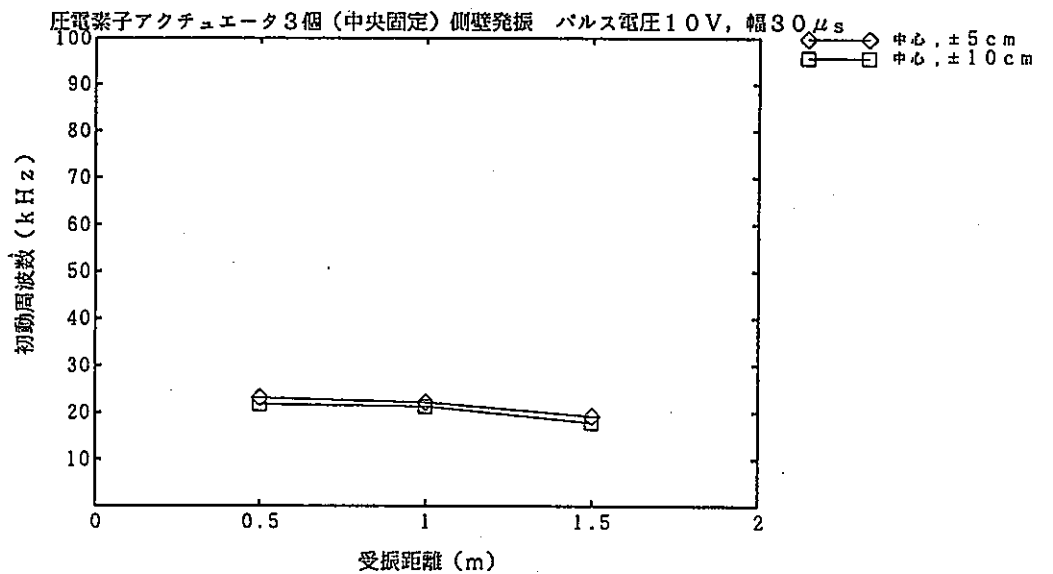


図-4.35 初動周波数

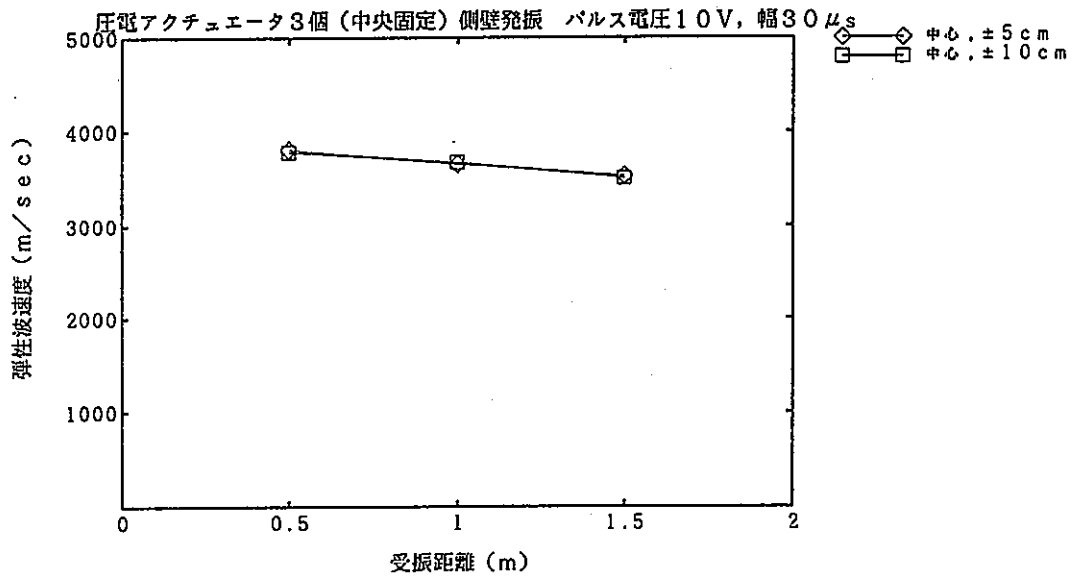


図-4.36 P波速度

初動振幅の大きさは発振・受振点間距離が大きくなるに伴い、振幅が小さくなり、初動周波数も、やや低下する傾向にある。また、発振受振点間距離が大きくなるに伴い、P波速度が遅くなっている。

圧電アクチュエータ3個(1個中央固定) 側壁発振 素子間隔5 cm パルス電圧10 V パルス幅30 μ s

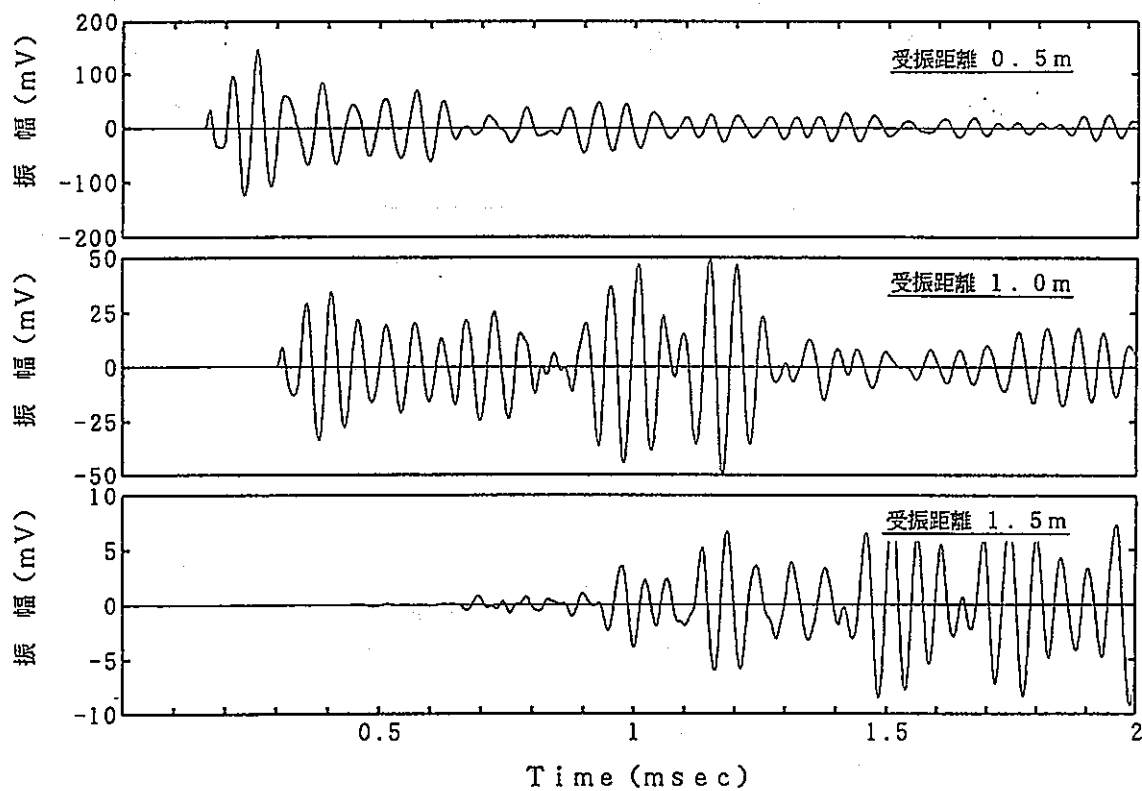
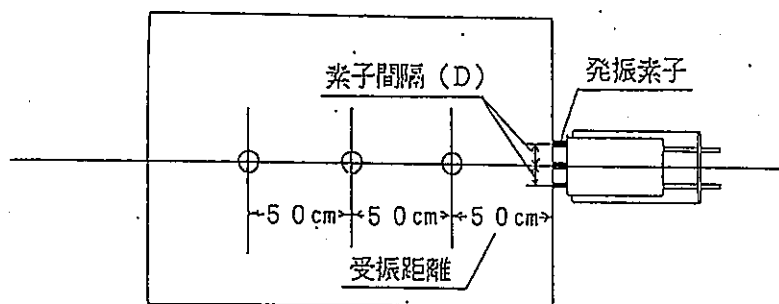


図-4.37 受振波動

4.5 実験10 (直列発振)

実験10では、図-4.38に示すように2個の圧電素子を直列に並べて発振源とし、発振点・受振点間距離の影響を測定した。測定結果一覧を表-4.5に示す。

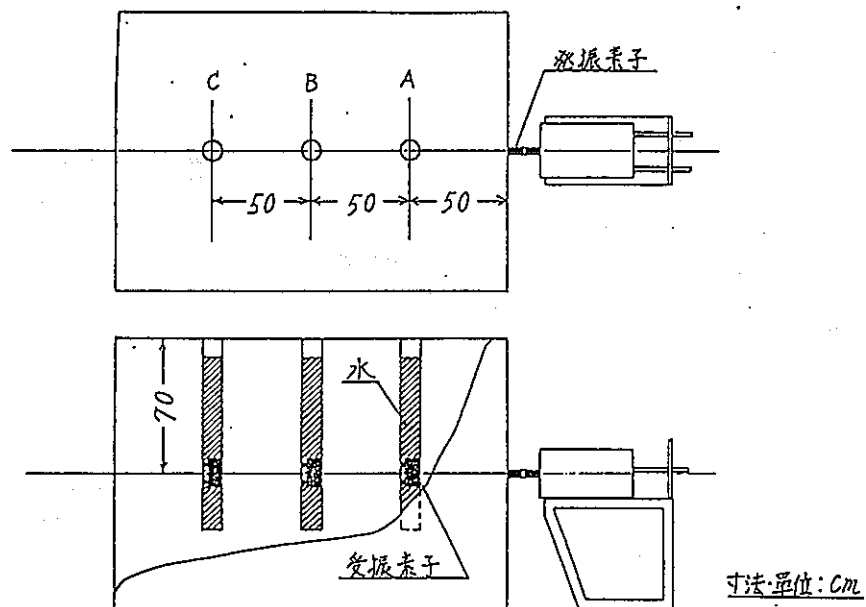


図-4.38 実験10の概要

表-4.5 測定結果一覧 (実験10)

10-1. パルス電圧10V, パルス幅30 μ s, 初動振幅(mV)

		初期振幅(mV)
受振距離 (cm)	50	19.92
	100	8.52
	150	0.102

(1) 発振・受振点間距離の影響

電圧を10V、矩形パルス幅を $30\mu\text{s}$ で一定にし、発振・受振点間距離を50cm~1.5mの3段階に変化させたときの結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-4.39
- ② 初動周波数 : 図-4.40
- ③ P波速度 : 図-4.41
- ④ 受振波動 : 図-4.42

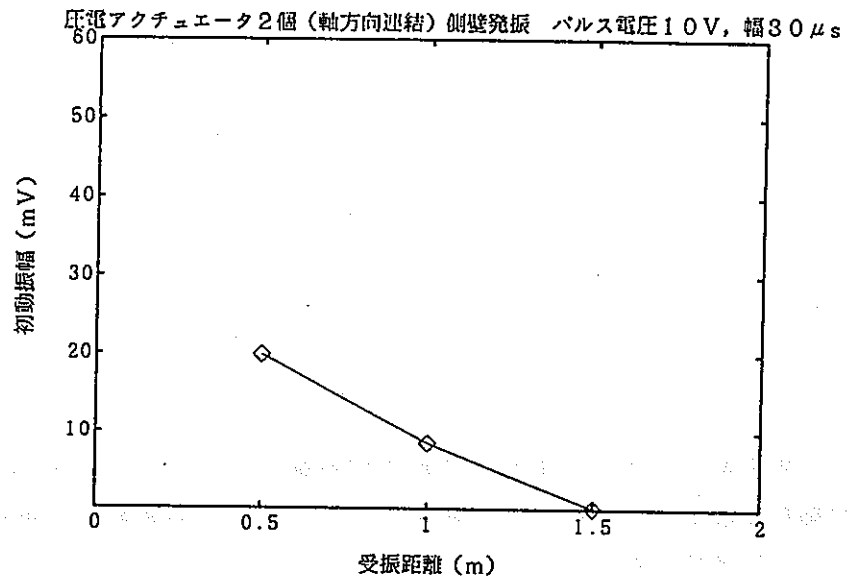


図-4.39 初動振幅の大きさ

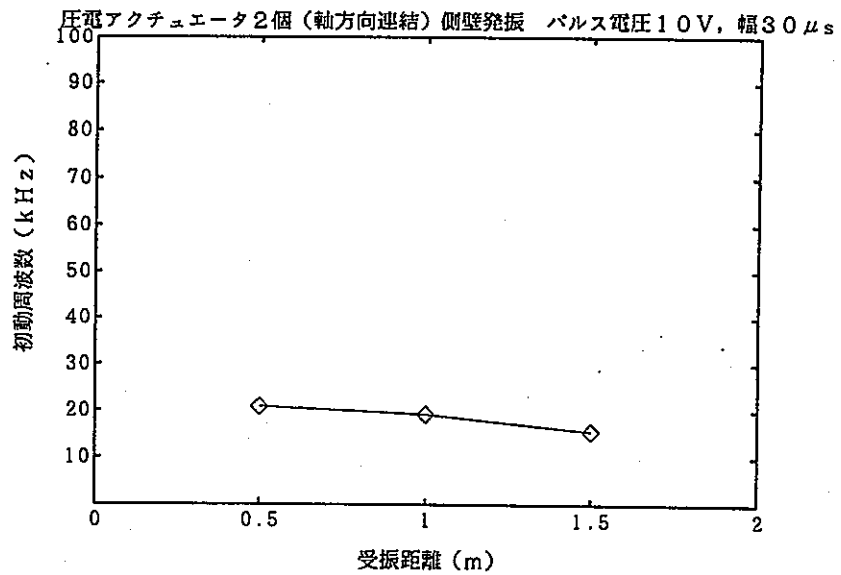


図-4.40 初動周波数

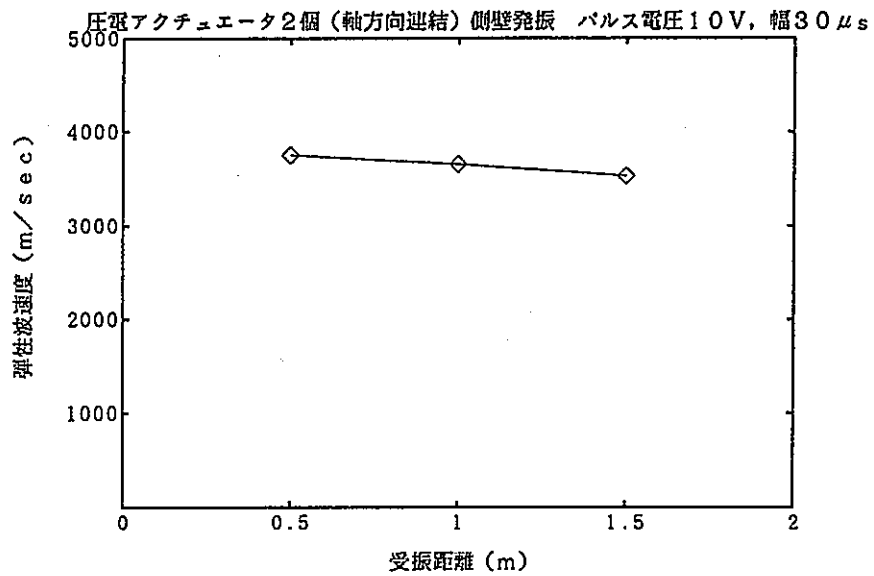


図-4.41 P波速度

初動振幅の大きさは発振・受振点間距離が大きくなるに伴い、振幅が小さくなり、初動周波数も、やや低下する傾向にある。また、発振受振点間距離が大きくなるに伴い、P波速度が遅くなっている。

圧電アクチュエータ2個（軸方向連結）側壁発振 パルス電圧10V パルス幅30 μ s

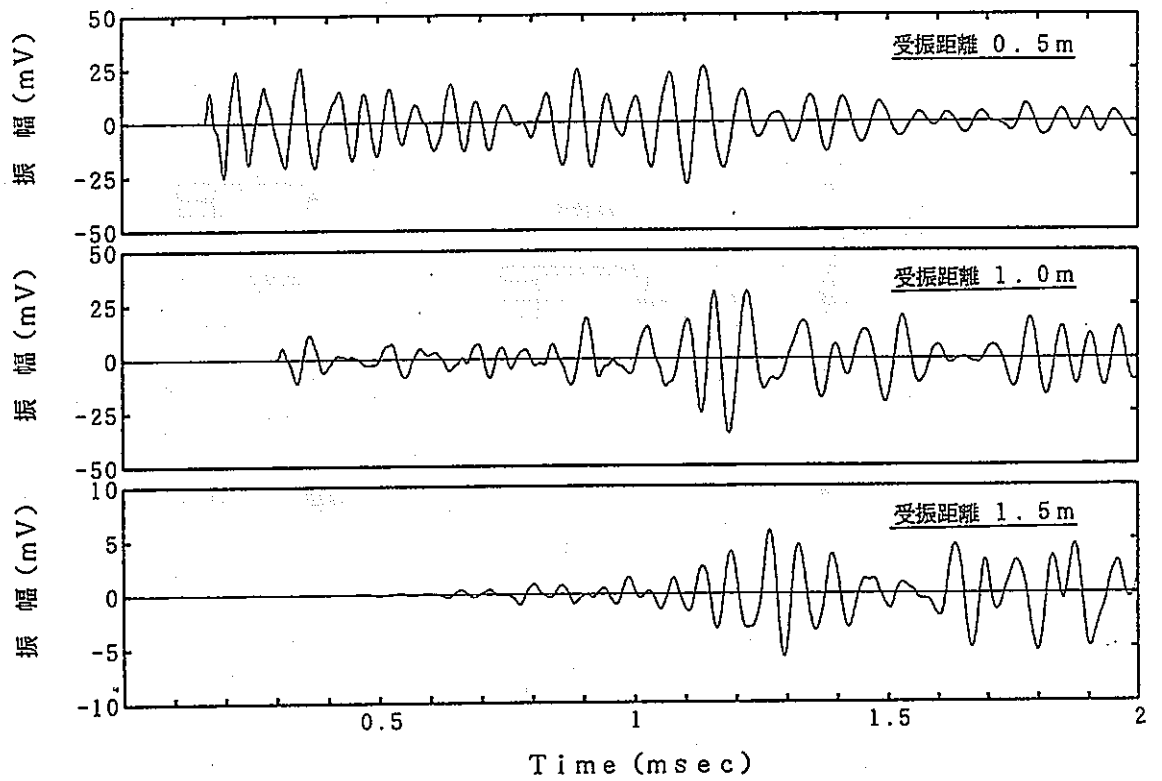
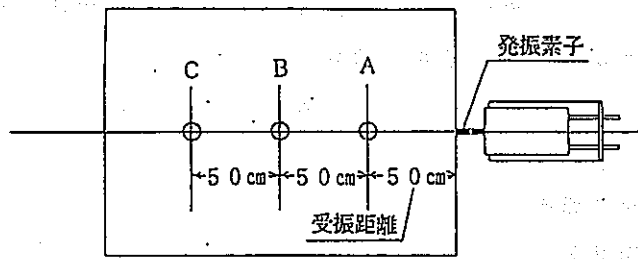


図-4.42 受振波動

5. 指向特性試験

圧電素子、圧電アクチュエータを発振源とし、発振源の指向性を把握するための測定を行った。測定は圧電素子を用いた場合（実験11）、圧電アクチュエータを用いた場合（実験12）で構成されている。

5.1 実験11（圧電素子）

実験11は図-5.1に示すように、発振素子（圧電素子）から発振された波動の指向性を把握するために測定を行った。発振には第3章で述べた実験1～5と同様な以下のような発振方法を用い、受振は発振方向に対して 0° 、 22.5° 、 45° の3方向で扇形状に配置し、電圧30V、矩形パルス幅 $10\mu\text{s}$ で一定とした。測定結果（初動振幅）一覧を表-5.1に示す。

- ・ 1個の場合
- ・ 2個並列（中央振り分け）の場合
- ・ 3個並列の場合
- ・ 2個直列の場合

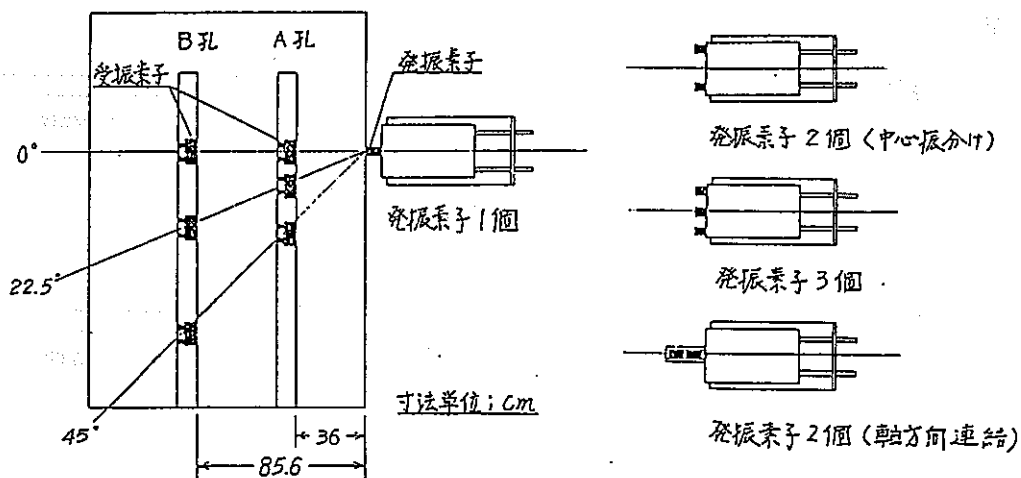


図-5.1 実験11の概要

表-5.1 測定結果一覧 (実験11)

11-1. パルス電圧30V, パルス幅10 μ s, 初動振幅 (mV)

	角 度 (A孔)			角 度 (B孔)		
	0° [36.00]	22.5° [38.97]	45° [50.92]	0° [85.60]	22.5° [92.65]	45° [121.06]
圧電素子 1 個	2.75	1.17	0.937	0.148	0.494	0.041
圧電素子 2 個 *1	2.93	0.805	0.766	0.180	0.228	0.021
圧電素子 2 個 *2	0.012	0.025	0.011	0.004	0.008	0.002
圧電素子 3 個 *3	5.48	2.10	0.773	0.336	0.545	0.019

[]内は、発振素子-受振素子間隔(cm)

- *1. 中心振り分け5cm
- *2. 軸方向連結
- *3. 中央1個, 中心振り分け5cm

(1) 1 個の場合

測定結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅 : 図-5.2
- ② 初動周波数 : 図-5.3
- ③ P波速度 : 図-5.4
- ④ A孔での受振波動 : 図-5.5
- ⑤ B孔での受振波動 : 図-5.6

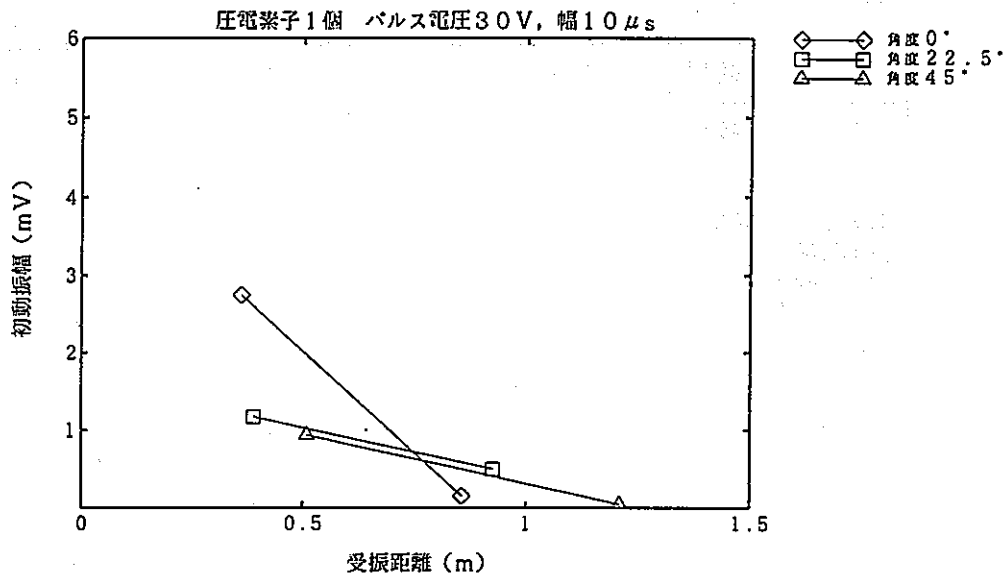


図-5.2 初動振幅の大きさ

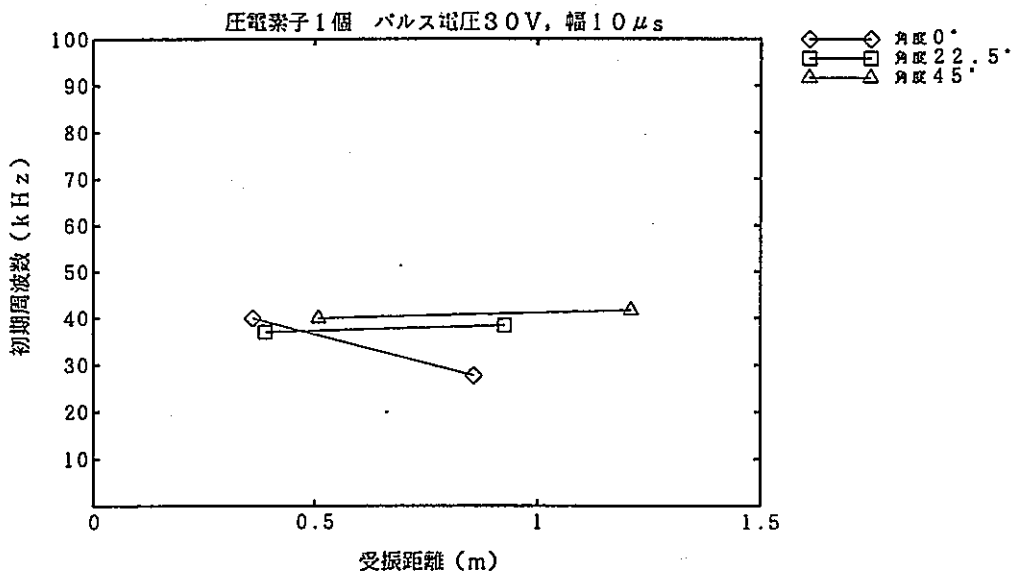


図-5.3 初動周波数

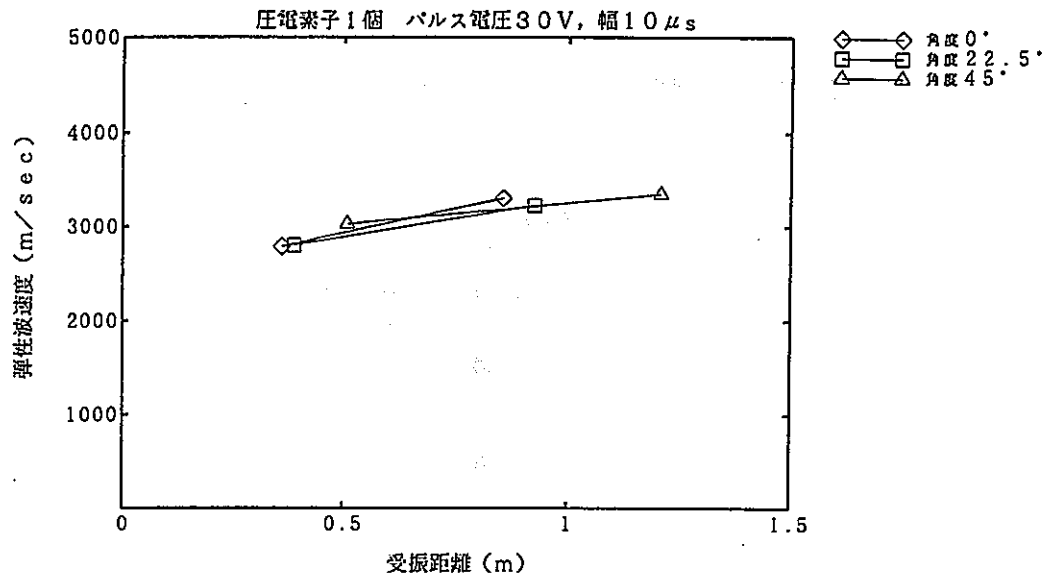


図-5.4 P波速度

初動振幅の大きさは、角度22.5°と角度45°の受振ではほぼ同様な初動振幅の低下であるが、角度0°の受振ではそれらより低下が大きくなっている。また、初動周波数は角度22.5°、45°では40KHz程度で一定であるのに対し、角度0°では受振距離が大きくなると小さくなる傾向にある。一方、P波速度は、受振距離が大きくなるにつれ速くなる傾向がある。

圧電素子1個 側壁発振 受振素子A孔設置 パルス電圧30V パルス幅10 μ s

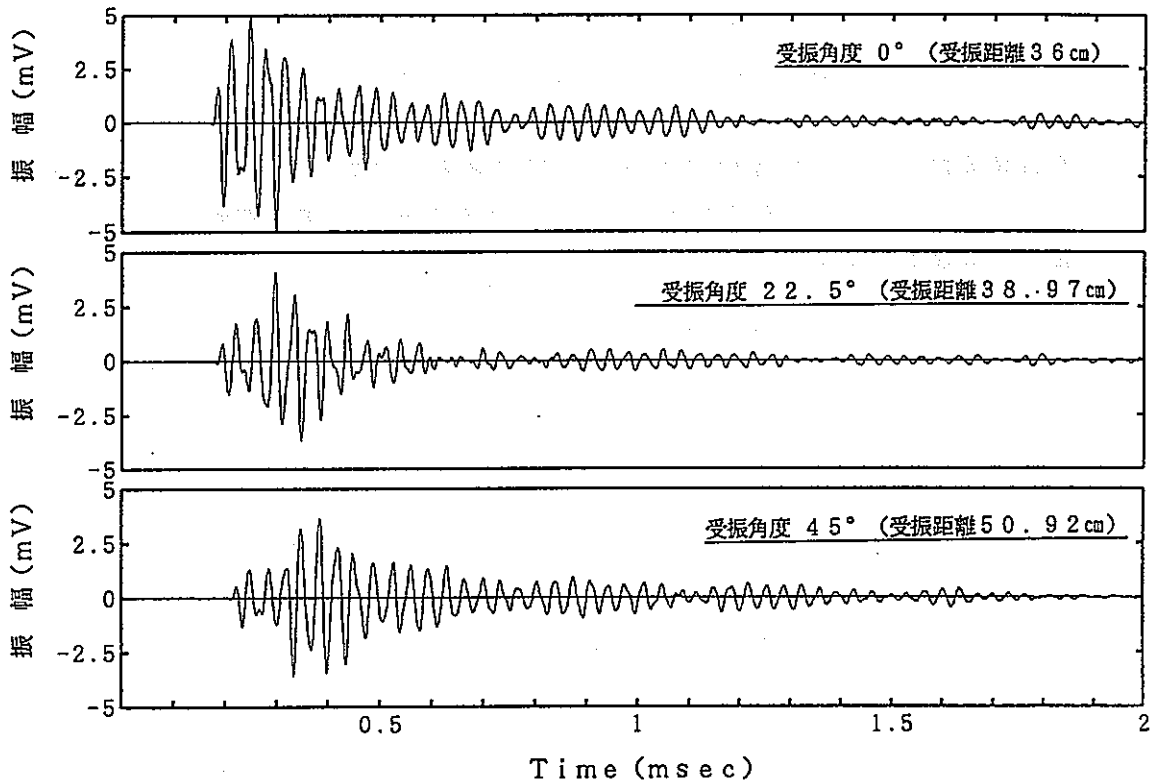
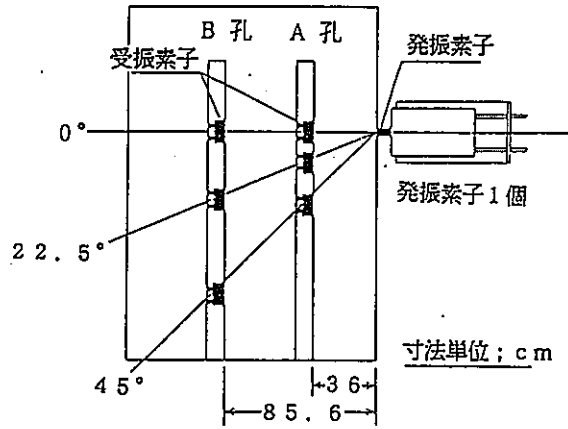


図-5.5 A孔での受振波動

圧電素子1個 側壁発振 受振素子B孔設置 パルス電圧30V パルス幅10 μ s

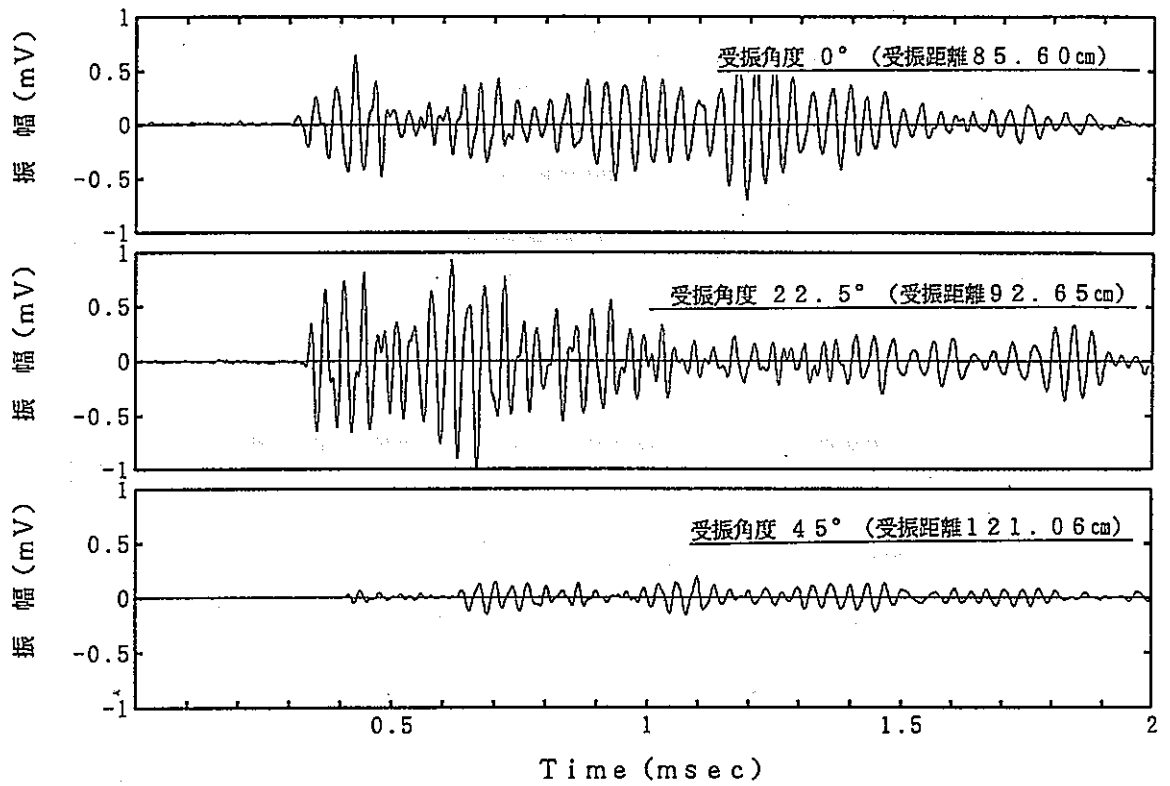
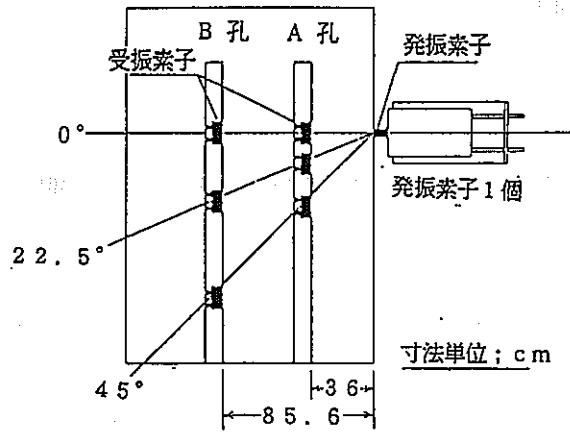


図-5.6 B孔での受振波動

(2) 2個並列（中央振り分け）の場合

測定結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-5.7
- ② 初動周波数 : 図-5.8
- ③ P波速度 : 図-5.9
- ④ A孔での受振波動 : 図-5.10

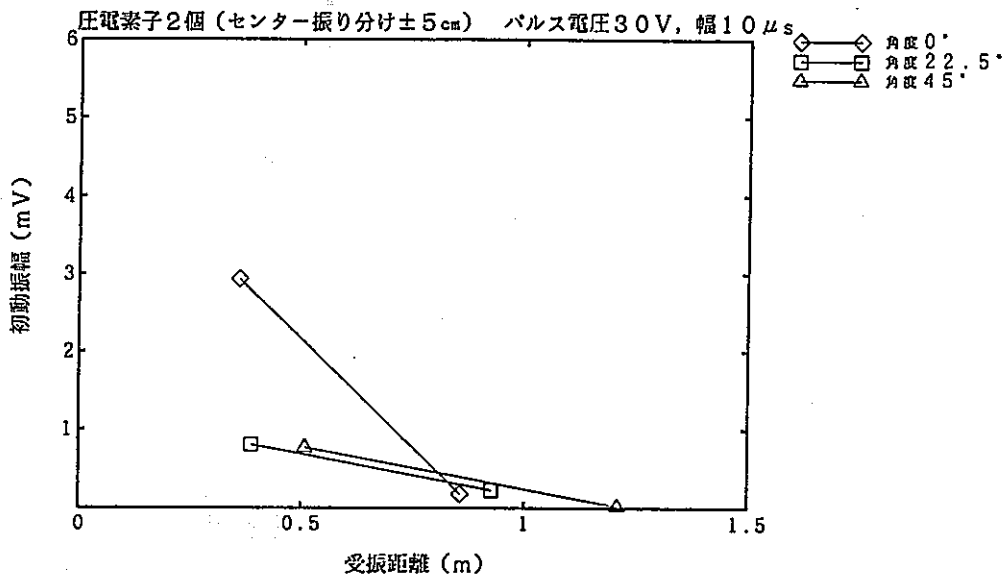


図-5.7 初動振幅の大きさ

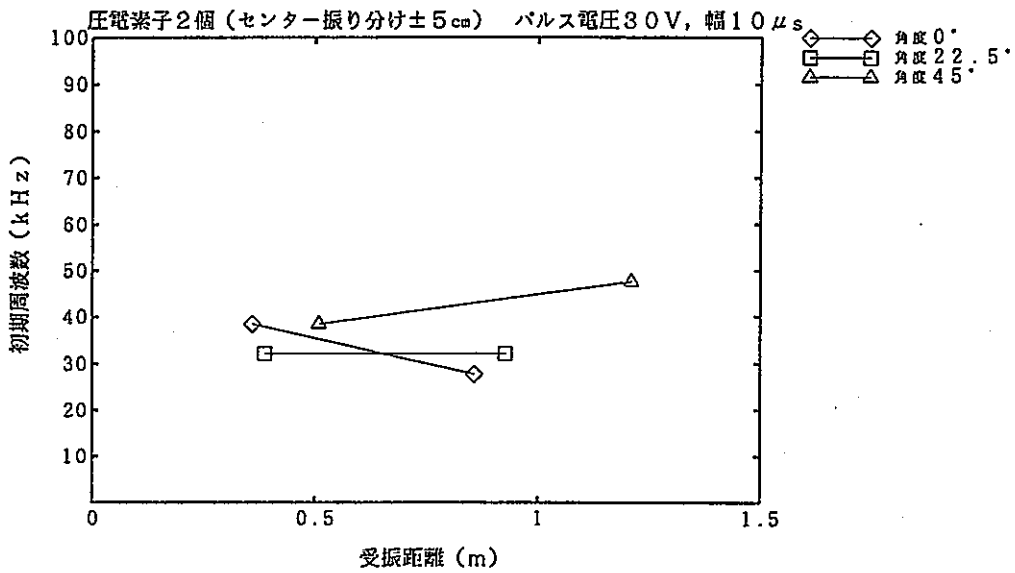


図-5.8 初動周波数

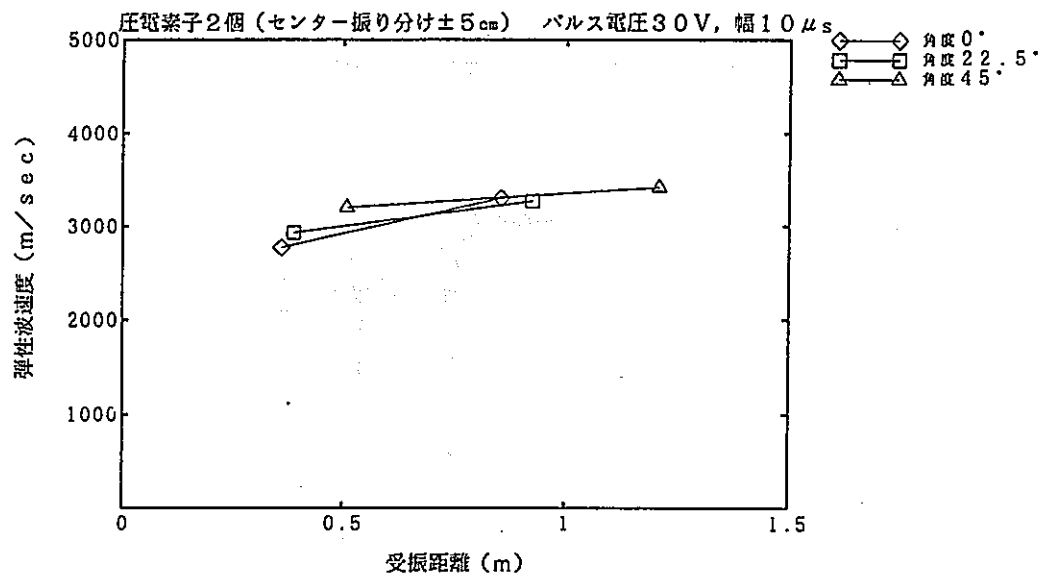


図-5.9 P波速度

初動振幅の大きさは、角度22.5°と角度45°の受振ではほぼ同様な初動振幅の低下であるが、角度0°の受振ではそれらより低下が大きくなっている。また、初動周波数は角度22.5°45°では40KHz程度で一定であるのに対し、角度0°では受振距離が大きくなると小さくなる傾向にある。一方、P波速度は、受振距離が大きくなるにつれ速くなる傾向がある。

圧電素子2個（中心振り分け）側壁発振 素子間隔5 cm 受振素子A孔 パルス電圧30 V パルス幅10 μ s

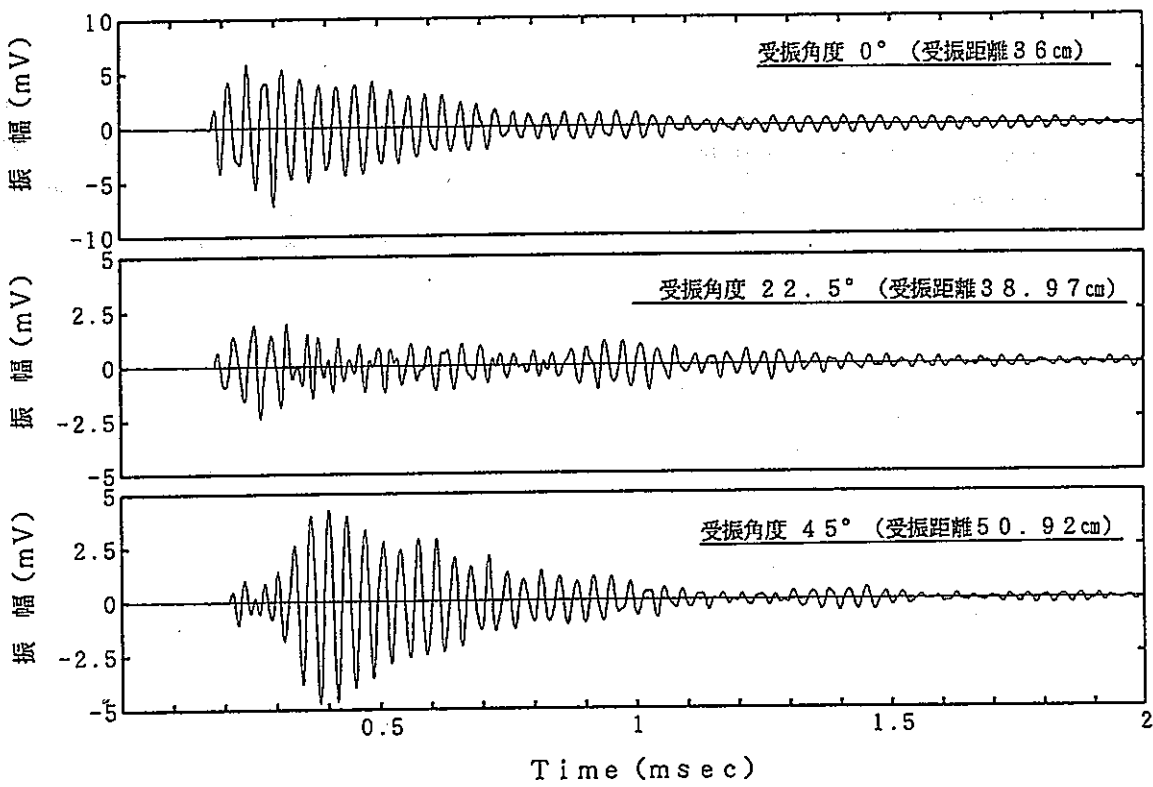
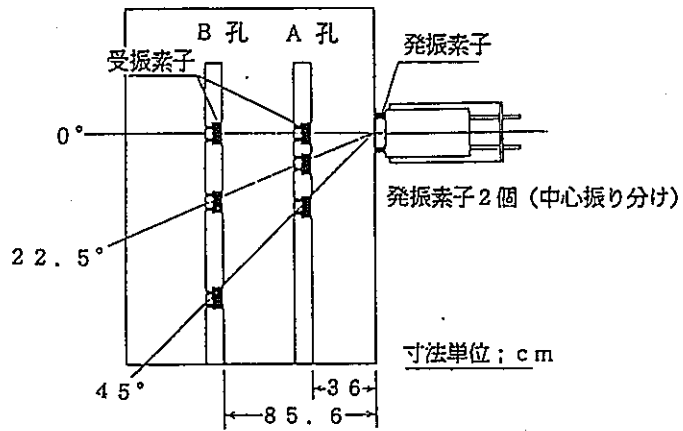


図-5.10 A孔での受振波動

(3) 3個並列の場合

測定結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-5.11
- ② 初動周波数 : 図-5.12
- ③ P波速度 : 図-5.13
- ④ A孔での受振波動 : 図-5.14

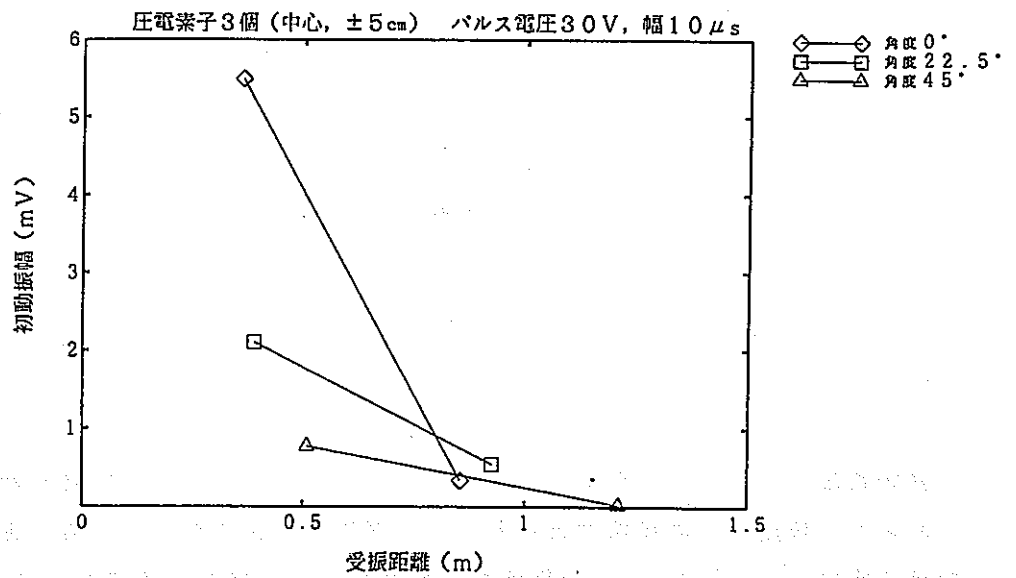


図-5.11 初動振幅の大きさ

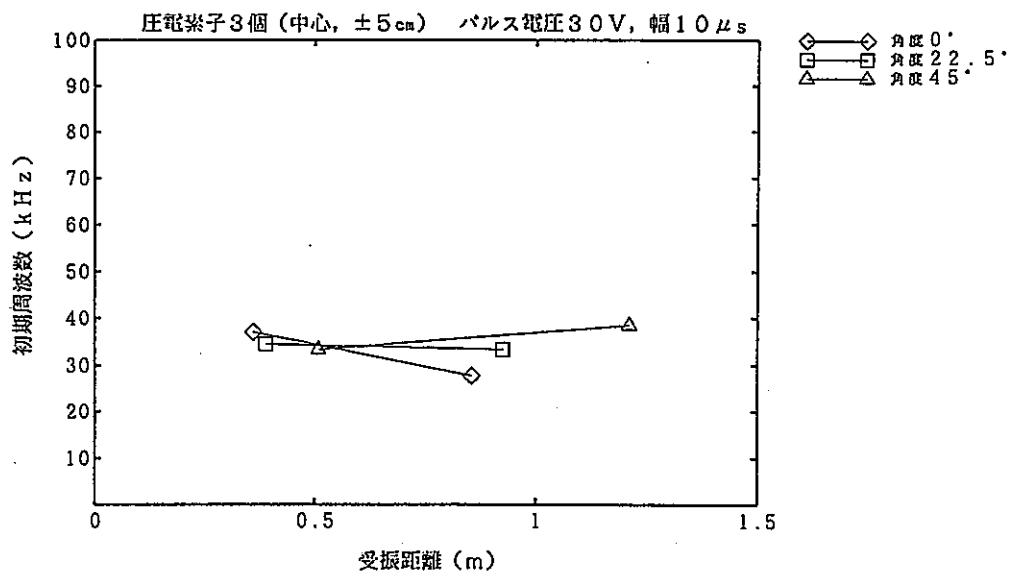


図-5.12 初動周波数

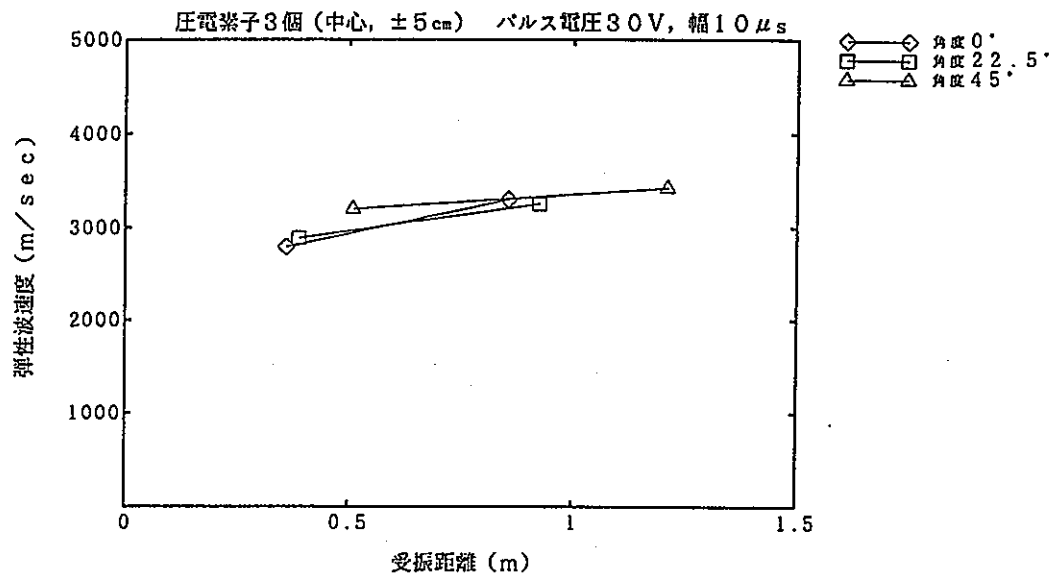


図-5.13 P波速度

初動振幅の大きさは、角度22.5°と角度45°の受振ではほぼ同様な初動振幅の低下であるが、角度0°の受振ではそれらより低下が大きくなっている。また、初動周波数は角度22.5°45°では35KHz程度で一定であるのに対し、角度0°では受振距離が大きくなると小さくなる傾向にある。一方、P波速度は、受振距離が大きくなるにつれ速くなる傾向がある。

圧電素子3個(1個中央固定)側壁発振 素子間隔5cm 受振素子A孔 パルス電圧30V パルス幅10 μ s

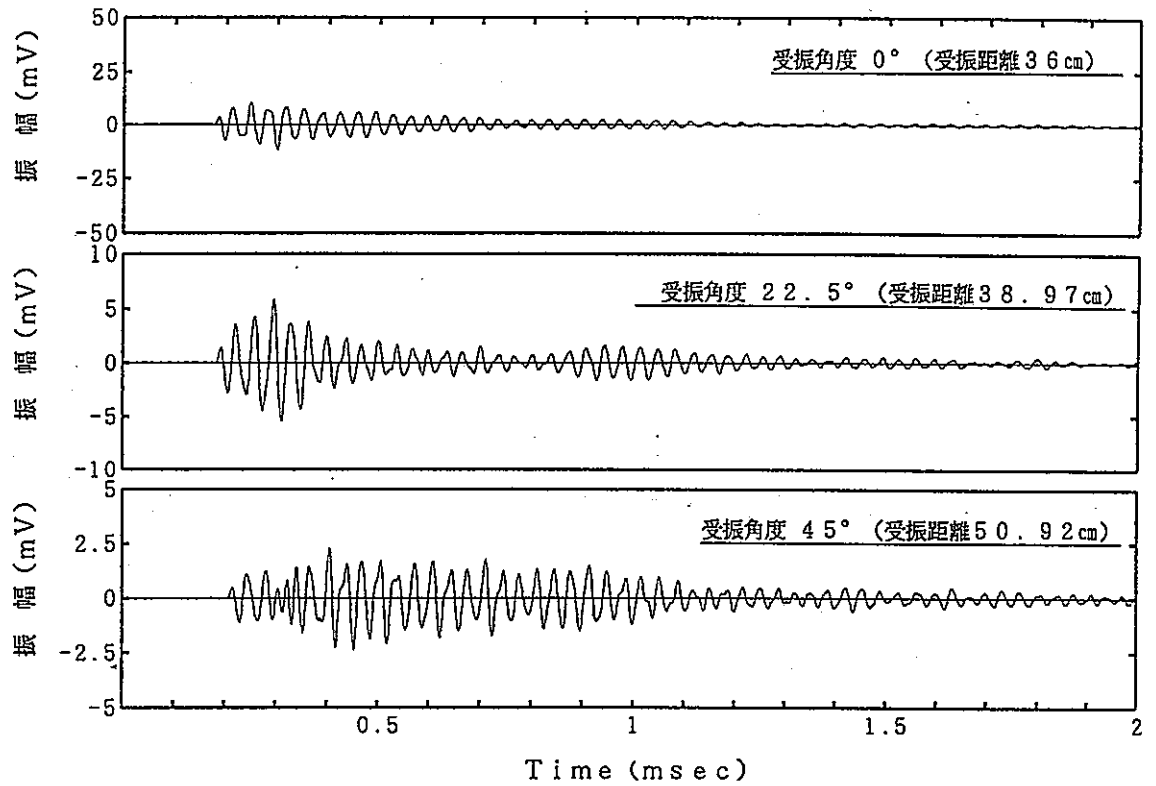
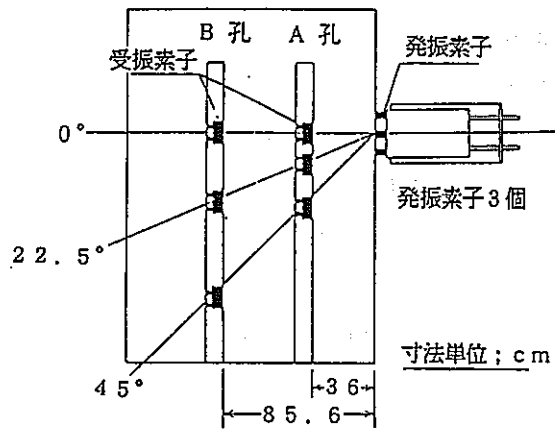


図-5.14 A孔での受振波動

(4) 2個直列の場合

測定結果を以下の図に示す。なお、図中内に()で示したプロットは、受振波動の初動波動が小さく測定誤差が大きいと考えられる測定結果であることを示している。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-5.15
- ② 初動周波数 : 図-5.16
- ③ P波速度 : 図-5.17
- ④ A孔での受振波動 : 図-5.18

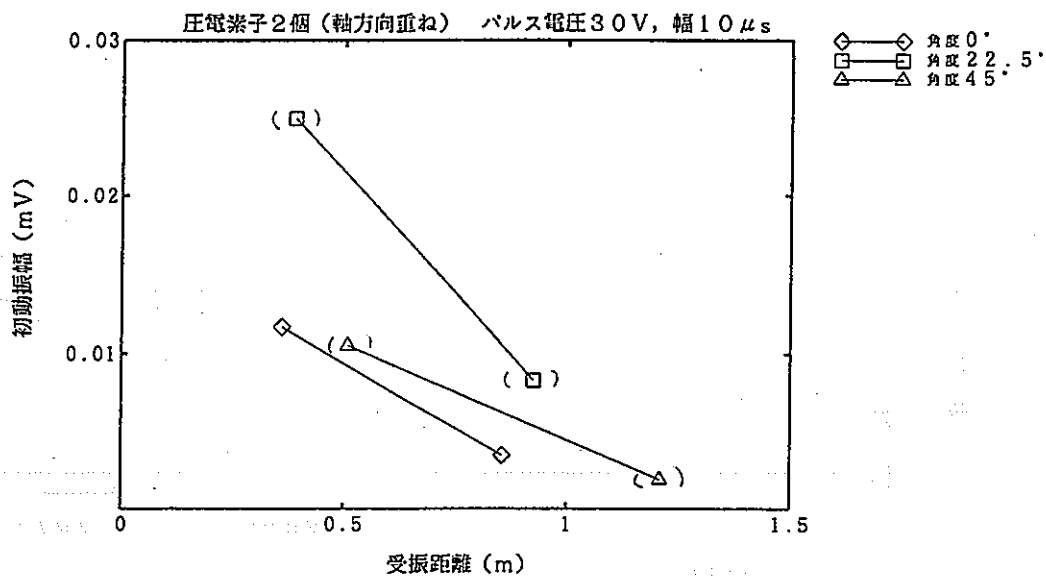


図-5.15 初動振幅の大きさ

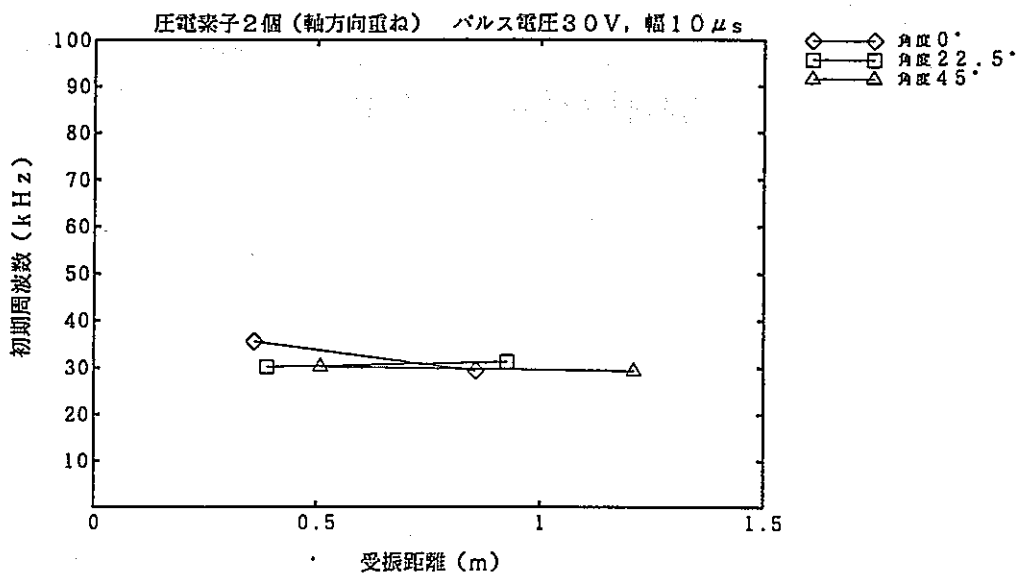


図-5.16 初動周波数

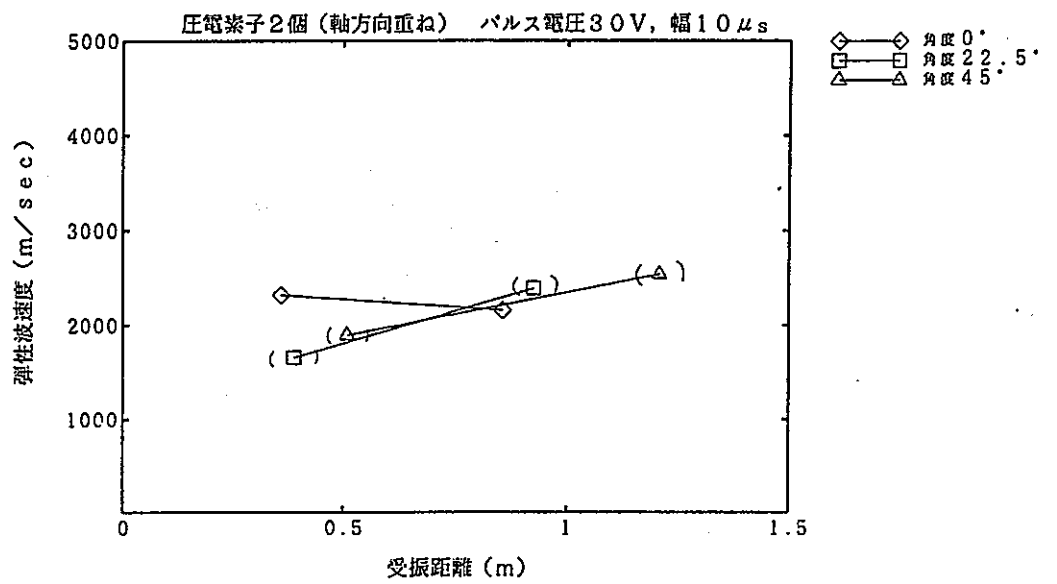


図-5.17 P波速度

初動振幅の大きさは、角度22.5°と角度45°の受振ではほぼ同様な初動振幅の低下であるが、角度0°の受振ではそれらより低下が大きくなっている。また、初動周波数は角度22.5°45°では30KHz程度で一定であるのに対し、角度0°では受振距離が大きくなると小さくなる傾向にある。一方、P波速度は2000m/s前後で、サンプル試料による超音波測定結果（4100～4200m/s）と比べると、かなり小さい値となっており、受振距離が大きくなるにつれ角度0°は遅くなる傾向が、角度22.5°と45°は速度が速くなっている。

圧電素子2個（軸方向連結）側壁発振 受振素子A孔 パルス電圧30V パルス幅10 μ s

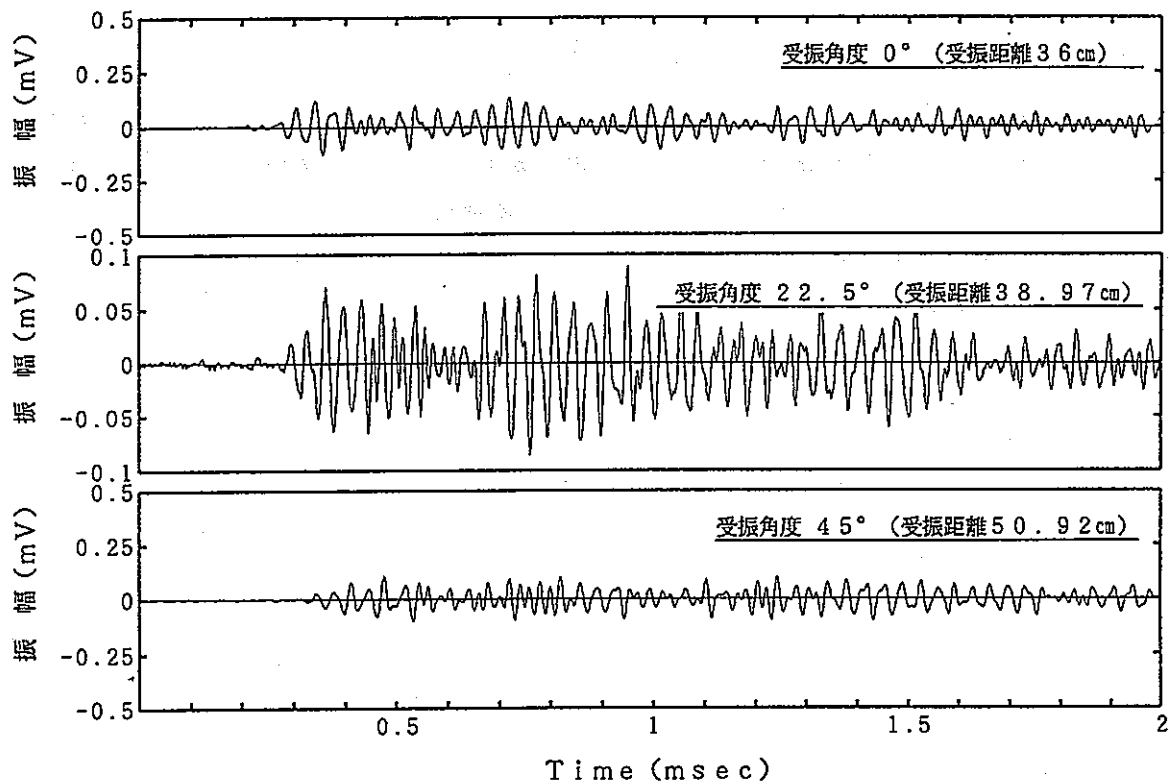
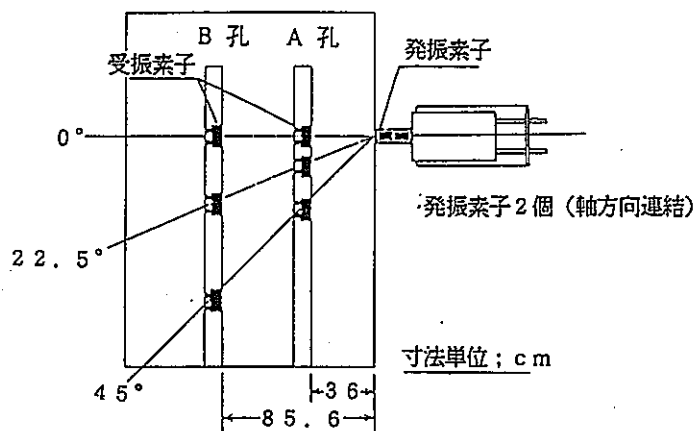


図-5.18 A孔での受振波動

5.2 実験12 (圧電アクチュエータ)

実験11は図-5.19 に示すように、発振素子 (圧電アクチュエータ) から発振された波動の指向性を把握するために測定を行った。発振には第4章で述べた実験6~10と同様な以下の様な発振方法を用い、受振は発振方向に対して 0° 、 22.5° 、 45° の3方向で扇形状に配置し、電圧10V、矩形パルス幅 $30\mu\text{s}$ で一定とした。測定結果 (初動振幅) 一覧を表-5.2に示す。

- ・ 1 個の場合
- ・ 2 個並列 (中央振り分け) の場合
- ・ 3 個並列の場合
- ・ 2 個直列の場合

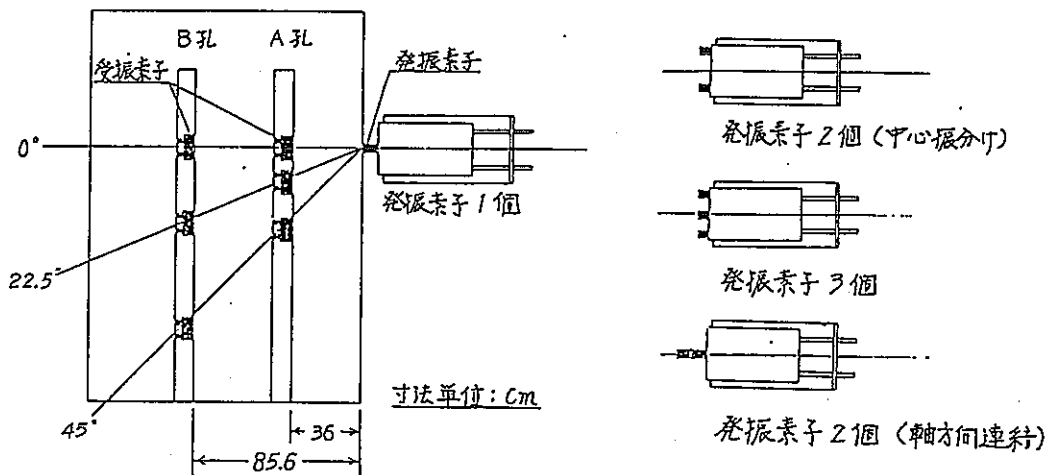


図-5.19 実験12の概要

表-5.2 測定結果一覧(実験12)

12-1. パルス電圧10V, パルス幅30 μ s, 初動振幅(mV)

	角 度 (A孔)			角 度 (B孔)		
	0° [36.00]	22.5° [38.97]	45° [50.92]	0° [85.60]	22.5° [92.65]	45° [121.06]
圧電7kchiI-タ 1個	10.43	5.74	3.16	1.26	1.80	0.156
圧電7kchiI-タ 2個*1	3.93	4.98	0.219	0.539	0.590	0.014
圧電7kchiI-タ 2個*2	6.88	4.57	2.03	1.42	1.12	0.090
圧電7kchiI-タ 3個*3	5.89	4.72	0.930	0.738	0.969	0.180

[]内は、発振素子-受振素子間隔(cm)

*1. 中心振り分け5cm

*2. 軸方向連結

*3. 中央1個, 中心振り分け5cm

(1) 1個の場合

測定結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅 : 図-5.20
- ② 初動周波数 : 図-5.21
- ③ 初動周波数 : 図-5.22
- ④ A孔での受振波動 : 図-5.23
- ⑤ B孔での受振波動 : 図-5.24

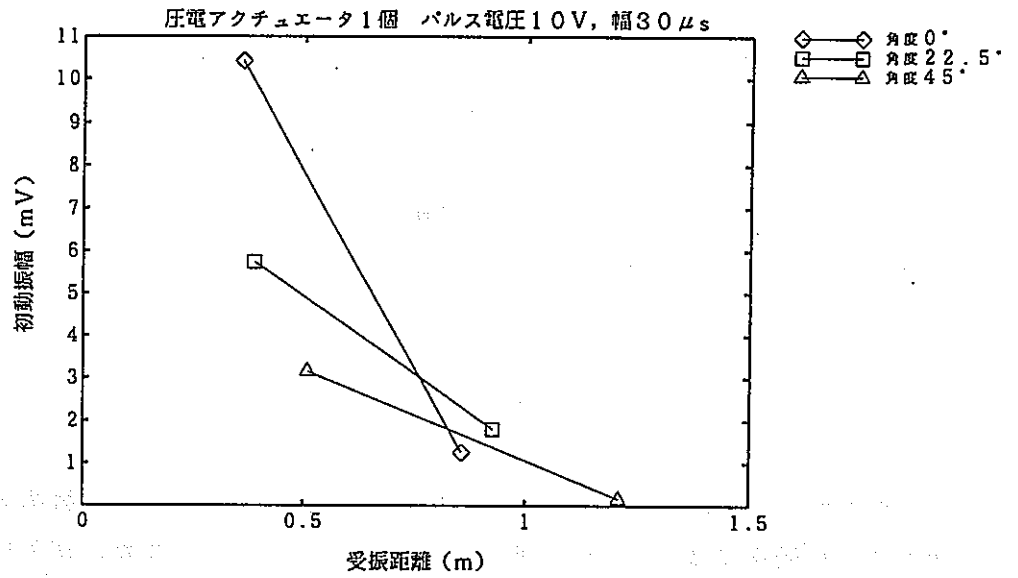


図-5.20 初動振幅の大きさ

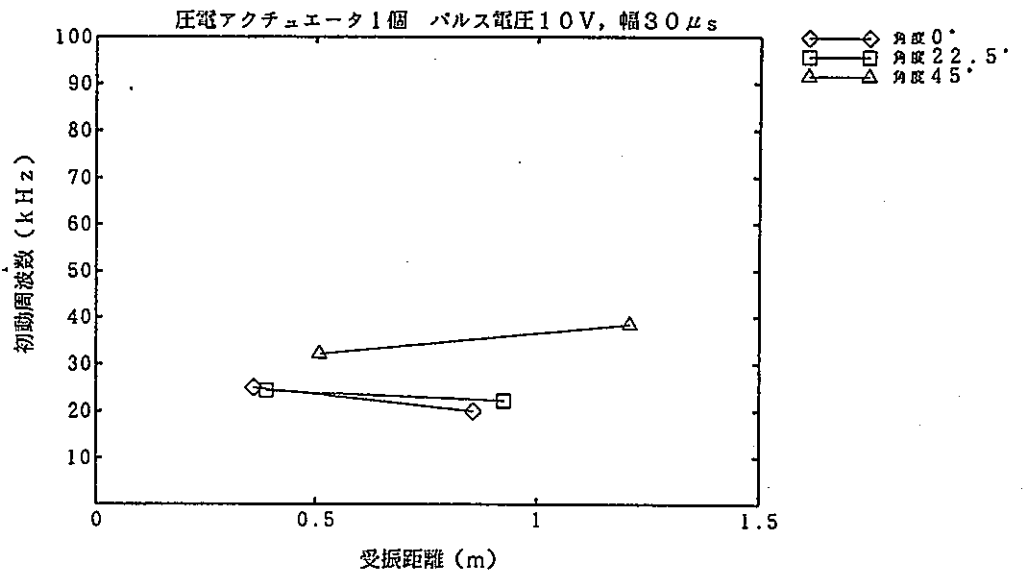


図-5.21 初動周波数

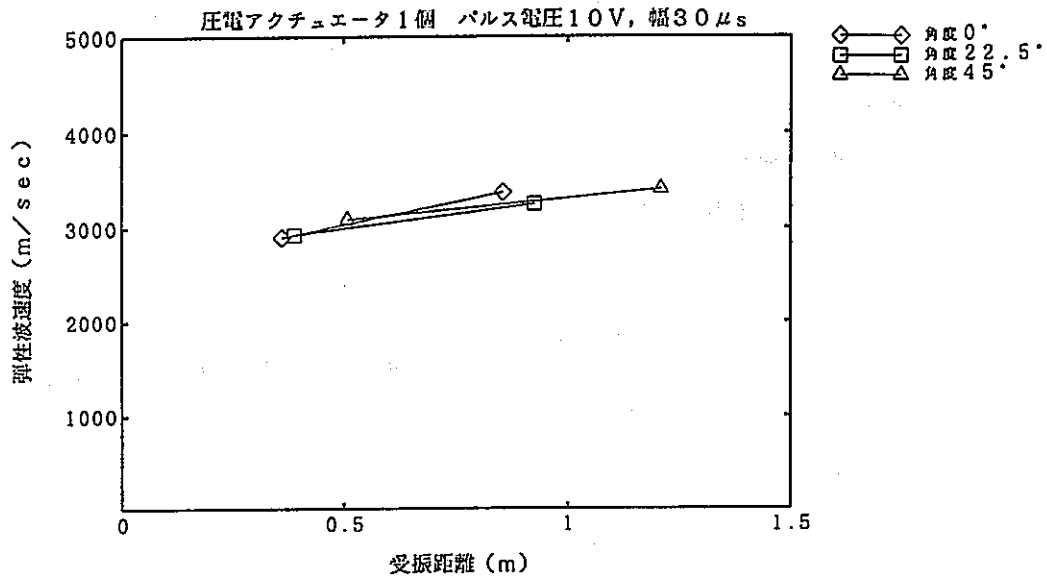


図-5.22 P波速度

初動振幅は、角度22.5°と角度45°の受振ではほぼ同様な初動振幅の低下を示すが、角度0°の受振ではそれらより低下が大きくなっている。また、初動周波数は角度22.5°、45°では25KHz程度で一定であるのに対し、角度0°では受振距離が大きくなると周波数が増加する傾向にある。一方、P波速度は3000~3500m/s前後で、受振距離が大きくなるにつれ速度が速くなる傾向がある。

圧電アクチュエータ1個 側壁発振 受振素子A孔設置 パルス電圧10V パルス幅30 μ s

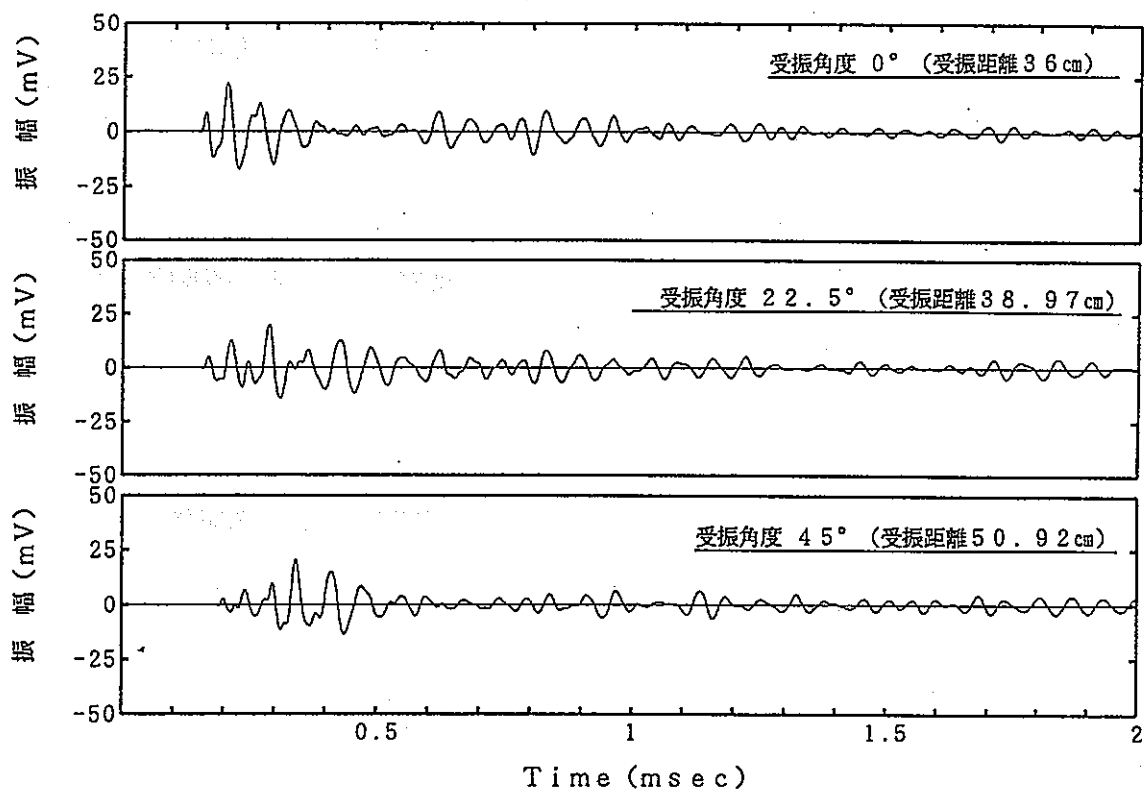
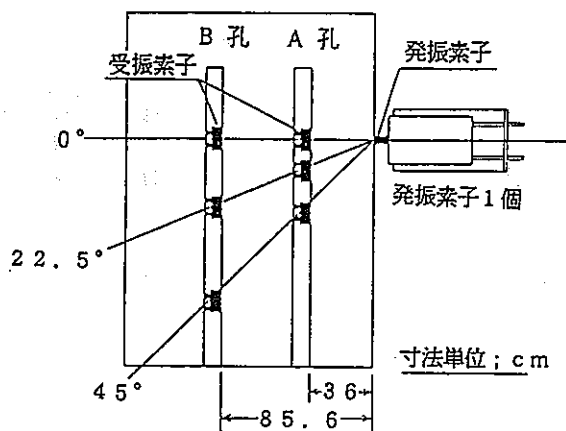


図-5.23 A孔での受振波動

圧電アクチュエータ1個 側壁発振 受振素子B孔設置 パルス電圧10V パルス幅30 μ s

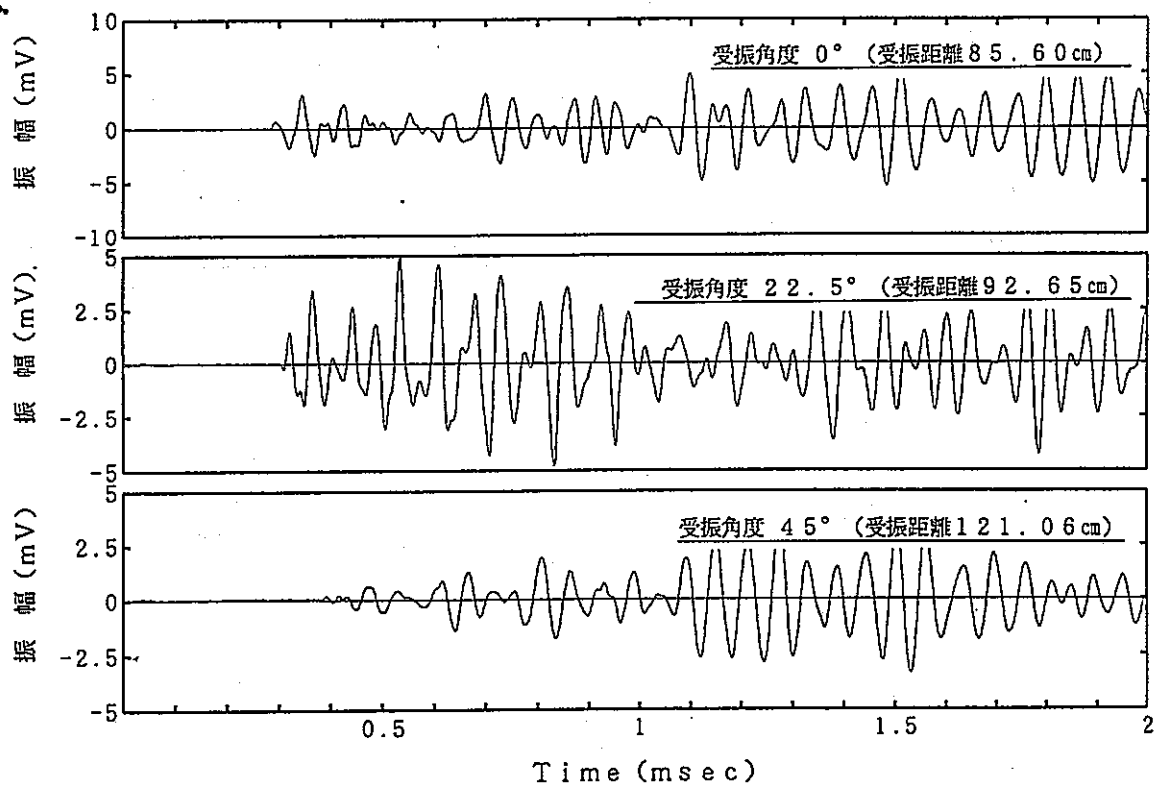
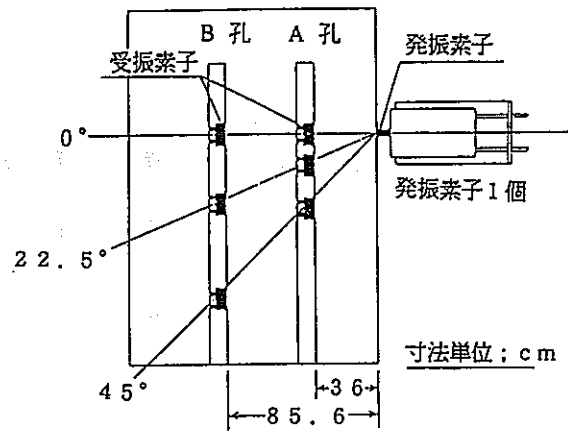


図-5.24 B孔での受振波動

(2) 2個並列（中央振り分け）の場合

測定結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-5.25
- ② 初動周波数 : 図-5.26
- ③ P波速度 : 図-5.27
- ④ A孔での受振波動 : 図-5.28

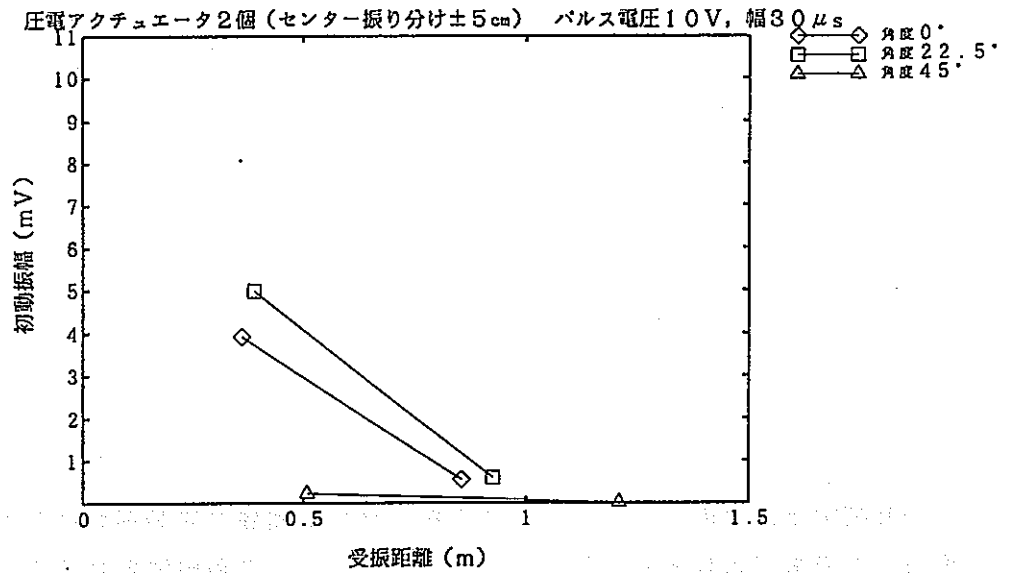


図-5.25 初動振幅の大きさ

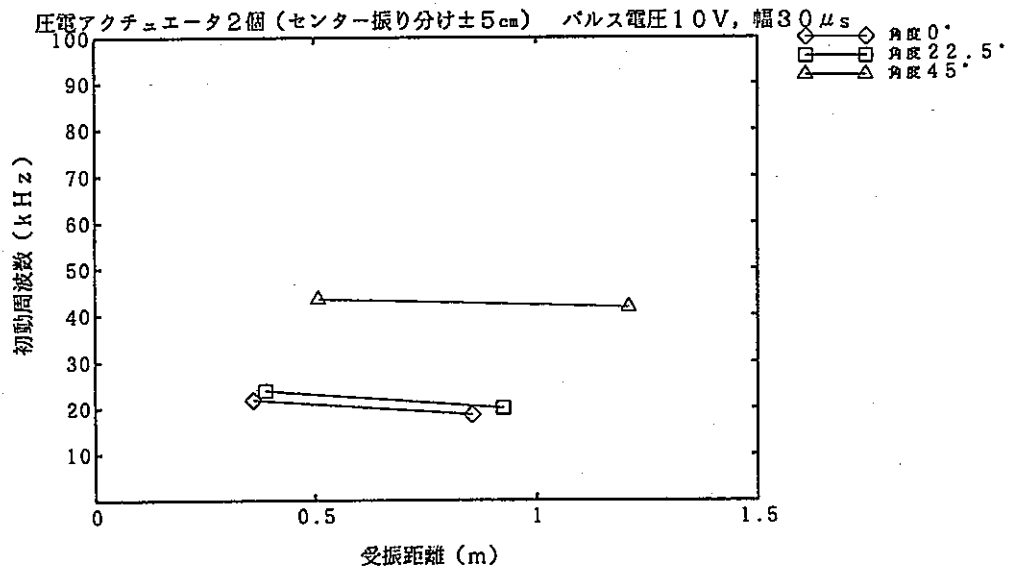


図-5.26 初動周波数

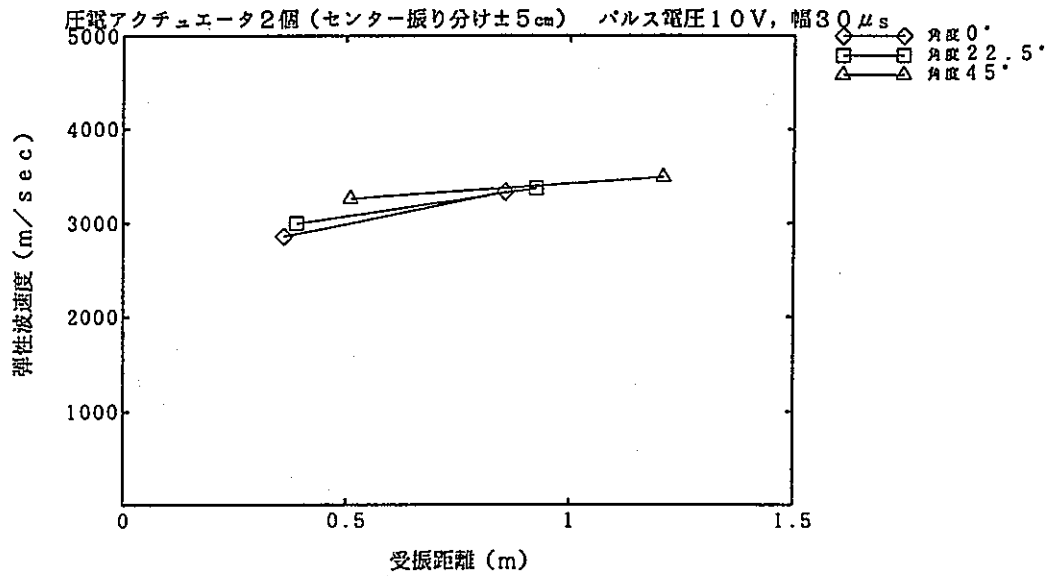


図-5.27 P波速度

初動振幅は、角度0°と22.5°の受振ではほぼ同様な初動振幅の低下を示すが、角度45°の受振ではほとんど低下していない。また、初動周波数は角度0°と22.5°では受振距離に伴って25kHz程度から低下する傾向にある。しかし、角度45°では45kHz程度から受振距離に伴って若干低下する傾向がある。一方、P波速度は3000m/s程度から受振距離が大きくなるにつれ速度が速くなる傾向にある。

圧電アクチュエータ2個（中心振り分け）側壁発振 素子間隔5 cm 受振素子A孔 パルス電圧10 V

パルス幅30 μ s

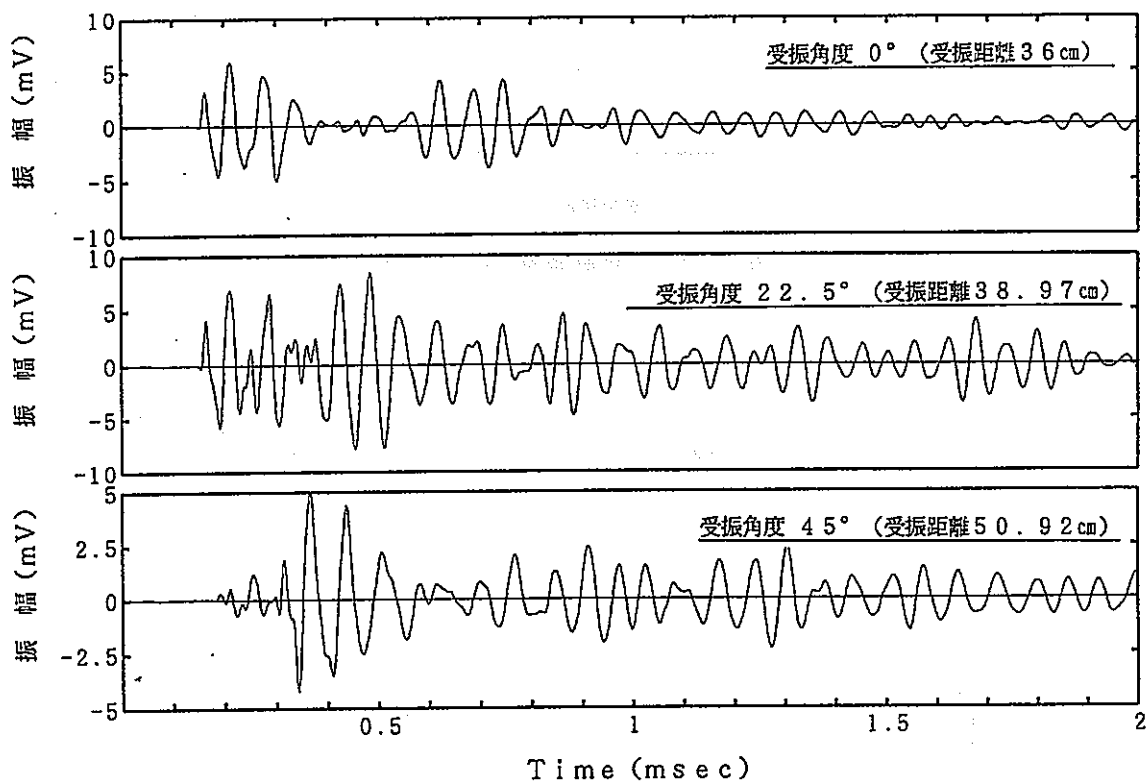
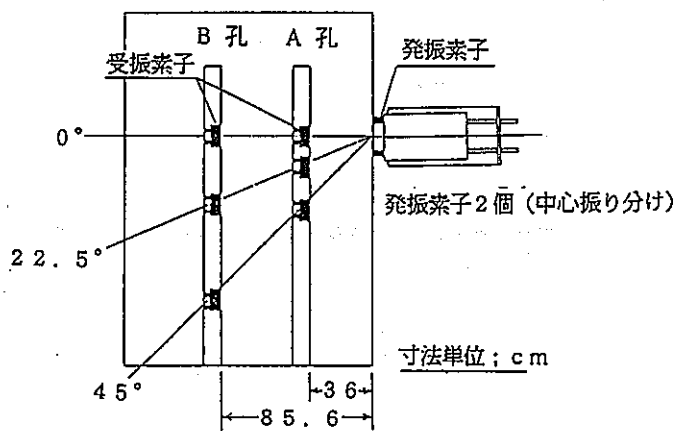


図-5.28 A孔での受振波動

(3) 3個並列の場合

測定結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-5.29
- ② 初動周波数 : 図-5.30
- ③ P波速度 : 図-5.31
- ④ A孔での受振波動 : 図-5.32

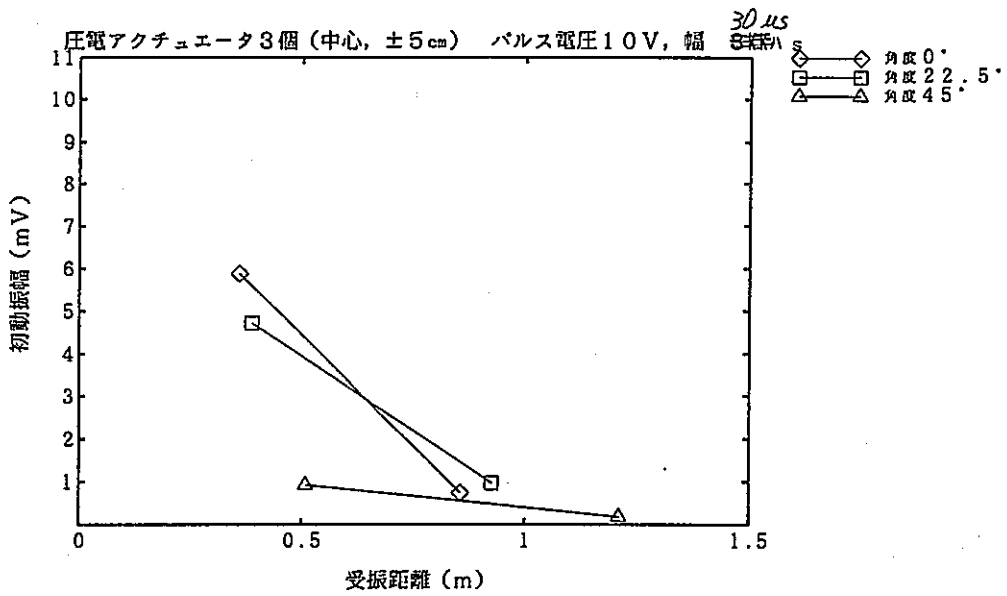


図-5.29 初動振幅の大きさ

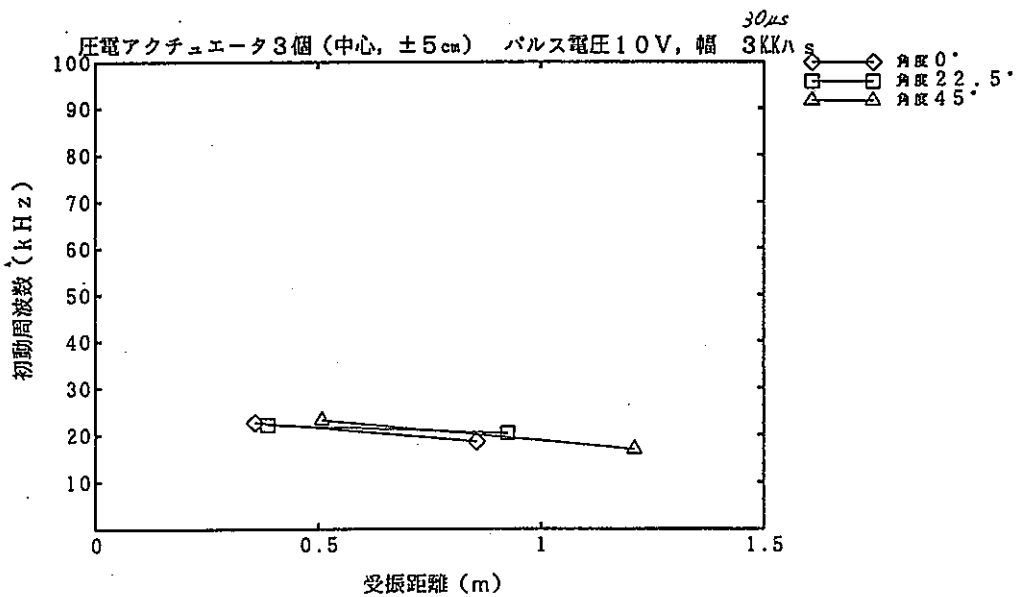


図-5.30 初動周波数

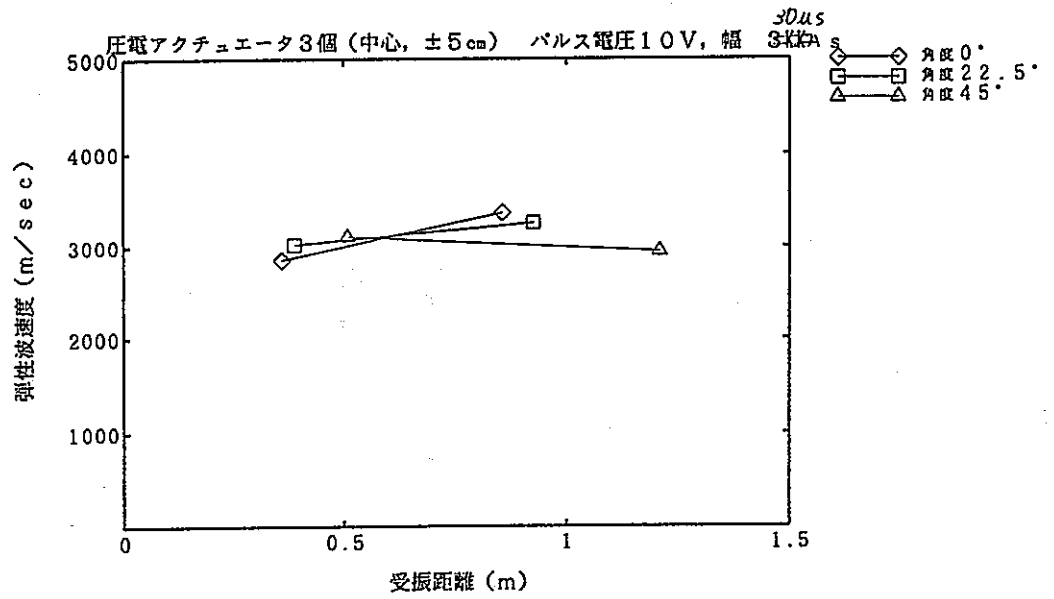


図-5.31 P波速度

初動振幅は、角度 0° と角度 22.5° の受振ではほぼ同様な初動振幅の低下を示すが、角度 45° の受振ではそれらより低下が少ない。また、初動周波数は全角度ともでは25 KHz程度から受振距離に伴って低下する傾向がある。一方、P波速度は 3000 m/s 前後で、受振距離に伴って速度が速くなる傾向がある。

圧電アクチュエータ3個（1個中央固定）側壁発振 素子間隔5 cm 受振素子A孔 パルス電圧10 V

パルス幅30 μ s

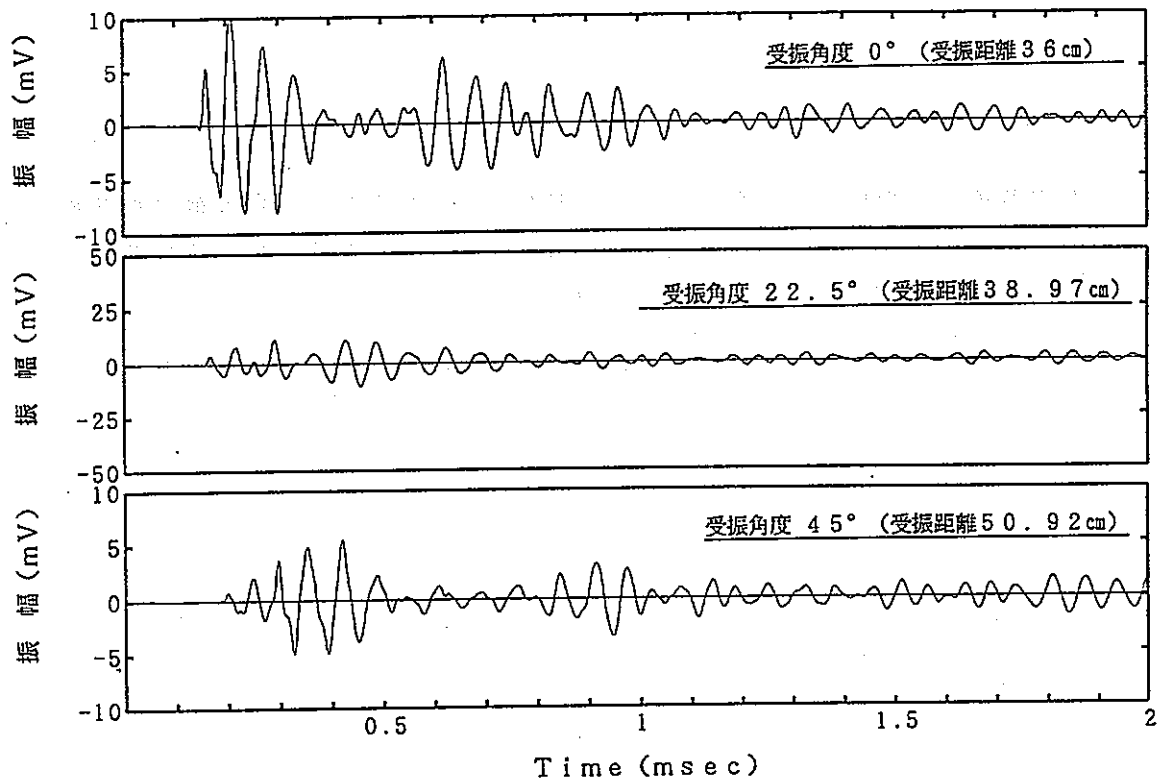
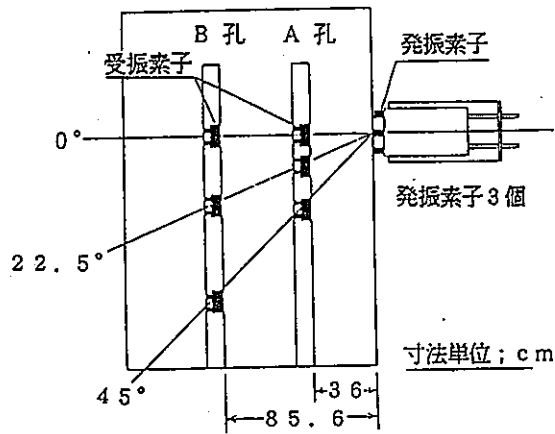


図-5.32 A孔での受振波動

(4) 2個直列の場合

測定結果を以下の図に示す。

- ① 初動振幅の大きさ : 図-5.33
- ② 初動周波数 : 図-5.34
- ③ P波速度 : 図-5.35
- ④ A孔での受振波動 : 図-5.36

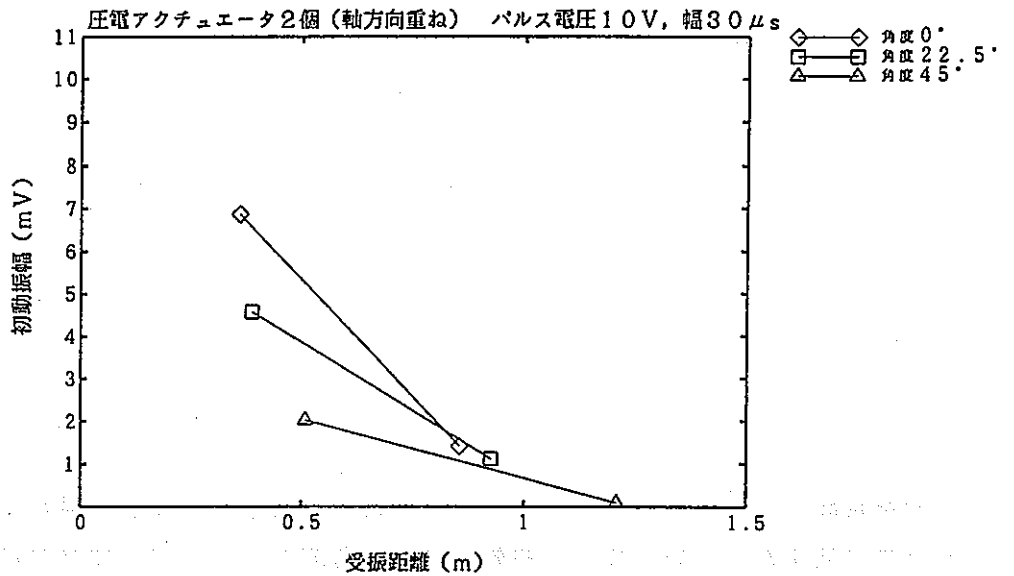


図-5.33 初動振幅の大きさ

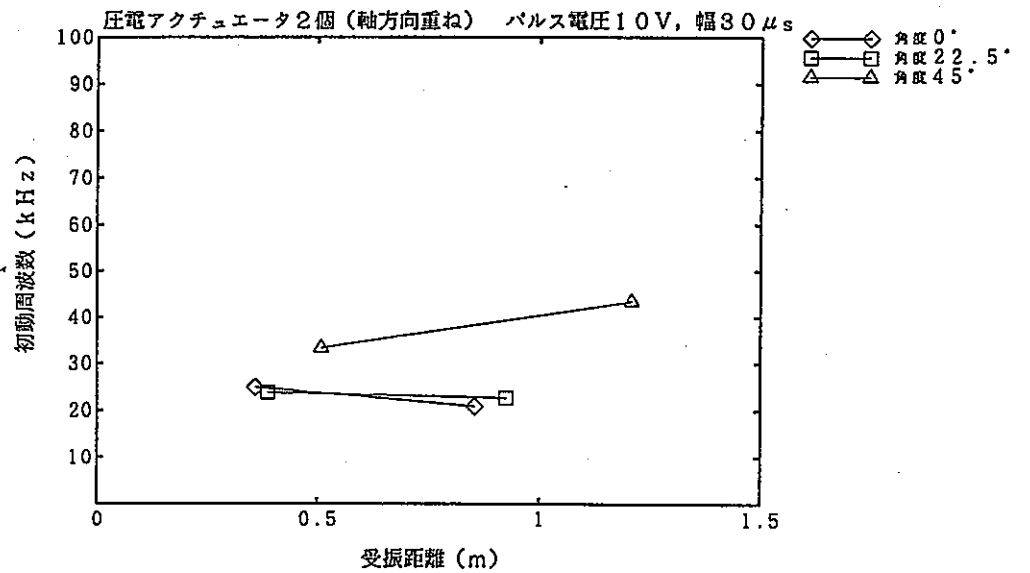


図-5.34 初動周波数

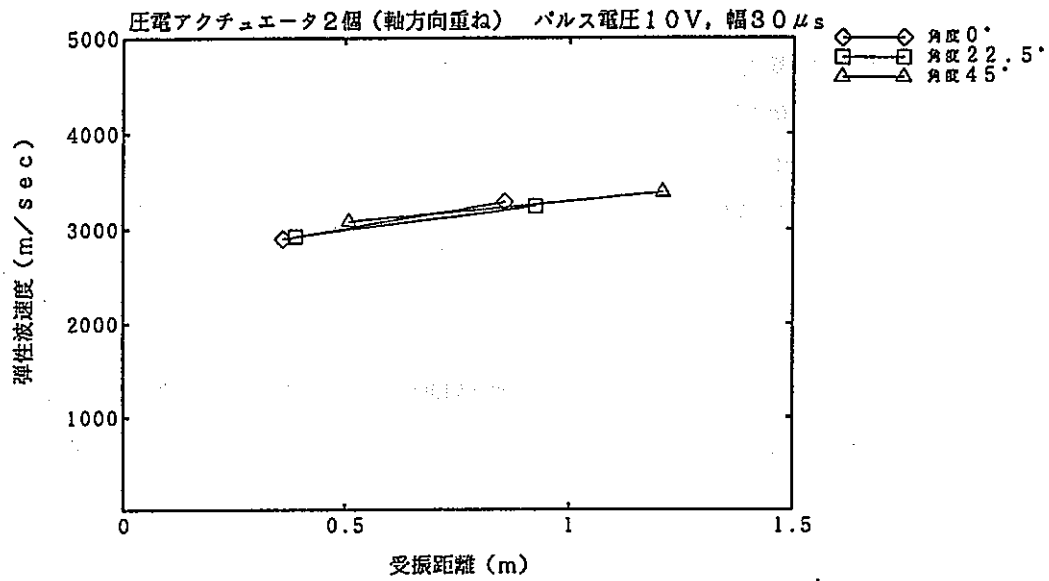


図-5.35 P波速度

初動振幅では、各角度で受振距離に伴う振幅の大きさの傾きが異なるが、角度が小さいほど減少が大きい。また、初動周波数は角度0°と22.5°では25KHz～20KHzであるのに対し、角度45°では30KHz～40KHz程度と受振距離に伴って増加を示している。一方、P波速度は3000m/s程度で、受振距離に伴って速度が速くなる傾向がある。

圧電アクチュエータ2個（軸方向連結）側壁発振 受振素子A孔 パルス電圧10V パルス幅30 μ s

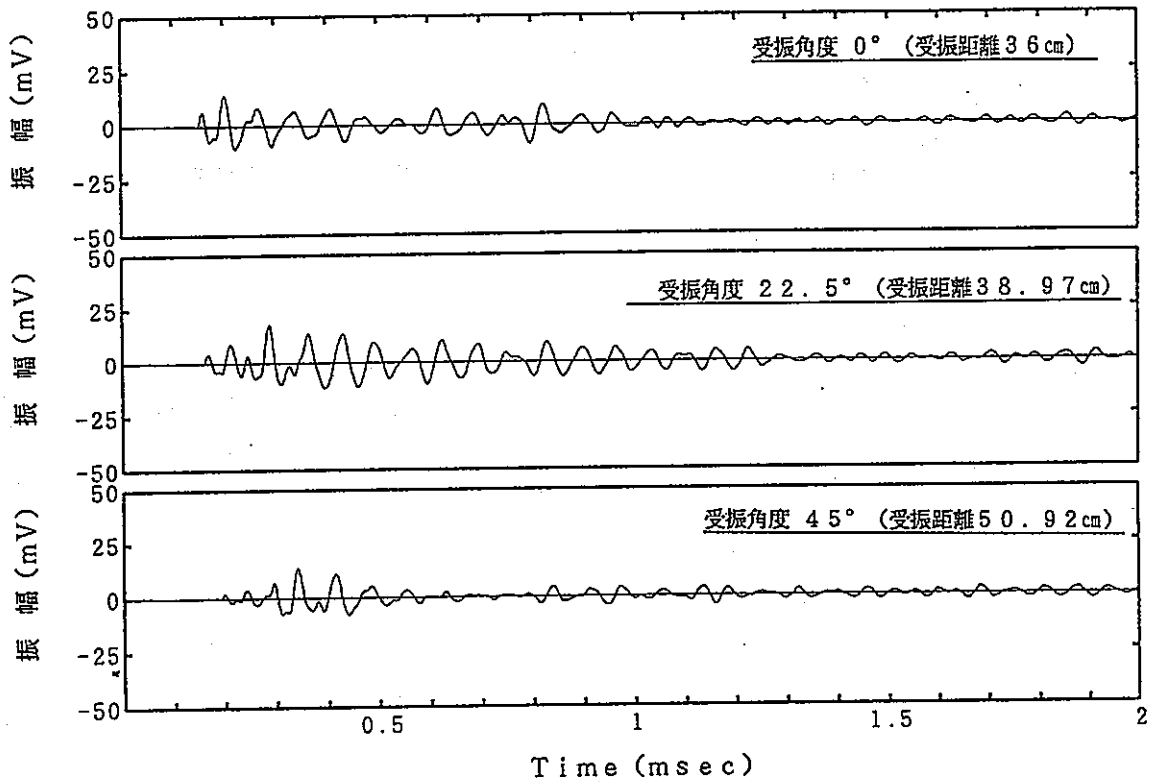
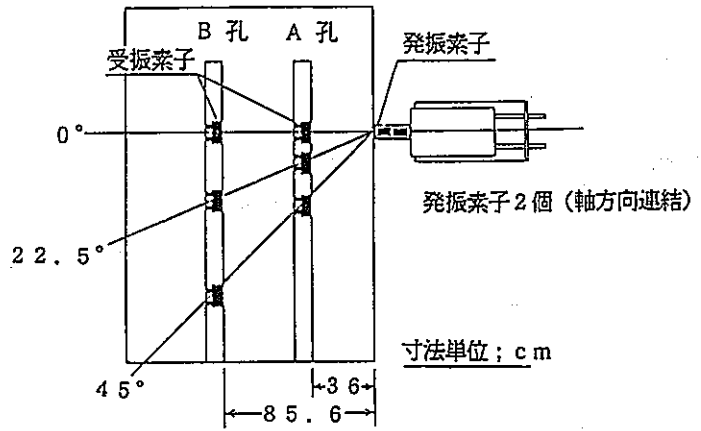


図-5.36 A孔での受振波動

6. 考察

6.1 圧電素子の初動振幅と周波数特性

(1) 初動振幅

① 電圧の影響

初動振幅に対する電圧の影響の例を表-6.1に示すが、圧電素子に加えられる電圧が大きくなるに従い、比例的に初動振幅も大きくなっている。発振可能な初動振幅に限界はあるものの、その範囲内では大きな電圧をかける程、大きな初動振幅（発振エネルギー）が得られると考えられる。なお、表中に初動振幅値は電圧で表示しているが、 $980\text{gal}=100\text{mV}$ で加速度値で表示することもできる。

表-6.1 初動振幅に対する電圧の影響

電 圧 (V)	10	30	50
初動振幅 (mV)	7.73	22.27	36.48

(圧電素子1個、矩形パルス幅 $10\mu\text{s}$ 、発振・受振点間距離 50cm)

② 矩形パルス幅の影響

ほとんどの実験ケースで矩形パルス幅が $10\mu\text{s}$ のときに最も大きな初動振幅を示している。本実験に用いた圧電素子(NBL45282HA1)は、共振周波数が 28kHz であり、正弦波的なパルスを入力した場合には半波長の時間 $18\mu\text{s}$ で共振現象を起こすと考えられる。しかし、測定結果では矩形パルス幅 $20\mu\text{s}$ よりも $10\mu\text{s}$ の方が大きな初動振幅が得られており、共振現象を起こすパルス幅が矩形パルスの場合には、より小さくなっていると考えられる。

③ 圧電素子数、および配置の影響

圧電素子数および配置について電圧 30V 、矩形パルス幅 $10\mu\text{s}$ 、発振・受振点間距離 50cm のケースを例にとり表-6.2に示す。圧電素子を2個並列に使用した場合（中央固定方式、振り分け方式ともに）では、素子間隔 $5\text{cm}\sim 10\text{cm}$ の発振で、圧電素子1個の発振の約2倍程度の初動振幅が得られており、2つの振源から発生した弾性波波動が重なり合っていると考えられる。しかし、素子間隔が広くなるに伴い、初動振幅は小さくなっており、発振装置に圧電素子を組み込む際には、その素子間

隔を必要以上に大きくしないことが必要と思われる。また、圧電素子3個並列の場合では、2個の場合に比べて大きな初動振幅を得ることができるが、1個の場合の3倍にはなっていない。

圧電素子を2個直列に発振させた場合では、非常に小さい波動しか測定されていない。この原因として、素子の設置治具の問題、あるいは2つの弾性波波動の干渉が考えられるが、いずれが主要因であるかは不明である。

表-6.2 圧電素子数、配置の影響

<中央固定方式>

数・配置	1個	2個 素子間隔		
	中心	5	10	20
初動振幅	27.97mV	60.55	55.66	35.63

<中央振り分け方式>

数・配置	1個	2個 素子間隔		
	中心	5	10	20
初動振幅	34.06mV	66.02	72.66	59.96

<3個並列、2個直列>

数・配置	3個並列	2個直列
初動振幅	79.69mV	0.128

(素子間隔5cm)

④ 発振・受振点間距離の影響

発振・受振点間距離の違いによる初動振幅への影響の例を表-6.3に示す。圧電素子1個の場合と2個並列の場合では、見かけ上の振幅減衰に差があることが分かる。これは、複数の圧電素子を使った場合に受振される波動は合成波であり、発振・受振点間距離によって干渉具合が異なること、さらに、圧電素子単体の発振時の指向性なども影響していると考えられる。

表-6.3 初動振幅に対する発振・受振距離の影響

<素子1個の場合、電圧30V、矩形パルス幅10μs>

発振・受振距離	50cm	100cm	150cm	備考
初動振幅 (mV)	27.42	10.55	0.017	
振幅比	0.384756	0.001611		
振幅減衰定数 α	1.91	12.86		平面波で整理
	3.30	14.25		球面波で整理

<素子2個並列の場合、中央振り分け素子間隔10cm、
電圧30V、矩形パルス幅10μs>

発振・受振距離	50cm	100cm	150cm	備考
初動振幅 (mV)	72.66	10.70	0.023	
振幅比	0.147261	0.002150		
振幅減衰定数 α	3.83	12.28		平面波で整理
	5.22	13.67		球面波で整理

平面波： $A/A_0 = \exp(-\alpha L)$

球面波： $A/A_0 = \exp(-\alpha L) / L$

圧電素子2個（中央振り分け）での素子間隔と振幅比の関係を表-6.4に示す。この表より、若干ではあるが、素子間隔によって振幅比に違いがあり、発振・受振点間距離によっては最適な素子間隔が異なる可能性があることが分かる。

表-6.4 素子間隔の振幅比に対する影響

素子間隔 (cm)		5	10	15	20
初動振幅 (mV)	発・受 50cm	66.02	72.66	67.58	59.96
	発・受 100cm	12.30	10.70	8.16	9.06
振幅比		0.186	0.147	0.121	0.151

(圧電素子2個、中央振り分け、電圧30V、矩形パルス幅10 μ s)

一方、発振・受振点間距離50cm~100cmと100cm~150cmでは、振幅比、減衰定数ともに大きく異なっており、後者の方が減衰が激しい。全ての実験ケースにおいて弾性波P波速度には変化がほとんどなく、振幅のみ減衰が激しいという現象になっている。

この原因の1つとして、受振用に穿孔したボーリング孔(ϕ 75mm)の影響が考えられる。そこで、図-6.1に示すように、発振点から2番目のボーリング孔内に受振装置を設置し、1番目の孔に水がある場合とない場合での弾性波伝播特性の相違を測定した。その結果では、孔内の水の有無による相違は見られず、ボーリング孔の影響は少ないと考えられた。また、原因としてはボーリング孔100cm~150cm間に亀裂が発生したことも考えられるが、試験体壁面には亀裂が確認されておらず、明確な原因とは言えない。そのため、100cm~150cm間の測定結果については参考値として取り扱うものとした。

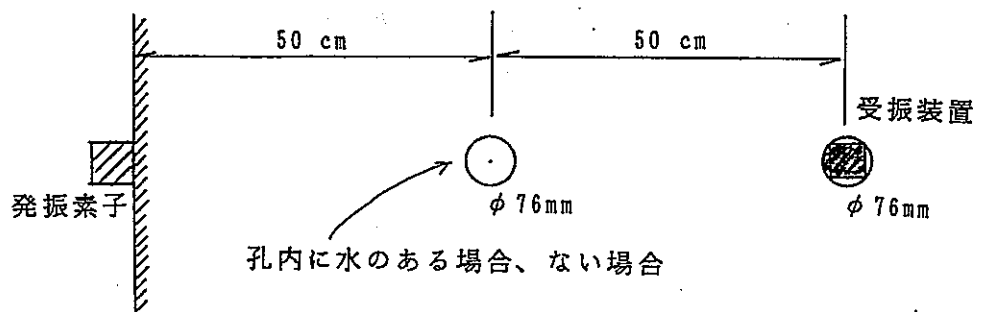


図-6.1 ボーリング孔の影響確認測定

(2) 周波数

圧電素子に与える電圧と素子の数・配置による初動振幅の周波数を表-6.5に示す。電圧にかかわらず、発振されている初動の周波数はほぼ一定であるが、圧電素子を複数配置することにより、周波数が低下している。1個の圧電素子からの発振は変わらないと考えられるので、複数個配置することにより、波動の干渉などが生じ、周波数が見かけ上低下していると考えられる。

一方、発振・受振点間距離による周波数の変化を表-6.6に示す。発振・受振点間距離が延びる程測定された初動振幅の周波数は低下しており、波動の干渉によってできた波動の周波数が低くなっていると考えられる。

表-6.5 初動波動の周波数

電圧 (V)	10	30	50
圧電素子 1 個	50KHz	50KHz	50KHz
2 個並列中央固定 10cm		40KHz	
振り分け 10cm		40KHz	
3 個並列		40KHz弱	
2 個直列		30KHz	

(短形パルス幅 $10\mu s$ 、発振・受振点間距離 50 cm)

表-6.6 圧電素子 1 個での初動波動の周波数

発振・受振点間距離 (cm)	50	100	150
周波数	50KHz	40KHz	30KHz

(電圧 30 V、短形パルス幅 $10\mu s$ 、発振・受振点間距離 50 cm)

6.2 圧電アクチュエータの初動振幅と周波数特性

(1) 初動振幅

① 電圧の影響

圧電アクチュエータの場合、圧電素子と大きく異なる点は、素子に与える電圧を増加させても電圧10V以上では初動振幅が大きくなり、表-6.7に示すように一定値の状態にあることである。

表-6.7 初動振幅に対する電圧の影響

電 圧 (V)	3	10	20
初動振幅 (mV)	20.08	27.73	29.69

(素子1個、短形パルス幅 $30\mu\text{s}$ 、発振・受振点間距離 50cm)

この原因としては、圧電アクチュエータの変形量が $15\mu\text{m}/100\text{V}$ と非常に小さいにもかかわらず、本実験では反力ブロックにより発振素子をモルタルブロックに押しつけて発振させる方法（反力ブロック使用）を用いており、剛拘束状態にはしていないことが考えられる。この点を検討するために、図-6.2に示すように圧電アクチュエータをアラルダイト樹脂でコーキングし、拘束状態にして発振させる測定を行った。拘束状態としては圧電アクチュエータの全周を樹脂で固めたもの（樹脂固化）、片面に厚鉄板を配して樹脂で固めたもの（樹脂固化+鉄板）の2種類である。

その結果を図-6.3に示すが、拘束状態により初動振幅の大きさが異なり、樹脂固化、反力ブロック使用、樹脂固化+鉄板の順番で初動振幅が大きくなっていることが明かである。したがって、圧電アクチュエータの拘束状態によっては変形力が十分に発振エネルギーに変換されない可能性があることが分かった。

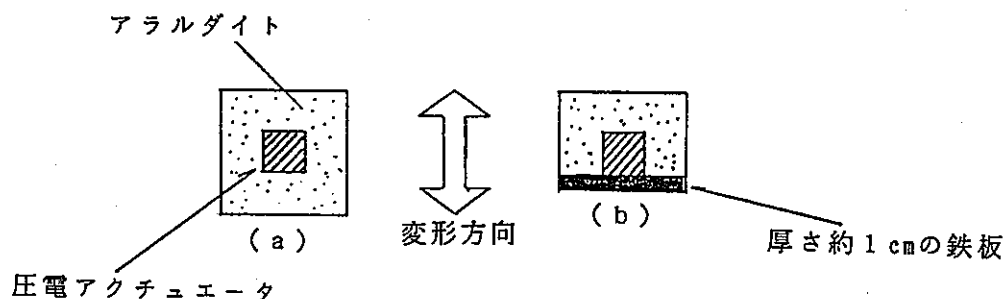


図-6.2 圧電アクチュエータの拘束方法

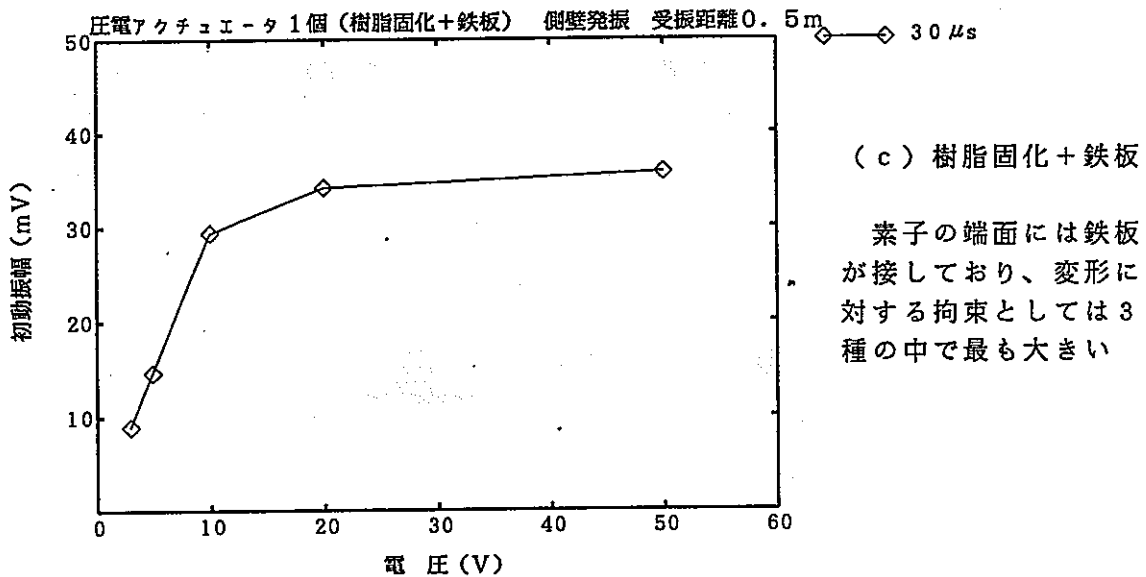
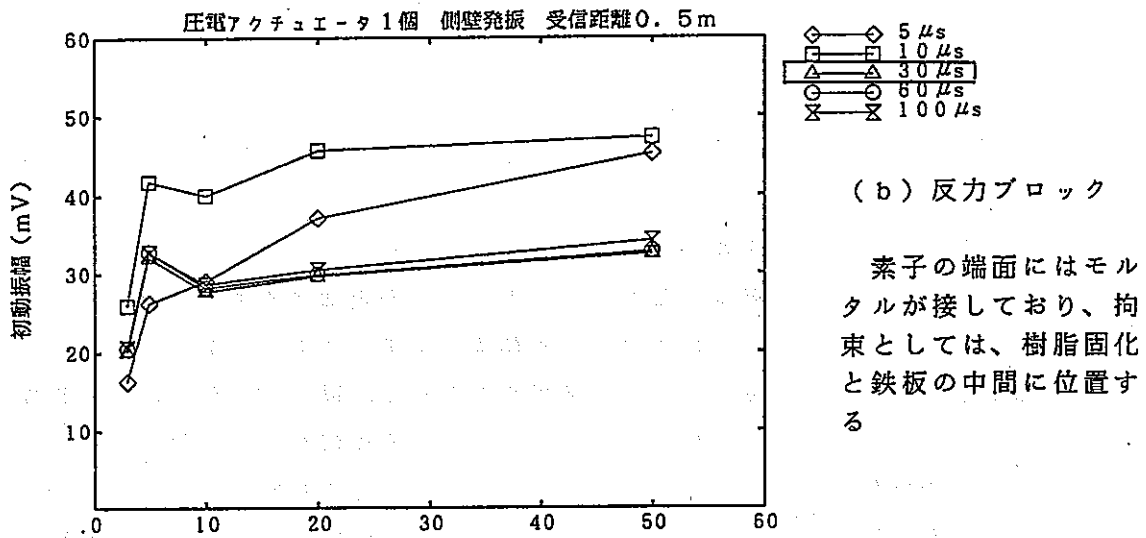
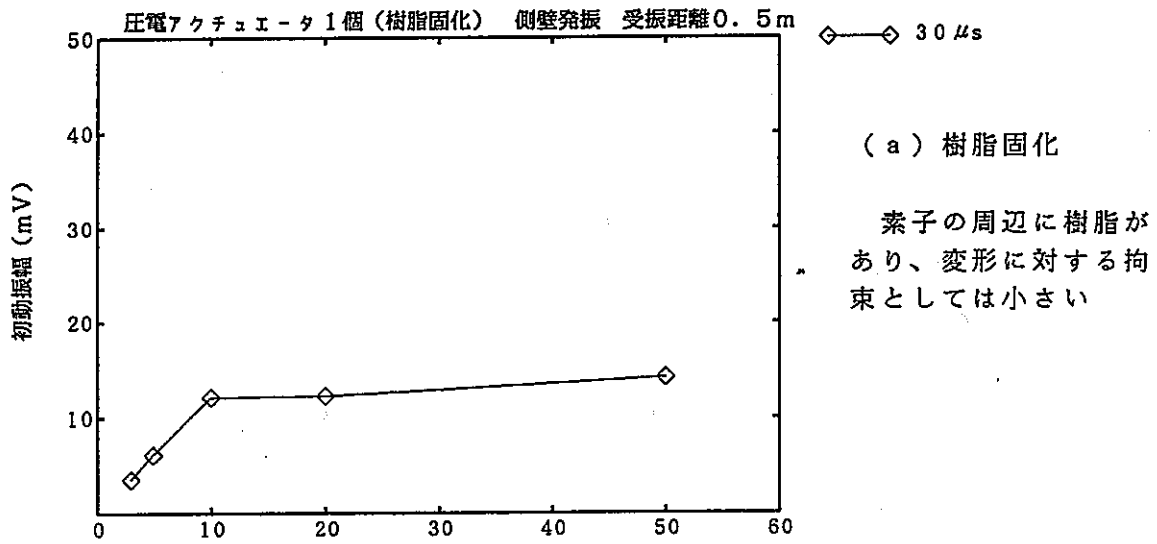


図-6.3 拘束の違いによる測定結果

② 矩形パルス幅の影響

矩形パルス幅が $10\mu\text{s}$ のときに、最も大きな初動振幅が得られるが、パルス幅を $100\mu\text{s}$ 程度まで長くしても変化せず、矩形パルス幅の影響はない。

③ 圧電アクチュエータ数、および配置の影響

圧電アクチュエータ数および配置について電圧 10V 、矩形パルス幅 $30\mu\text{s}$ 、発振・受振点間距離 50cm のケースを例にとり表-6.8に示す。素子を2個並列に使用した場合（中央固定方式、振り分け方式ともに）、および3個並列の場合では、素子1個の発振とほぼ同様な初動振幅しか得られておらず、圧電素子と同じ設置方法、発振機器類に問題があった可能性がある。また、素子を2個直列に発振させた場合では、非常に小さい波動しか測定されていない。この原因として、素子の設置治具の問題、あるいは2つの弾性波波動の干渉が考えられるが、いずれが主要因であるかは不明である。

表-6.8 圧電アクチュエータ数、配置の影響

<中央固定方式>

数・配置	1個	2個 素子間隔		
	中心	5	10	20
初動振幅	50.78mV	42.97	33.01	15.86

<中央振り分け方式>

数・配置	1個	2個 素子間隔		
	中心	5	10	20
初動振幅	50.7 mV	26.76	34.38	30.66

<3個並列、2個直列>

数・配置	3個並列	2個直列
初動振幅	34.77mV	19.92

（素子間隔5cm）

④発振・受振点間距離の影響

発振・受振点間距離の違いによる初動振幅への影響の例を表-6.9に示す。圧電アクチュエータ1個の場合も圧電素子と同様な傾向がある。

表-6.9 初動振幅に対する発振・受振距離の影響

<素子1個の場合、電圧10V、矩形パルス幅30μs>

発振・受振距離	50cm	100cm	150cm	備考
初動振幅 (mV)	27.73	6.25	0.234	
振幅比	0.225388		0.03744	
振幅減衰定数 α	2.98	6.57	平面波で整理	
	4.37	7.96	球面波で整理	

<素子2個並列の場合、中央振り分け素子間隔10cm、
電圧10V、矩形パルス幅30μs>

発振・受振距離	50cm	100cm	150cm	備考
初動振幅 (mV)	38.38	10.94	0.141	
振幅比	0.285044		0.012889	
振幅減衰定数 α	2.51	8.70	平面波で整理	
	3.90	10.09	球面波で整理	

平面波： $A/A_0 = \exp(-\alpha L)$

球面波： $A/A_0 = \exp(-\alpha L) / L$

(2) 周波数

圧電アクチュエータ素子に与える電圧と素子の数・配置による初動振幅の周波数を表-6.10 に示す。圧電アクチュエータでの初動波動の周波数は圧電素子の場合より低く20KHz 程度であるが、電圧や数、配置にかかわらず、発振されている初動の周波数はほぼ一定である。一方、発振・受振点間距離による周波数の変化を表-6.11 に示す。この場合も発振・受振点間距離に関わらず初動振幅の周波数は一定である。

表-6.10 初動波動の周波数

電圧 (V)	10	30	50
圧電アクチュエータ 1 個	20KHz	20KHz	20KHz
2 個並列中央固定 10cm		20KHz	
振り分け 10cm		20KHz	
3 個並列		20KHz	
2 個直列		20KHz	

(短形パルス幅 $30 \mu s$ 、発振・受振点間距離 50 cm)

表-6.11 圧電アクチュエータ 1 個での初動波動の周波数

発振・受振点間距離 (cm)	50	100	150
周波数	20KHz	20KHz	20KHz

(電圧 10 V、短形パルス幅 $30 \mu s$ 、発振・受振点間距離 50 cm)

6.3 指向特性

(1) 圧電素子

圧電素子での振幅減衰定数を算定した結果を表-6.12に示す。

表-6.12 指向特性の結果

<圧電素子1個、電圧30V、短形パルス幅10 μ s>

角度 (°)		0	22.5	45	備考
伝播距離 (m)		0.5	0.54	0.71	
初動振幅 (mV)	A孔	2.75	1.17	0.937	
	B孔	0.148	0.494	0.041	
振幅比		0.0538	0.4222	0.0138	
振幅減衰定数 $\alpha 1$		5.84	1.6	6.03	平面波
振幅減衰定数 $\alpha 2$		7.23	2.74	6.51	球面波

<圧電素子2個、中央振り分け10cm、電圧30V、短形パルス幅10 μ s>

初動振幅 (mV)	A孔	2.93	0.805	0.766	備考
	B孔	0.180	0.228	0.021	
振幅比		0.0614	0.2832	0.0274	
振幅減衰定数 $\alpha 1$		5.58	2.34	5.66	平面波
振幅減衰定数 $\alpha 2$		6.27	3.48	5.55	球面波

(2) 圧電アクチュエータ

圧電アクチュエータでの振幅減衰定数を算定した結果を表-6.13に示す。

表-6.13 指向特性の結果

<圧電アクチュエータ1個、電圧30V、短形パルス幅10 μ s>

角度 (°)		0	22.5	45	備考
伝播距離 (m)		0.5	0.54	0.71	
初動振幅 (mV)	A孔	10.43	5.74	3.16	
	B孔	1.26	1.8	0.156	
振幅比		0.1208	0.3135	0.0494	
振幅減衰定数 $\alpha 1$		4.23	2.15	4.24	平面波
振幅減衰定数 $\alpha 2$		5.61	3.29	4.72	球面波

<圧電アクチュエータ2個、中央振り分け10cm、電圧30V、短形パルス幅10 μ s>

初動振幅 (mV)	A孔	3.93	4.98	0.19	備考
	B孔	0.539	0.59	0.014	
振幅比		0.1372	0.1185	0.0639	
振幅減衰定数 $\alpha 1$		3.97	3.95	3.87	平面波
振幅減衰定数 $\alpha 2$		5.36	5.09	4.36	球面波

(3) 指向特性の考察

表-6.12、表-6.13の結果より、測定されている波動を平面波と仮定しても誤差が小さいと考えられるため、測定されている波動を平面波として取り扱って、次式により発振点での初動振幅を算定する。

$$A_0 = A / [\exp(-\alpha L)]$$

表-6.14に算定結果を示すが、4ケース全てにおいて角度 22.5° の算定結果は他の結果と傾向が異なると考えられ、考察の対照から除外する。この原因の1つには受振装置側の特性があると思われるが主原因は不明である。

圧電素子1個の場合、0°と45°での測定結果から算定した発振点における初動振幅の大きさはほぼ一致しており、指向性はほとんど認められない。また、圧電素子2個並列の場合、45°での推定値は0°での推定値の約6割であり、受振の方向によって伝播してくる初動振幅の大きさが異なる、つまり指向性がやや強いことが分かる。

一方、圧電アクチュエータでは、1個の場合に圧電素子2個並列と同程度の指向性が、2個並列の場合には0°と45°方向での推定値の差が大きく、強い指向性が現れていると考えられる。

表-6.14 発振点での初動振幅の推定（平面波の式による）

角度 (°)	0	22.5	45
伝播距離 (m)	0.36	0.39	0.51
圧電素子 1個	22.5	2.18	20.3
圧電素子 2個 中央振り分	21.8	2.0	13.7
圧電アクチュエータ 1個	47.8	13.3	27.5
圧電アクチュエータ 2個 中央振り分	16.4	23.2	1.4

7. まとめ

7.1 試験結果のまとめ

圧電素子による試験結果のまとめを表-7.1に示す。

表-7.1 試験結果のまとめ（圧電素子）

<発振因子と初動振幅、初動周波数の関係>

因 子		初動振幅	初動周波数
電 圧	10～50 V	比例的に増加	ほぼ一定
矩形パルス幅	5～100 μ s	10 μ s で最大	ほぼ一定
素子数	並列2、3個	2個では1個の約2倍 3個では1個の3倍以下	個数が増えると低下
素子間隔	並列5～20 cm	間隔5～10 cmで最大	ほぼ一定
素子配置	並列、直列	直列では非常に小さい	直列は低い
発・受距離	50～150 cm	距離とともに減衰 平面波で整理して 減衰定数 $\alpha = 2.5 \sim 3.0$	距離とともに低下

<指向特性>

因 子	発振1個	発振2個並列
指向性	指向性は少ない	指向性がある

圧電アクチュエータによる試験結果のまとめを表-7.2に示す。圧電アクチュエータの発振では、素子の拘束状態が剛になると、初動振幅が大きくなる傾向があり、素子の拘束状態も発振力を左右する因子になると思われる。

表-7.2 試験結果のまとめ（圧電アクチュエータ）

<発振因子と初動振幅、初動周波数の関係>

因 子		初動振幅	初動周波数
電 圧	3～50 V	10 V 以上は一定	ほぼ一定
矩形パルス幅	5～100 μ s	10 μ s で最大	ほぼ一定
素子数	並列2、3個	2個では1個とほぼ同じ 3個では1個の約65%	ほぼ一定
素子間隔	並列5～20 cm	間隔5cmで最大	ほぼ一定
素子配置	並列、直列	直列では1個の約40%	ほぼ一定
発・受距離	50～150 cm	距離とともに減衰	やや低下傾向

<指向特性>

因 子	発振1個	発振2個並列
指向性	指向性は少ない	指向性がある

7.2 試錘孔内での高周波の弾性波振源について

圧電素子の単体の発振では初動周波数50KHz とかなり高い弾性波波動を発振しているが、伝播距離（発振・受振点間距離）が長くなると、初動周波数が低下する傾向にある。一方、圧電アクチュエータでは単体の発振で初動周波数20KHz で圧電素子に比べると伝播距離による初動周波数の低下はほとんどみられず、伝播距離が長くなると50KHz 程度の周波域の弾性波波動を用いた測定は難しくなると予想される。これらの試験結果および開発の対象としている振源が岩盤中で使用されることを考え合わせると、振源（装置を含む）の初動周波数は10KHz～20KHz程度が適当と考えられる。

本研究の結果、電圧や個数により発振時の初動振幅を増加することが確認されている。測定は市販の発振素子を用いて行ったが、目的に応じた圧電素子や圧電アクチュエータ素子を製作することも可能である。したがって、装置の10KHz～20KHzに固有周波数を持つ、発振力を大きくした単体の素子を製作し、それで発振力が不足する場合には素子数を増加させる方針による装置の開発が適切と考えられる。また、素子の配置は試錘孔内に装置を設置する方法（孔壁に直接伝播、水を介して伝播）によって、多少の違いがあると思われる、設置方法も考慮する必要がある。

また、本研究ではパルス波による測定を対象としたが、連続波による測定手法も有効と考えられるため、振源はパルス波、連続波のいずれも発振できることが望ましいと考えられる。

参考文献

- 1) 物理探鉱技術協会：土木弾性波探査法、昭和52年
- 2) (株)地球科学総合研究所：JGI TECHNICAL NEWS No.107 -SEISMIC SURVEY WITH VIBRATORY ENERGY SOURCE-
- 3) 吉村正義、内山成和：新しい孔中爆薬振源（OWS）、全地連「技術フォーラム92」、pp.159-162、1992
- 4) Kimio OGURA, Masaki OSADA and Takeichiro OHASHI: Downhole Seismic Source Based on New Concept, 2nd. SEGJ/SEG International Symposium Geotomography, 1992
- 5) 蓮井昭則、世一英俊、平井光之：岩盤における鋼管弾性波測定システムとその適用について、間組研究年報1988年版、pp.79-87、1988



資料－１ 打ち合わせ議事録

①平成５年１２月２１日 試験検討会

②平成６年 １月３１日 試験結果検討会

議 事 録

No. 1

件名	試錐孔用高周波弾性波振源開発のための基礎データの取得業務打合せ		日時	平成5年12月21日 13:00~17:00	
	実験結果の検討		場所	ハザマ技術研究所 401会議室および 岩盤実験棟	
出席者	(動力路・核燃料開発事業団) 長谷川 健 氏	配布資料	・実験実施計画書		
	(ハザマ) 島辺 (ハザマ 原子力部) 蓮井 (同 技術研究所)				
検印	動燃 長谷川氏		ハザマ 島辺課長		(記録) 蓮井
議事	<p>1. 実験実施計画について</p> <p>① 素子の納品が遅れたため、当初予定より実施が約1~2週間遅れている。</p> <p>② 実験計画に基づいて1月より実験を開始する。</p> <p>2. 実験立ち会い</p> <p>① 実験準備段階での弾性波発振の試行を実施</p> <p>3. その他</p> <p>① 実験結果がある程度まとまった段階で、再度実験の立ち会い、結果の検討を行う。</p> <p>② ハザマ 技術研究所 所内見学</p> <p style="text-align: right;">以 上</p>				

実験計画

1. 実験目的

孔間弾性波測定 of 振源の設計に必要な基礎データの取得

2. 基礎実験フロー

< 既存技術調査 >

情報の収集

- ・ 孔間弾性波測定方法
- ・ 発振方法
- ・ データ処理、トモグラフィ方法

発振方法を検討するために必要な基礎データの検討

- ・ 発振周波数、エネルギー
- ・ 市販の発振素子の調査

基礎実験概要の立案

< 実験準備 >

モルタル試験体の作成
 ホーリング孔の穿孔
 発振素子の納品
 発振素子の作動確認
 反力ブロックの設置治具の製作
 発振素子のコーキング、設置治具の製作
 実験内容の詳細検討

< 基礎実験 >

実験 1 (側壁を用いた発振) サンプルテスト 1

- ・ 発振の基本特性
- ・ 1-1 : 圧電素子 ・ 1-2 : アクチエータ
- ・ 単数、複数 ・ 電圧、パルス幅

実験 2 (側壁を用いた発振)

- ・ 指向性
- ・ 2-1 : 圧電素子 ・ 2-2 : アクチエータ
- ・ 単数、複数

実験 3 (孔内での水中の発振)

- ・ 3-1 : 圧電素子 (3-2 : アクチエータ)
- ・ 単数、複数 ・ 発振間隔 (共振の可能性)

実験 4

- ・ リニアモータ

実験 5 (連続波)

サンプルテスト 2

- ・ 側壁あるいは水中
- ・ 単数 ・ 圧電素子あるいはアクチエータ

< まとめ >

- ・ データ処理結果
- ・ 採用発振方法の検討、改良の可能性の専門家の検討

3. 測定方法

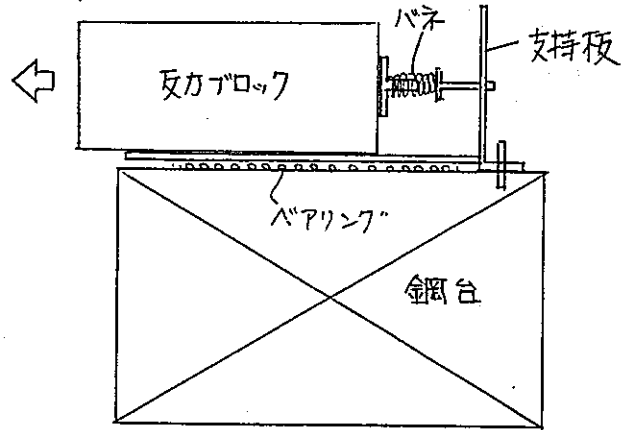
① 発振素子の設置方法

② 受振方法

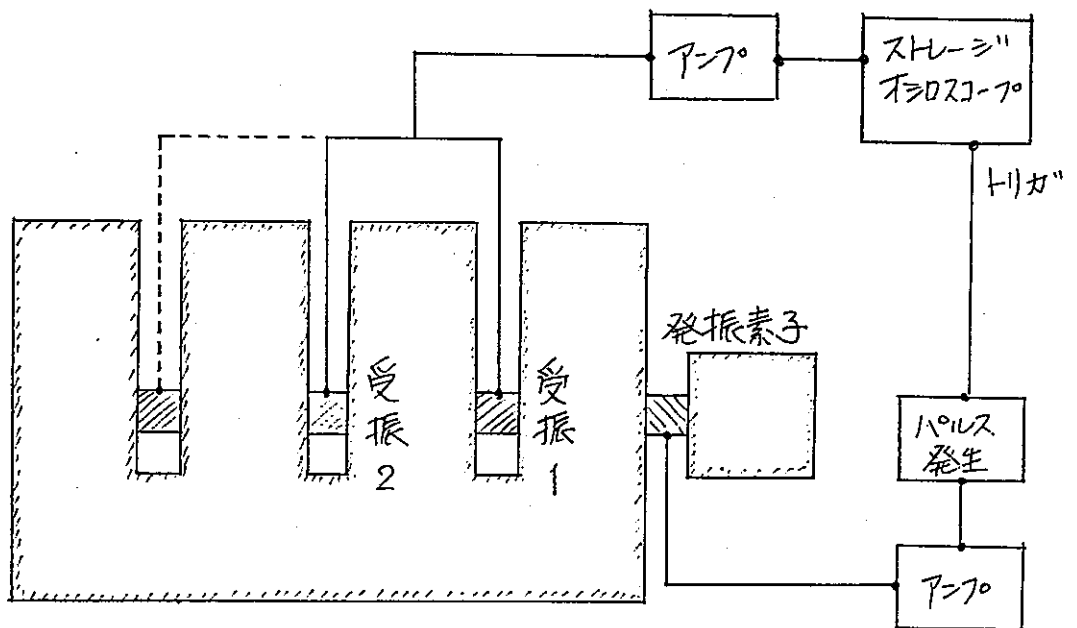
発振トリガー、側壁表面、受振1、受振2

③ データ処理方法

- ・ 立ち上がり → 走行時間
- ・ 波形 → 周波数、振幅、波形の面積 (エネルギー)
- ・ スペクトル分析 → 卓越周波数、パワースペクトル
- ・ 因子の影響、発振素子の影響



設置方法



測定方法
(実験1)

4. 実験内容

実験 1

圧電素子と圧電アクチュエータを用いた発振の基本特性を把握する。実験は素子個数、および電圧とパルス幅（単一波）による因子を組み合わせで実施する。

< 実験 1 - 1 >

圧電素子 (NBL45282H) : 1 個、2 個以上

- ① 固有振動数（共振点）の把握
パルス幅を連続的に変化させ、最大の発振を得る共振周波数を実験的に求める
- ② 発振の再現性のチェック
共振点付近のパルスを発生させ、1 波毎の受振波動の再現性を把握する
- ③ 実験因子（電圧、パルス幅）による基礎実験

		電 圧				
		10V	20V	30V	40V	50V
パ ル ス 幅	50					
	100					
	200					
	400					
	1000					

< 実験 1 - 2 >

圧電アクチュエータ (NLA10*10*18) : 1 個、2 個以上

- ① 固有振動数（共振点）の有無の把握
- ② 発振の再現性のチェック
- ③ 実験因子（電圧、パルス幅）による基礎実験
実験 1 - 1 と同様に、因子の組み合わせで測定を実施する

		電 圧				
		10V	20V	30V	40V	50V
パ ル ス 幅	50					
	100					
	200					
	400					
	1000					

実 験 2

圧電素子と圧電アクチュエータについて実験1で得られたデータから適当な電圧とパルス幅の組み合わせを選定し、その組み合わせによる発振の指向性を把握する。指向性の範囲は、0°（発振正面）、22.5°、45°（正方形の対角線）の3通りとする。

<実験2 - 1 >

圧電素子（NBL45282H）：1個

<実験2 - 2 >

圧電アクチュエータ（NLA10*10*18）：1個

実 験 3

圧電素子（実験1の状況によっては圧電アクチュエータも追加）について、水中発振での特性について把握する。圧電素子2個での発振の場合、素子間の間隔による発振特性に関しても測定を行う。

圧電素子（NBL45282H）：1個

①固有振動数（共振点）の把握

②発振の再現性のチェック

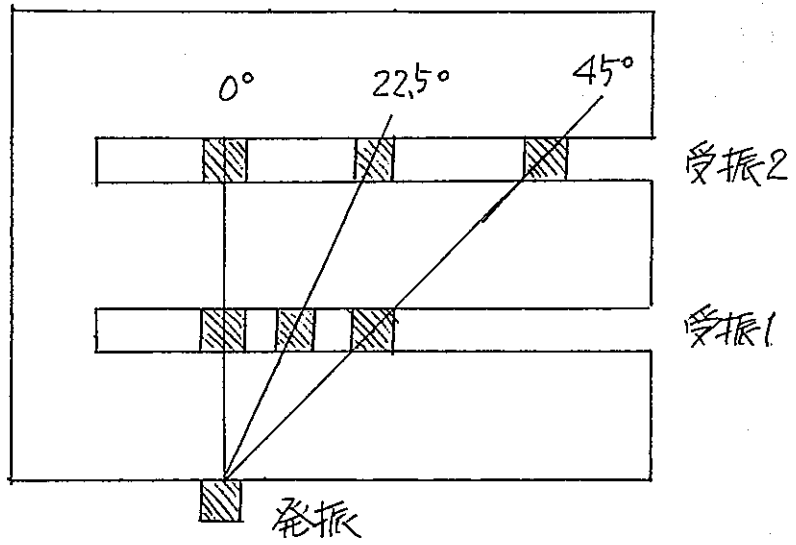
③実験因子（電圧、パルス幅）による基礎実験

		電 圧				
		10V	20V	30V	40V	50V
パ	50					
ル	100					
ス	200					
幅	400					
	1000					

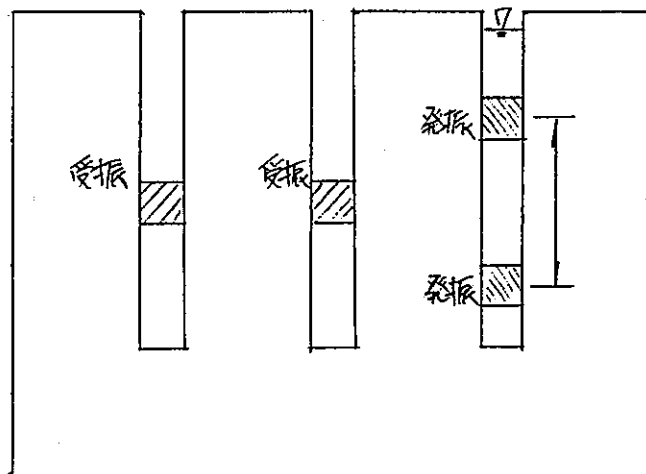
圧電素子（NBL45282H）：2個

実 験 4

リニアモータを用いて実験1と同様に、基本特性の把握を試みる。ただし、リニアモータが実験途中で破損する可能性もあるため、破損した場合は、実験を後回しにする。設置治具は未検討。



實驗 2



實驗 3

実 験 5

圧電素子（1個）を用いて、連続的に変化するパルス波を入力し、連続波による発振の能力を把握する。

- ・単一波と連続波の検出可能距離の比較
- ・連続波のデータ処理方法
- ・サイン波、矩形波

5. 実験工程



現在、実験開始が当初計画に比べて1週間程度遅れている。

概略工程

	1 2 月	1 月	2 月	3 月
実験準備	—————	—————		
基礎実験 1 2 3 4 5	—————	— — — —————		
まとめ			—————	
報告				—

議 事 録

No. 2

件名	試錐孔用高周波弾性波振源開発のための基礎データの取得について		日時	平成6年1月31日 13:00~17:00	
	実験結果の検討		場所	ハザマ技術研究所 会議室および実験場	
出席者	○動力路・核燃料開発事業団 長谷川 健 氏		配布資料	・実験結果一覧表 他	
	○ハザマ 島辺 (ハザマ 原子力部) 蓮井 (同 技術研究所)				
検印	動燃 長谷川氏		ハザマ 島辺課長		(記録) 蓮井
議事	<p>1. 実験結果の報告および検討 実験結果について報告を行い、結果の評価について討議した。 また、報告内容についても検討を行った。 ・スペクトル分析を実施する。</p> <p>2. 実験の立ち会い</p> <p>3. その他 3月2日に報告書を提出する。</p> <p style="text-align: right;">以 上</p>				

資料－２ 既存技術のヒヤリングメモ

①ヒヤリング結果まとめ

②専門家ヒヤリングのメモ

ヒヤリング結果

(高周波波動による孔間弾性波の可能性について)

ハザマ 技術研究所

1. はじめに

石油探査関係者と土木コンサルタント関係者の2名に、高周波波動による孔間弾性波測定の可能性についてヒヤリングを行った。本書はその結果を基に、弾性波の孔内発振方法、孔内受振方法についての現状と課題についてまとめたものである。

ダイナマイト等の爆薬を使用しない孔内の発振方法は大きくインパルスタイプと連続波タイプに分けられる。そのうち、インパルスタイプでは、孔内で高周波波動を発生する可能性の高い方法としてスパーク、OWS、圧電素子式を、連続波タイプでは圧電素子式を中心にヒヤリングした。なお、ハザマ式に関してはヒヤリングの対象から除いた。

受振方法については受振の諸元項目を整理し、項目毎ので適用性を検討した。

2. ヒヤリング

2. 1 発振方法に対するヒヤリング

(1) インパルスタイプと連続波タイプについて (図-1 参照)

インパルスタイプ

- ① インパルスタイプでは、発振と同時に種々の周波数の波動が発生するため、パルス状の波動のみを作ることは難しい。ただし、低周波数のみに限定すれば、可能性はある。
- ② 装置内で発生させた振動は装置内での反射、あるいは水を介した岩盤への伝達の場合の孔壁での反射などの影響を除くことは難しい。
- ③ 開発の可能性のある対象を絞り込むと、以下の3方法程度である。また、複数の圧電素子を用いる方法も検討する価値がある。
 - ・ スパーカー、
 - ・ OWS、
 - ・ ハザマ式

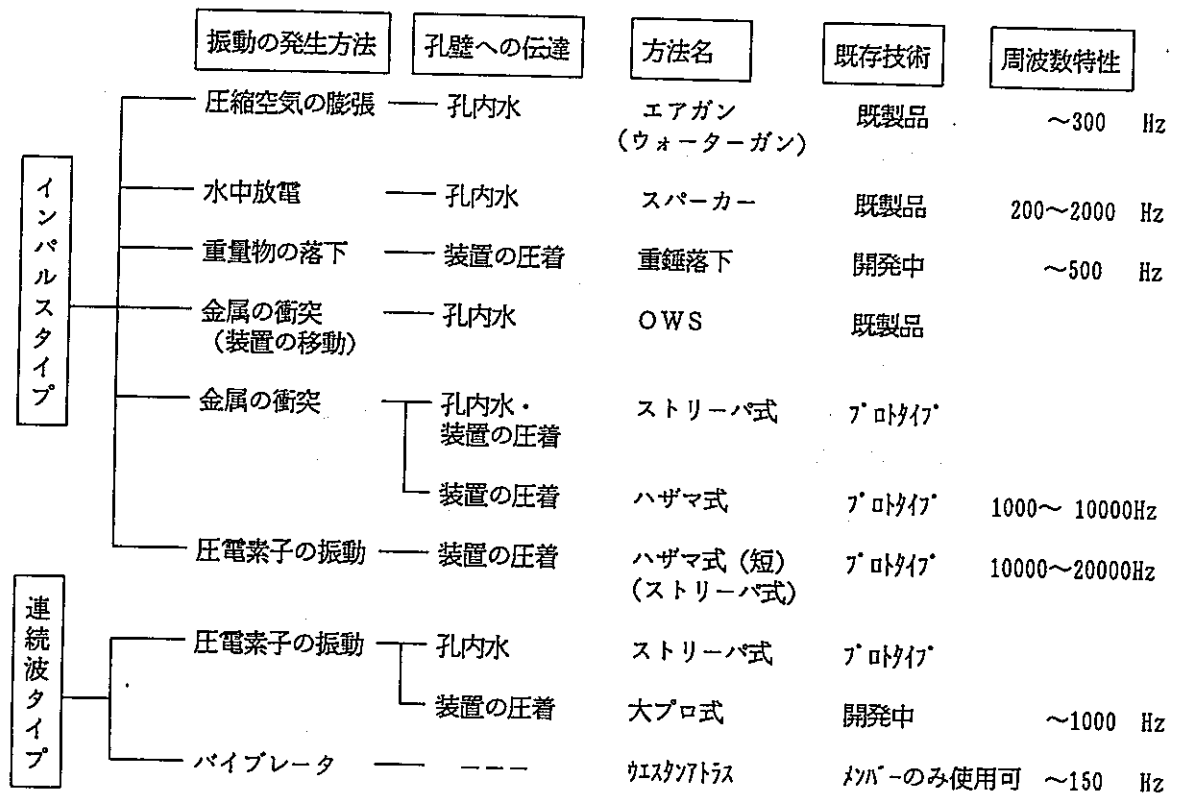


図-1 発振方法の種類

連続波タイプ

- ① 連続波は、発振エネルギーに比べて広い範囲を調査できる方法であり、言い換えれば、衝撃式に比べて小さなエネルギーで対象とする調査範囲を測定できる方法である。
- ② 発振周波数に限界があり、現在、実験的も含めて1 KHz程度が最大である。
(ストリーパ計画での発振方法は1 KHz以上の周波数でも可能と思われるが、詳細が不明である。)

(2) 個別の発振方法について

スパーカー

- ① 孔内用に改良した装置がある(代表的な商社はテルダインジャパン)
- ② 基本的には低周波から高周波までの波動を発生させているが、ほとんどの場合低周波成分を対象として測定している。
- ③ いままで、高周波成分の大きさが問題とはなっていないため、どのような高周波を発生しているか不明であるが、高周波はエネルギー的には小さいと考えられる。

<課題> : ・現状の装置での高周波成分のエネルギーの把握
・発振波動の再現性の確認

OWS

- ① 応用地質製の孔内水中発振装置(添付資料参照)
- ② パンフレットから推定すると、1 KHz以上の波動は発振している。
- ③ 上下30°より広い範囲では発振エネルギーが低下(指向性あり)。

<課題> : ・能力の詳細には不明な点が多く、再調査が必要。
(現在、問い合わせ中)

連続波

- ① 大プロで開発中、装置径92mm、圧電素子を複数個重ねてエネルギーを増加している。
- ② スイープ範囲10 Hz ~ 1 KHz。
- ③ マイヤミ大学の山本先生がランダムな波形での処理を研究している。

④ ストリーパ計画でも発振装置を開発している。

< 課題 > : ・高周波成分を対象とした測定がどこまで可能か。

・波形がなまっただときの適切な処理方法。

・周波数により速度が異なる場合にはデータ処理ができない。

パルス発振について

① 高周波を対象としてパルス波を発生させることは、機械的に発振する方法では、不可能に近い。可能性としては圧電素子が考えられるが、厳密には非常に難しい。

2. 2 受振方法に対するヒヤリング

受振方法の諸元項目を図-2に示す。

① 高周波の波動に対しては加速度計が敏感である。

② ハイドロフォンはジオフォンより高周波成分(1~10kHz)を受振する事が可能である。ただし、ハイドロフォンは受振方向を定めることはできない

③ 振幅を評価対象にする場合には高周波を含めた広い帯域で平滑な測定が必要となり、圧電型加速度計が適している。

④ 1受振点で直交3方向成分の測定できれば、波動の伝播方向の評価、や将来的なS波の整理が可能になる。また、発振の指向性に対する測定後の補正も考えられる。

⑤ 多点で同時に測定、ただし、測定システムや孔内に挿入する装置に余分な工夫や開発が必要である。

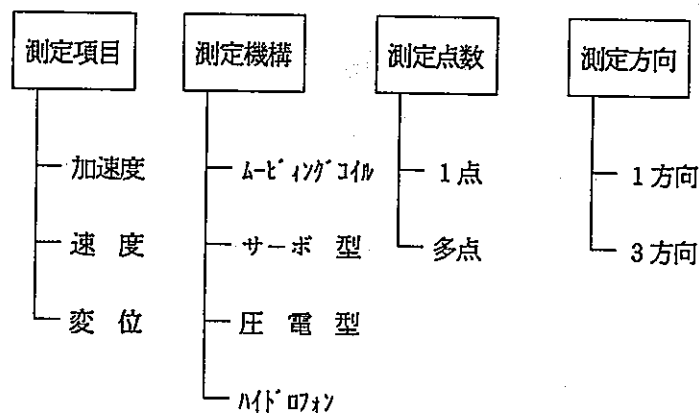


図-2 受振方法の諸元項目

3. まとめ

3. 1 個別手法の現状と課題点

(1) スパーク

発振方法として確立されたものであり、発振能力は電圧を上げることによって調整することができる。しかし、高周波成分のエネルギーがどの程度であるが不明である。したがって、高周波成分のエネルギー量の実測、高周波成分を大きくするための放電方法の検討が課題である。再現性については疑問点もあるので、発振した波動を測定する必要がある（波動が直接岩盤に伝播されていないので仮定条件になるが）。振幅の評価に関してはハザマ式、圧電素子と同様に振幅の整理方法を工夫する必要がある。また、高電圧を使用するため、安全性の確保を充分検討する必要がある。

(2) ハザマ式

発振装置にはプロトタイプがある。低周波成分が少なく、比較的高周波の波動を発生させる方法としては有望であるが、エネルギー量が小さい。エネルギーを大きくした方法（ハザマ式、図-3参照）もあるが、生産エネルギーに比べて横方向への伝播エネルギーが小さい。効率よくエネルギーを岩盤に伝播させる方法（水中であればOWSと同じ考え方で工夫ができる）や波動の指向性が課題である。

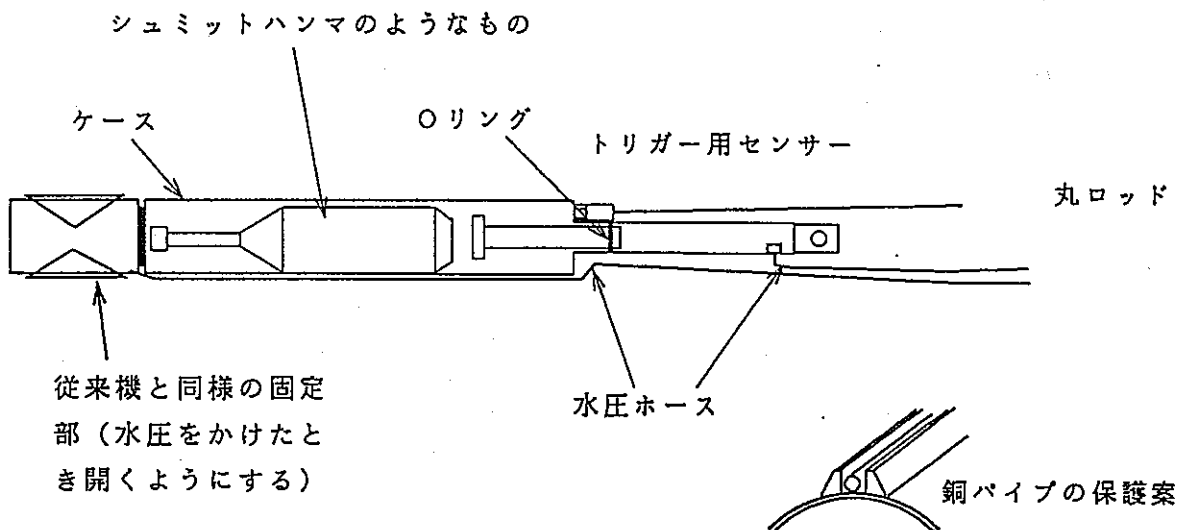


図-3 ハザマ式発振方法（ハンマー打撃タイプ）の概念図

(3) 圧電素子式

エネルギーが小さいことが最も大きい課題である。圧電素子を複数個使用するなど、発振エネルギーを大きくする方法に関する検討が必要である。圧電素子から発生した振動を直接岩盤に伝達するタイプと水を介して伝達するタイプ（ストリーバ計画での装置）がある。波動の指向性も課題となる。

(4) 連続波

現在、最も高周波波動のスweepは1 kHz程度であり、これをさらに高周波にする方法が課題の1つである。また、スweep波の到達時間や振幅の大きさの計算には、発振と同じ周波数の波動が受振されるとして算定を行っているようであり、実測のように波動がなまったときに計算が可能かどうか検討する必要がある。ちなみに周波数によって弾性波速度が異なる場合では、解析は不可能である。

(5) 共通として

- ① 振幅を整理する場合、単一のパルスのような波動により整理することは不可能であり、振幅の整理を十分検討することによって対応する必要がある。
- ② ボーリング孔の孔口を閉塞して測定する（間隙水圧を変化させない）ために講じる対策は、すべての発振方法に共通した課題であり、発振方法とは別途独立して検討できる。
- ③ 受振方法はおそらく3方向圧電型加速度計が最も有望であるが、これも発振方法とは独立した共通課題であり、別途検討できる。

3. 2 高周波波動による孔間弾性波の測定方法について

ヒヤリングの結果から、高周波波動を用いて測定できる孔間弾性波の方法をまとめると以下のようなものである。

(1) 発振方法について

コンセプトの段階から高周波波動を用いた孔間弾性波を対象としているハザマ式を除いて、ほとんどの手法は高周波成分を対象とした計測例がない。そのため、発振手法の高周波特性に関して情報が少なく、開発の対象とする手法を選定するには至らなかった。したがって、開発の対象として可能性のある手法（スパーカー、OWS、ハザマ式、圧電素子式（パルス、連続波））から、簡易実験やデータ収集により開発手法をさらに選定することが必要である。

(2) 受振方法について

受振方法としては、直交3方向成分の圧電型加速度計による方法が適切であると考えられる。また、1発振に対し多点で受振する方法が効率的であるが、測定システムに負担を与えるため、システム面の検討も必要である。

電気音響変換素子（圧電、電歪、磁歪）による発振の方法検討メモ

検討メモは、調査結果を整理するために作った私的メモです。

①地球科学総合研究所（石油探査会社）

- ・電歪系の素子を使用している。メーカーはNEC、東北金属（トーキン）はNECの系列会社であり、実製作はトーキンの可能性有り。
- ・電源装置（ジェネラタ）は（株）アカシで電圧は150V。内部インピーダンスをできるだけ小さくすることが大きいパワーの発振につながる。
- ・出力を高めるために、素子を並列にしている（開発装置では6個）。装置全体として発振能力を向上される方針。

<蓮井コメント>

- 守秘義務があり全容を把握するのは難しい。テレメトリーのポイントは、発振素子とジェネラタのようである。
- 並列に別の素子で発振する事により、装置全体としては発振力の増加になる、ただし、パルスの場合、初動の振幅を増加できるかどうかは試してみないと、明確でない。

②開発電子測器研究所（超音波測定装置製作）

- ・高出力は圧電素子では難しいかもしれない。

<コメント>

- 通常言われる超音波（数十kHz以上）では専門業者で、岩石を対象とした特注の測定装置が得意である。しかし、反面、高出力をどうするかについては技術的ノウハウを有していない。
- パンフレット、技術資料入手

③古野電気（ソナーメーカー）

- ・ソナーの電気音響変換素子には圧電素子、電歪式、磁歪式があり、圧電素子が最も高い周波数を担当している。出力が大きくなると磁歪素子を使っている。
 - 電歪素子：電極が2枚あり、コンデンサーと同じ作り
 - 磁歪素子：コイルに電流を流して振動を作る方法
- ・数個の発振子を縦につないで位相を合成し、高出力にすることもやっている。
- ・10kHz程度のソナー（10000m探信）もあるが、大きさが15mぐらいある（深海調査船しんかい7000?の母船）。
- ・周波数が小さいと出力も大きくなるが、素子が大きくなる。

<コメント>

- ソナーは非常に高周波のものは小型であるが、低周波にしようとするとものが大きくなる。また、高出力を得るためにも、ものが大きくなる。
- パンフレット、技術資料入手
- ボーリング孔内で使うためには、小型化の開発が必要。難しい。
- パンフレット入手

④東陽テクニカ（ソナーメーカー）：技術的コンタクト未

<コメント>

- スパーク、ウォーターガンなどもあり、海洋での地震探査用音源も手がけている。
- 技術レベルは上記の古野電気と同じと考えられるが、会社の姿勢として地盤探査にも興味を持っているようで、新規開発も相談にのってもらえそうである。
- パンフレット入手

⑤北斗理研（計器コンサル）

- ・圧電アクチュエータ（トーキン）とNF回路ブロックの製品で、電中研の土質振動実験装置を製作中
- ・この方法は可能性があるかもしれない

<コメント>

- 小回りのきくコンサルで、装置の製作（自社で全部は作らない）も実施。
- 電中研、資源環境総合研究所などとの取引が多い。結構相談相手になる。

⑥NF回路ブロック（計測メーカー）

- ・圧電アクチュエータ駆動用電源を製作しており、数種類の製品がある。
- ・DC100V～150Vが可能であるが、用いる圧電素子により最大電圧は制限される。
- ・矩形波の出力では立ち上がりのシャープさが問題になり、本機器は応答性が良い。
- ・2KWのもので180万円/台、直列に配置して大電流を得る個とも可能である。
- ・使い方は、パルス発生装置→同社の装置（アンプとして用いる）→圧電素子
- ・磁歪、電歪に使うことができるかどうかは、経験がないので不明。

<コメント>

- AE 機器も手がけ、超音波関係の大手。多少、大名商売の傾向はある。
- パルス発生装置は別として、そのパルスを増幅するアンプはこの物が適当と考えられる。ただし、リースは難しそう。

⑦ トーキン（圧電素子メーカー、高技術水準の会社）技術的コンタクト未

- ・ 製品パンフレット入手

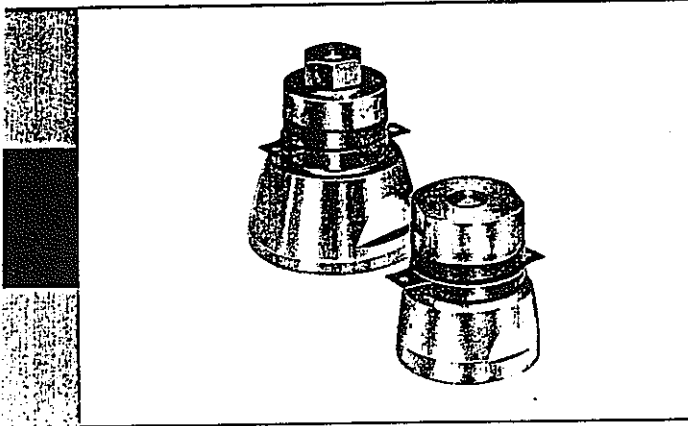
<コメント>

- この製品を応用するのが、良さそうである。
- 素子の性能（出力、周波数など）を物理学的、電気力学的に求める理論資料をもらったが、よく分らん。盆明けにトーキンの技術者と直接討議する予定。
- 開発業務に対しては積極的である。
- 電歪、磁歪素子も検討対象とする。

資料 - 3 発振素子、装置の諸元

① 圧電素子および圧電アクチュエータのパンフレット

② 発振装置のパンフレット



ボルト締めランジュバン型振動子

ボルト締めランジュバン型振動子は、超音波の応用機器である超音波洗浄機、超音波加工機、プラスチックウェルダなど、強力超音波と呼ばれている分野で数多く使用されています。

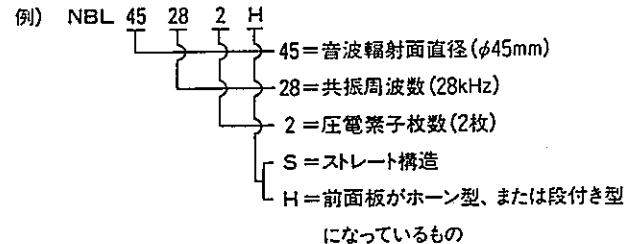
TOKINでは、このボルト締めランジュバン型振動子として高性能のネベックN-61材を使用、TOKIN独自の設計により他社にないすぐれたものになっています。

特長

- 大振幅における機械的Qが高いため、電気音響変換効率が高い。
- 圧電素子を機械的に組み込んだ構造により、振動速度が大幅に向上、大振幅で使用可能です。
- 耐熱性にすぐれたN-61材を用いて使用温度範囲を拡大したため、振幅の直線性が良好です。
- ボルトによって装置に取り付けることができるため、装着の信頼性にすぐれ、また取り付けも容易です。

型名

製品呼称記号は、次のように分類されています。

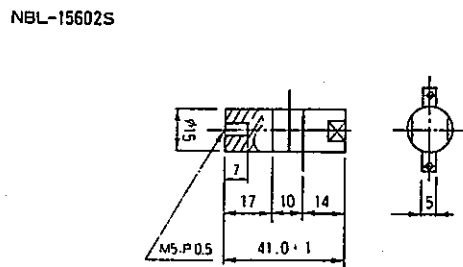
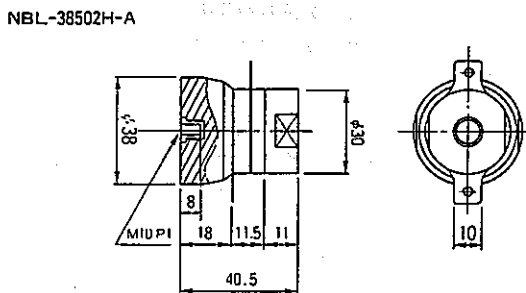
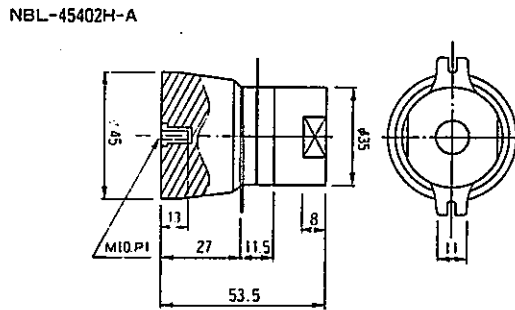
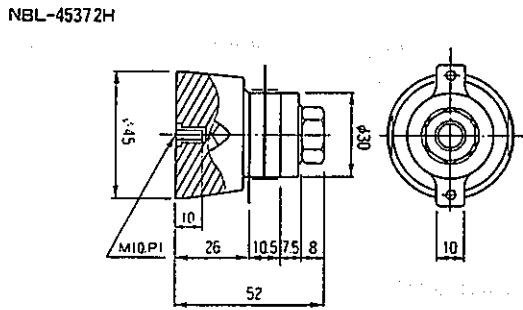
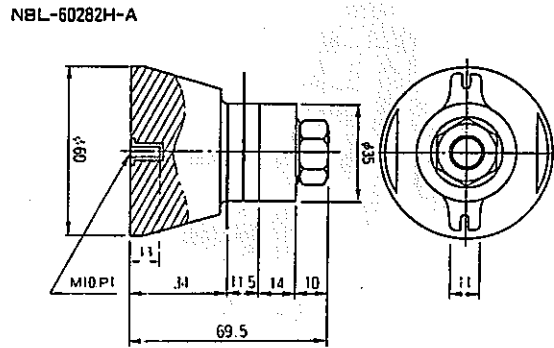
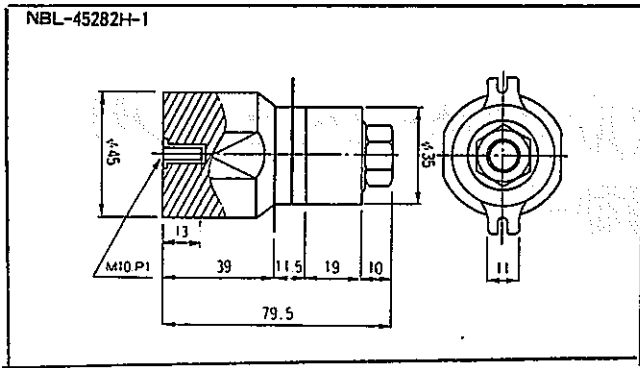


標準仕様

第2-1表

項目	45282H	60282H	45372H	45402H	38502H	15602S
共振周波数 f_0 (kHz)	28.0	28.2	37.0	40.2	53.0	60.0
自由アドミタンス Y_0 (m Ω)	40	30	30	15	15	20
機械的Q Q_m	500	500	500	500	500	500
静電容量 C (pF)	4000	4000	3000	4000	2900	800
最大許容速度 V (cm/s)	40	25	30	50	40	50
最大許容入力 P (W)	70	70	45	70	45	8

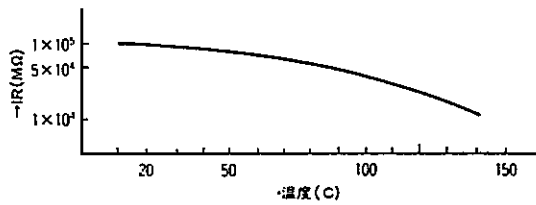
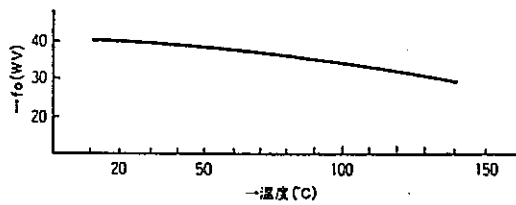
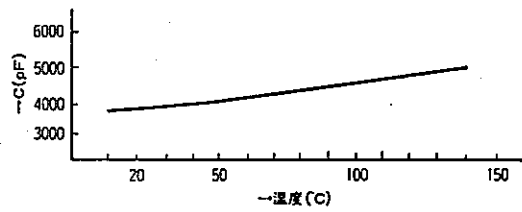
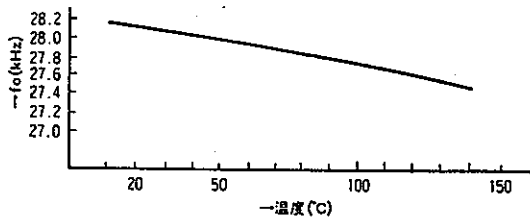
最大許容入力は、1本使用の場合、片面水負荷時。



第2-1図

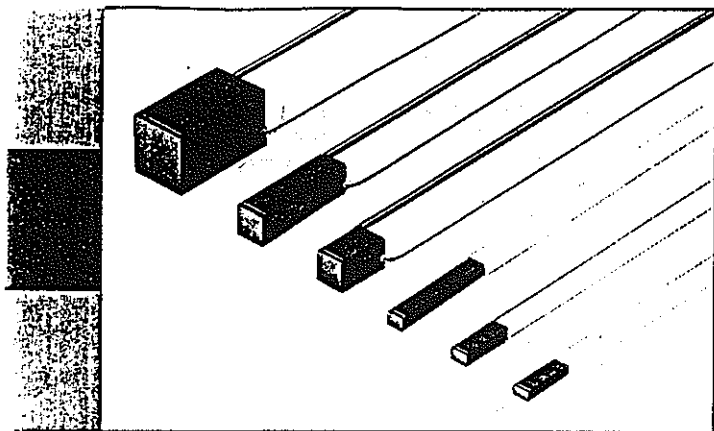
[mm]

温度特性



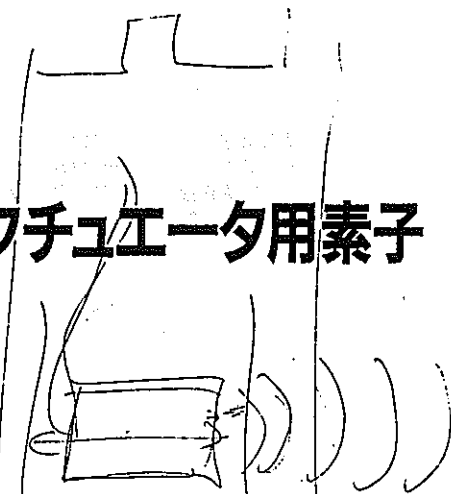
第2-2図 NBL-45282H温度特性

資 3-2



圧電アクチュエータ用素子

積層型



圧電素子には、電圧を印加すると素子が伸縮するという特性があり、最近では、その特性を利用したアクチュエータ(変位素子)としての応用がプリンタVTR、リレー、スイッチおよび精密微調機器を中心に拡大しています。

ところで、圧電アクチュエータとしての方式には、大別すると、バイモルフ型と積層型があり、それぞれの用途により使い分けられています。

またTOKINの圧電アクチュエータは独自の低温焼成技術による一体焼成型の積層タイプ、バイモルフタイプで高信頼性、低価格を実現しています。

特長

- 大きな荷重圧を得ることができます。
- 積層枚数に応じて任意の変位量を得ることができます。
- 変位の応答性が早い。

寸法および構造

品名	寸法					
	a ₁	b ₁	ℓ	a ₂	b ₂	
NLA-1.4×3×9	1.4	3.1	9.00	2.9	4.6	
NLA-2×3×9	2	3.1	9.00	3.5	4.6	
NLA-2×3×18	2	3.1	18.00	3.5	4.6	
NLA-5×5×9	5	5.1	9.00	6.5	6.6	
NLA-5×5×18	5	5.1	18.00	6.5	6.6	
NLA-10×10×18	10	10.1	18.00	11.5	11.6	

性能

第2-8表

品名	±20%容 (nF)	±10%量 (%)	+50%絶縁抵抗 (Ω)	±10%変位 (μm)/100V	±20%発生力 (kg)/100V
NLA-1.4×3×9	125	3.0	1×10 ⁹	6.5	14.0
NLA-2×3×9	175	3.0	1×10 ⁹	6.5	21.0
NLA-2×3×18	400	3.0	5×10 ⁸	15.0	21.0
NLA-5×5×9	650	3.0	5×10 ⁸	6.5	87.0
NLA-5×5×18	1600	3.0	2×10 ⁸	15.0	87.0
NLA-10×10×18	6500	3.0	5×10 ⁷	15.0	350.0

応答性 100μs

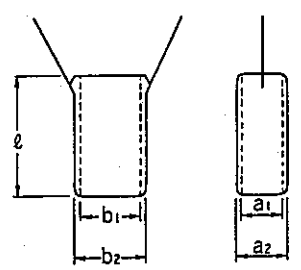
品名表示方法



リード線

ホルマール被覆線
線径 0.2φ
+極:120±10mm
-極:100±10mm

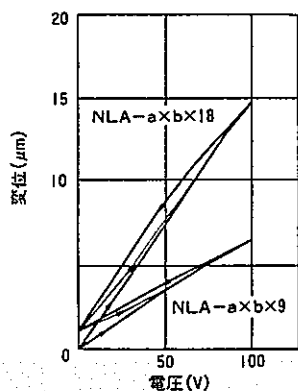
シリコン被覆線
0.05φ×50本
+極:赤 -極:黒
120±10mm



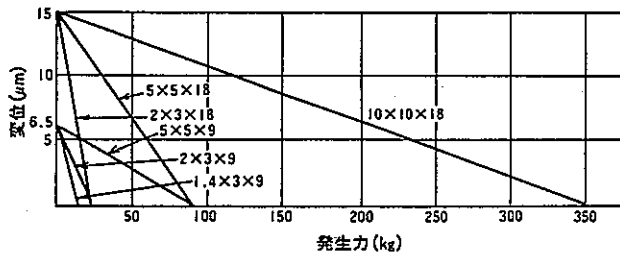
寸法公差
NLA-a±0.1×b±0.1×ℓ±0.05
注) 外装前ハンダ点高さ:2mmMAX

変位特性

電圧VS変位



発生力VS変位(印加電圧DC-100V)



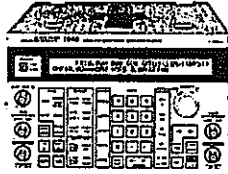
※85℃においての変位量の減少率は、5%以下です。
※発生力とは、変位をゼロまで戻すのに必要な力と定義しています。

ファンクション シンセサイザ

1940は、最高周波数20MHzを達成した1900シリーズのハイグレードモデルです。任意波形発生機能や、トリガ・ゲート・バースト機能、同期運転機能、外部信号加算機能などを装備。さらに、便利なサブ発振器も搭載しています。

0102は、1940の任意波形作成・編集の専用ソフトウェアです。計算式による波形定義、マウスを使った波形描画、DSOに記録された波形の取込みの3通りの方法で波形作成ができるほか、波形の修正もマウスを使って簡単に行うことができます。

1940の機能

品名	マルチ ファンクション シンセサイザ 1940 MULTI FUNCTION SYNTHESIZER	
	GP-18	
		
発振周波数範囲	メインシンセサイザ 0~20MHz	サブシンセサイザ 0~100kHz
発振モード	連続/バースト/トリガ/ゲート	連続
出力波形*1	\sim \sim \wedge \vee \square (変) \square (固) および任意波形 \sim または \square (固) の連続発振のとき : 0~20MHz \sim または \square (固) のバースト/トリガ/ゲートでストップレベルホールドのとき : 0~10MHz その他のとき : 0~1MHz	\sim \sim \wedge \vee \square (固)
発振周波数範囲*2	0~20MHz 0~10MHz 0~1MHz	0~100kHz ±360°の範囲でメインシンセサイザとの位相差を設定できる
周波数設定分解能	0.1mHz	0.1mHz
周波数確度	±5×10 ⁻⁶	±5×10 ⁻⁶
最大出力電圧	10Vp-p/50Ω 20Vp-p/開放*3	20Vp-p/開放
出力インピーダンス	50Ω	600Ω
正弦波ひずみ率	0.3%以下(10Hz~100kHz)	0.2%以下(10Hz~20kHz)
方形波立上り時間	8ns以下*4	
周波数スイープ	くり返し/単発 リニア/ログ/ステップ 往復/片道 上昇/下降 途中停止/再スタート可能	
スイープ時間	5ms~9999s	
トリガ源	INT (サブシンセサイザ使用) / EXT / マニュアル / GPIB	
トリガレイト	10μs~10000s (サブシンセサイザ参照)	
スタート位相	-360°~+360°	
ストップレベル	HOLD: スタート位相で停止 RESET: 波形中心で停止	
方形波 デューティ可変	5~95%	
任意波形	アドレス: 0000~1023 データ: -511~+511 GPIBによるデータ入力、全データが連続して出力されるのは約107kHzまで*5	
外部信号加算	メインシンセサイザの出力に外部信号を加算できる	
多相化(同期動作)	複数の1940間およびメイン-サブシンセサイザ間で可能	
電源	AC100, 120, 220, 240V切換 84VA以下	
外形寸法 (mm)	216(W)×132.5(H)×350(D)	
質量(NE T)	約5.6kg	
備考	*1 \square (変): デューティ比率可変の方形波 \square (固): デューティ比率固定(50%)の方形波 *2 周期による設定も可能 *3 開放/50Ω負荷の出力電圧表示切換え可能 *4 連続発振以外でストップレベルがリセットのときは15ns以下 *5 PC9801用任意波形作成ソフトウェア(0102)別売	

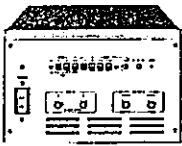
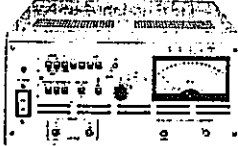
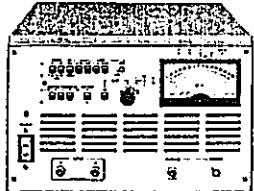
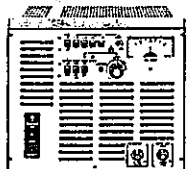
高速電力増幅器

■4000シリーズの特長

- 広帯域（直流も可）
- 高出力電圧
- 良好なステップレスポンス
- DCバイアス
- 4象限出力

■4000シリーズのアプリケーション

- 圧電アクチュエータの駆動
- 超音波モータの駆動
- アモルファス磁性体の試験
- ディスプレイデバイスのテスト
- コンデンサのテスト
- バイオエレクトロニクス など

高速電力増幅器 4005 HIGH SPEED POWER AMPLIFIER/ BIPOLAR POWER SUPPLY	高速電力増幅器 4015 HIGH SPEED POWER AMPLIFIER/ BIPOLAR POWER SUPPLY	高速電力増幅器 4025 HIGH SPEED POWER AMPLIFIER/ BIPOLAR POWER SUPPLY	高速広帯域電力増幅器 4055 HIGH SPEED POWER AMPLIFIER
			
DC~1MHz			DC~10MHz
1 Arms, 2.82 Ap-p(40Hz~1MHz) ±0.75 A (DC~40Hz)	2 Arms, 5.66 Ap-p(40Hz~500kHz) ±1.0 A (DC~40Hz)	4 Arms, 11.3 Ap-p(40Hz~500kHz) ±2.0 A (DC~40Hz)	±1.4 A peak(40Hz~100kHz) ±1.3 A peak(100kHz~1MHz) ±1.0 A peak(1MHz~10MHz) ±1 A (DC)
定電圧			
A, Bの2系統(加算可能) A B共に出力に対して同相			1系統(極性切換え付)
50Ω/600Ω切換え			50Ω
<ul style="list-style-type: none"> ●$Z_0 = 0\Omega$出力 RL$\geq 50\Omega$ 50 V rms(40Hz~500kHz) 45 V rms(20Hz~1MHz) RL$\geq 100\Omega$ ±75 V (DC~100kHz) ±70 V (100kHz~500kHz) ±65 V (500kHz~1MHz) ●$Z_0 = 50\Omega$出力 RL=50Ω ±37.5 V (DC~100kHz) ±35 V (100kHz~500kHz) ±32.5 V (500kHz~1MHz) 	<ul style="list-style-type: none"> ●±75 Vレンジ RL=25Ω 50 V rms(40Hz~500kHz) 40 V rms(20Hz~1MHz) RL=75Ω ±75 V (DC~100kHz) ±70 V (100kHz~500kHz) ±55 V (500kHz~1MHz) ●+125~-25 Vレンジ RL=125Ω +125, -25 V (DC~100kHz) +120, -20 V (100kHz~500kHz) +105, -5 V (500kHz~1MHz) ●+25~-125 Vレンジ RL=125Ω +25, -125 V (DC~100kHz) +20, -120 V (100kHz~500kHz) +5, -105 V (500kHz~1MHz) 	<ul style="list-style-type: none"> ●±75 Vレンジ RL=12.5Ω 50 V rms(40Hz~500kHz) 40 V rms(20Hz~1MHz) RL=37.5Ω ±75 V (DC~100kHz) ±70 V (100kHz~500kHz) ±55 V (500kHz~1MHz) ●+125~-25 Vレンジ RL=62.5Ω +125, -25 V (DC~100kHz) +120, -20 V (100kHz~500kHz) +105, -5 V (500kHz~1MHz) ●+25~-125 Vレンジ RL=62.5Ω +25, -125 V (DC~100kHz) +20, -120 V (100kHz~500kHz) +5, -105 V (500kHz~1MHz) 	<ul style="list-style-type: none"> RL=50Ω 50 V rms(40Hz~100kHz) 46 V rms(100kHz~1MHz) 35 V rms(1MHz~10MHz) 17 V rms(10MHz~20MHz) RL=71Ω ±71 V (DC)
0.5Ω+1.5μH以下($Z_0 = 0\Omega$ 出力)	0.25Ω+0.8μH以下	0.125Ω+0.4μH以下	約1.5Ω+0.5μH
X10, X20, X50, X100とX1~3(連続可変)の組合せ			X10, 20, 50, 100とX0.4~1(連続可変)
40Hz~1MHz(+0.5/-1dB) *1	40Hz~1MHz(+0.5/-3dB, 10V rms, ±75Vレンジ)		DC~10MHz(+0.5/-3dB) *4
	±100V		±70V
	150V/FS, 2.5A/FS 切換え *2	150V/FS, 5.0A/FS 切換え *3	±75V(直流電圧計)
出力電圧の1/100			
入力に対して逆相(これにより、2台のBTL接続が可能)			
AC100, 120, 220, 240V 切換え	AC100V(120, 220, 240V可能)		AC85~138V(170~250V可能)
200W/300VA	340W/450VA	600W/800VA	600W/900VA
216(W)×132.5(H)×450(D)	288(W)×133(H)×450(D)	288(W)×177(H)×450(D)	216(W)×177(H)×450(D)
約10.5kg	約13kg	約18kg	約9kg
*1 $Z_0 = 0\Omega$ 出力 40V rms	*2 AC+DC	*3 AC+DC	*4 10V rms, ACモードは 40Hz~1MHz ●スリューレート: 5000V/μs(typ)

資料－４ 物性試験結果

①第1回物性試験結果（1月12日実施）

②第2回物性試験結果（2月19日実施）

岩石試験結果一覧表

報告用紙

調査名 モルタル供試体特性実験 試験年月日 6年 / 1月 / 12日

調査地点 整理担当者

試料番号 No.	①	②	③				
採取位置 m							
岩石名							
密度試験 ρ_r (g/cm ³)	2.178	2.175	2.181				
含水量試験 w_r (%)	10.2	9.8	10.3				
比重・吸水率試験	自然比重 G_n						
	絶乾比重 G_d						
	表乾比重 G_s						
	見掛比重 G_r						
	吸水率 Q (%)						
	有効間隙率 (%)						
一軸試験	一軸圧縮強さ σ_c (kgf/cm ²)	401.7	368.3	410.8			
	静的弾性係数 E (kgf/cm ²)	2.84×10^5	2.68×10^5	2.57×10^5			
	静的ポアソン比 ν_s	0.225	0.205	0.213			
超音波速度試験	P波	自然 ($\times 10^3$ m/sec)					
		強湿 ($\times 10^3$ m/sec)	4.103	4.116	4.094		
		強乾 ($\times 10^3$ m/sec)					
	S波	自然 ($\times 10^3$ m/sec)					
		強湿 ($\times 10^3$ m/sec)	1.815	1.844	1.864		
		強乾 ($\times 10^3$ m/sec)					
引張強さ試験 σ_t (kgf/cm ²)							
三軸試験	条件						
	粘着力 C (kgf/cm ²)						
	内部摩擦角 ϕ (度)						
一面セン断	条件						
	粘着力 C (kgf/cm ²)						
	内部摩擦角 ϕ (度)						
安定性試験 P (%)							
すりへり試験 R (%)							
乾湿くり返し試験 (%)							
浸水崩壊度試験 (区分)							
スレーキング試験 (指数)							
膨張率試験 e_r (%)							
備考							

調査件名 _____ 試験年月日 6年1月12日

試験者 _____

試料番号(深さ)		1			2		
供試体 No		1			1		
供試体の質量 m g		426.2			425.2		
供試体積	直徑	上部 cm	5.00		5.00		
			5.02		5.00		
		中央部 cm	4.98		4.99		
			5.04		4.98		
		下部 cm	4.98		4.99		
			5.01		5.00		
	高さ	平均値 D cm	5.01		5.00		
			9.93		9.95		
			9.93		9.97		
	平均値 H cm		9.93		9.96		
体積 $V = (\pi D^2/4) \cdot H$ cm ³		195.72		195.51			
含水比	容器 No	-			-		
	m_a g	426.20		425.20			
	m_b g	386.7		387.2			
	m_c g	-		-			
	w %	10.2		9.8			
平均値	容器 No						
	m_a g						
	m_b g						
	m_c g						
	w %	10.2		9.8			
湿潤密度 $\rho_t = m/V$ g/cm ³		2.178		2.175			
乾燥密度 $\rho_d = \rho_t / (1 + w/100)$ g/cm ³		1.976		1.981			
間隙比 $e = (\rho_s / \rho_d) - 1$							
飽和度 $S_r = w \rho_s / (e \rho_w)$ %							
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³							
平均値	w %	10.2			9.8		
	ρ_t g/cm ³	2.178			2.175		
	ρ_d g/cm ³	1.976			1.981		
	e						
	S_r %						

特記事項 _____

調査件名 _____ 試験年月日 6年 1月 12日

試験者 _____

試料番号(深さ)		3						
供試体 No		1						
供試体の質量 m g		427.6						
供試体積	直	上部 cm	5.00					
			5.00					
		中央部 cm	4.98					
			5.03					
		径	下部 cm	5.00				
	5.00							
	平均値 D cm		5.00					
	高	さ		9.99				
				9.99				
		平均値 H cm		9.99				
体積 $V = (\pi D^2/4) \cdot H$ cm ³		196.10						
含水	容器 No		-					
	m_a g		427.60					
	m_b g		387.7					
	m_c g		-					
	w %		10.3					
比	容器 No							
	m_a g							
	m_b g							
	m_c g							
	w %							
平均値 w %		10.3						
湿潤密度 $\rho_t = m/V$ g/cm ³		2.181						
乾燥密度 $\rho_d = \rho_t / (1 + w/100)$ g/cm ³		1.977						
間隙比 $e = (\rho_s / \rho_d) - 1$								
飽和度 $S_r = w \rho_s / (e \rho_w)$ %								
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³								
平均値	w %		10.3					
	ρ_t g/cm ³		2.181					
	ρ_d g/cm ³		1.977					
	e							
	S_r %							

特記事項 _____

調査件名

試験年月日 6年 1月 12日

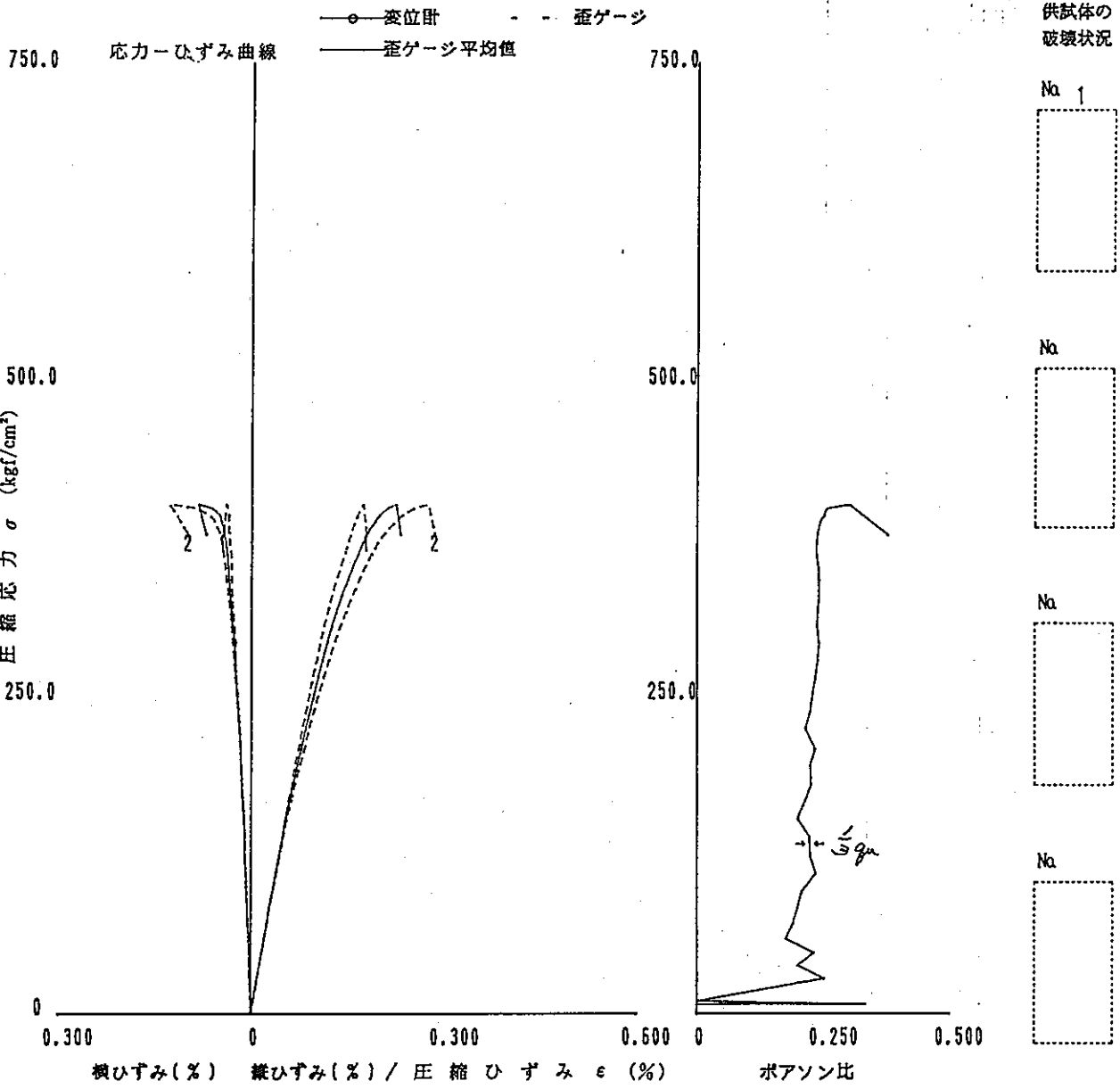
試料番号(深さ)

⑦

(~ m)

試験者

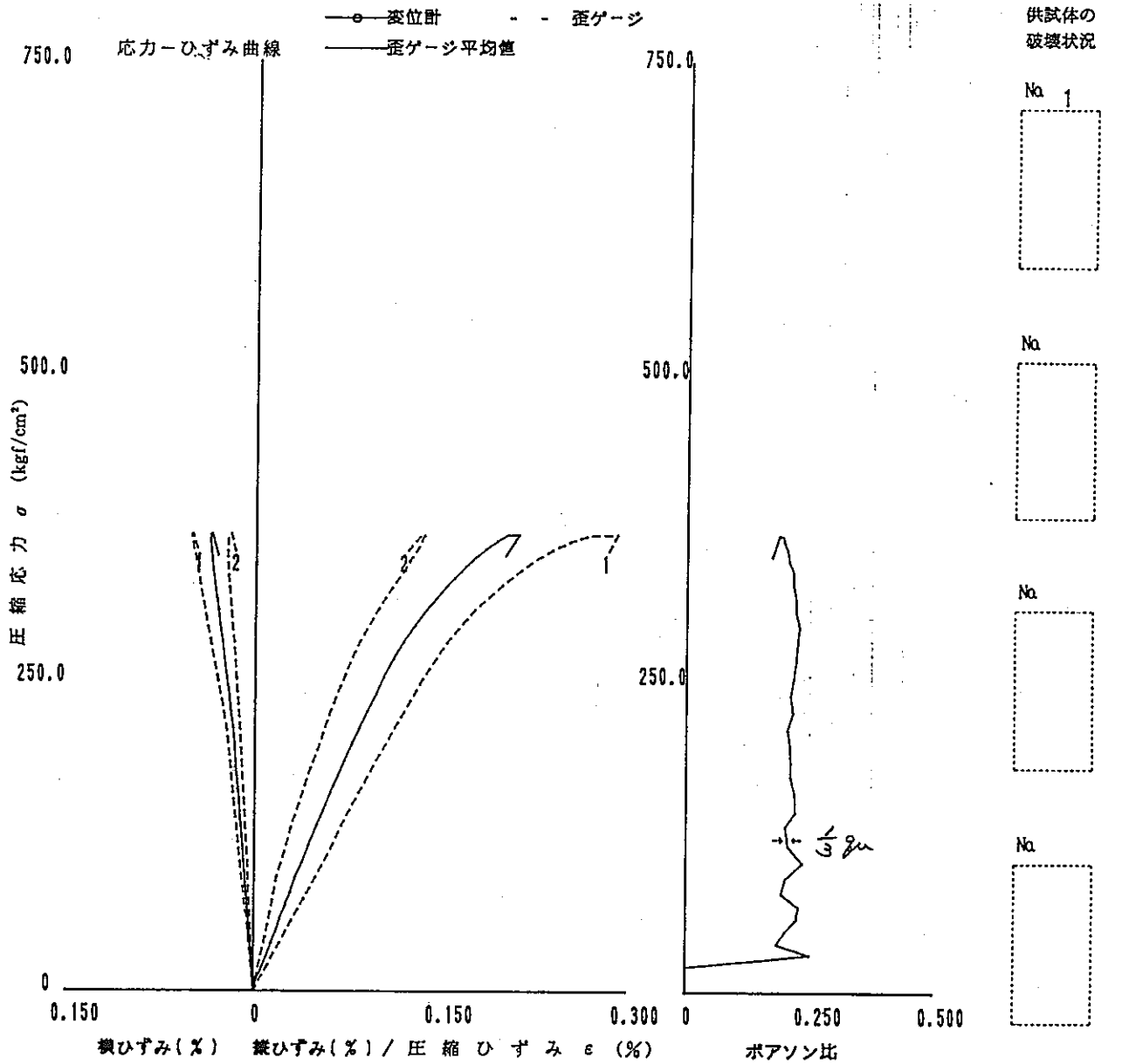
土質名称		供試体 No	1		
液性限界 w_L %		試料の状態	湿潤		
塑性限界 w_p %		高さ H_0 cm	9.93		
荷重計容量 10^4 kgf	50	直径 D_0 cm	5.01		
ひずみ速度 %/min	0.1	質量 m g	426.2		
特記事項		湿潤密度 ρ_t g/cm ³	2.177		
		含水比 w %	10.2		
		一軸圧縮強さ q_u kgf/cm ²	401.71		
		破壊ひずみ ϵ_f %			
		E_{50} (割線) kgf/cm ²			
		鋭敏比 S_r			
	E_{50} (接線) kgf/cm ²			静弾性係数 2.84×10^5 kgf/cm ²	
				静ポアソン比 0.225	



調査件名 _____ 試験年月日 6年1月12日

試料番号(深さ) ② (~ m) 試験者 _____

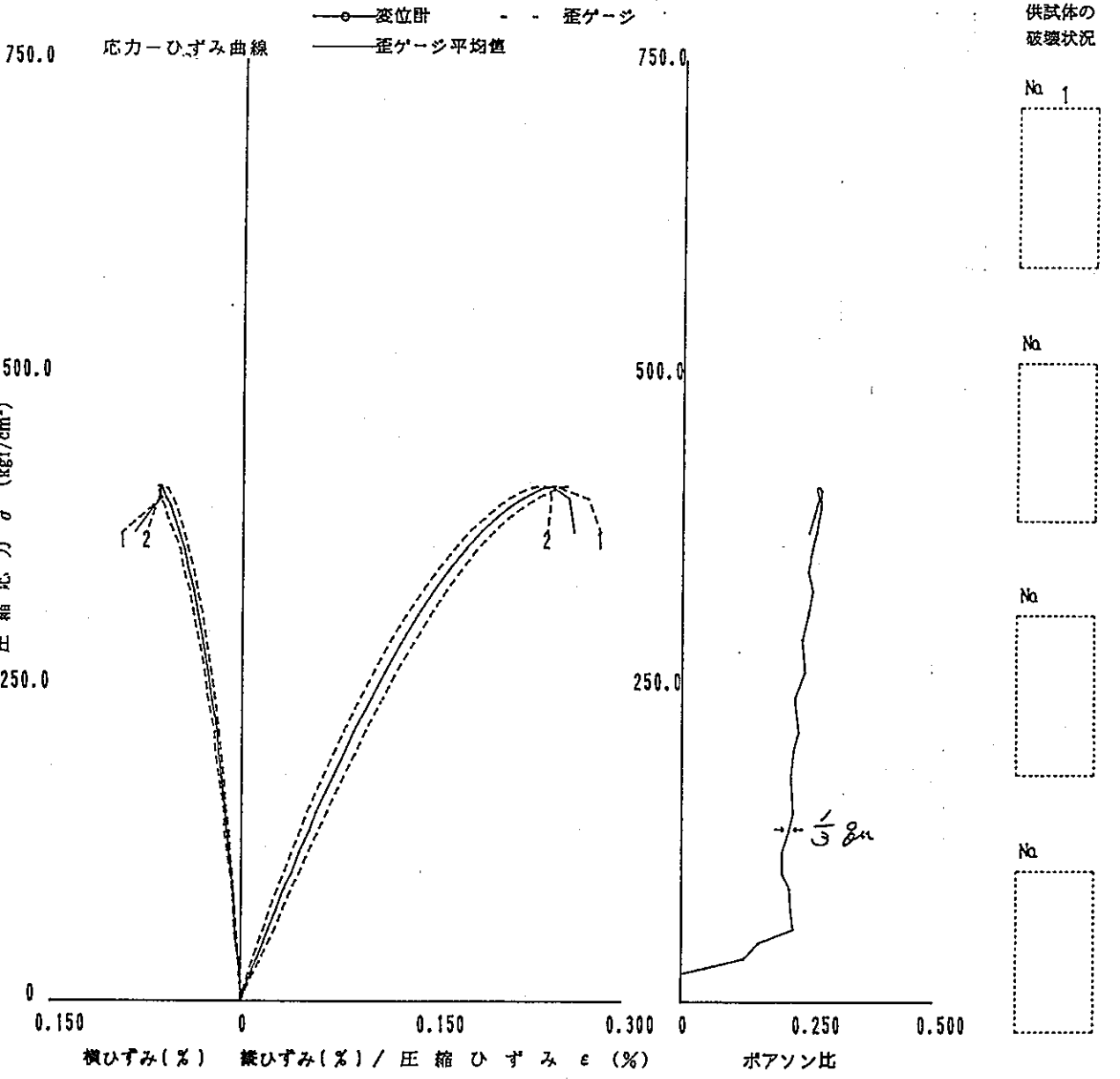
土質名称		供試体 No	1			
液性限界 w_L %		試料の状態	湿潤			
塑性限界 w_p %		高さ H_0 cm	9.96			
荷重計容量 t_{cap} kgf	5.0	直径 D_0 cm	5.00			
ひずみ速度 %/min	0.1	質量 m g	425.2			
特記事項		湿潤密度 ρ_t g/cm ³	2.174			
		含水比 w %	9.8			
		一軸圧縮強さ q_u kgf/cm ²	368.28			
		破壊ひずみ ϵ_f %				
		E_{50} (割線) kgf/cm ²				
		鋭敏比 S_r		弾性係数	2.68×10^5	Kgf/cm ²
		E_{50} (接線) Kgf/cm ²		静ポアソン比	0.205	



調査件名 _____ 試験年月日 6年1月12日

試料番号(深さ) ③ (~ m) 試験者 _____

土質名称		供試体 No	1		
液性限界 w_L %		試料の状態	湿潤		
塑性限界 w_p %		高さ H_0 cm	9.99		
荷重計容量 t_{cap} kgf	5.0	直径 D_0 cm	5.00		
ひずみ速度 %/min	0.1	質量 m g	427.6		
特記事項		湿潤密度 ρ_t g/cm ³	2.180		
		含水比 w %	10.3		
		一軸圧縮強さ q_u kgf/cm ²	410.75		
		破壊ひずみ ϵ_f %			
		E_{50} (割線) kgf/cm ²			
		鋭敏比 S_r			
		E50 (接線) kgf/cm ²		静弾性係数	2.57×10^5 kgf/cm ²
				静ポアソン比	0.213



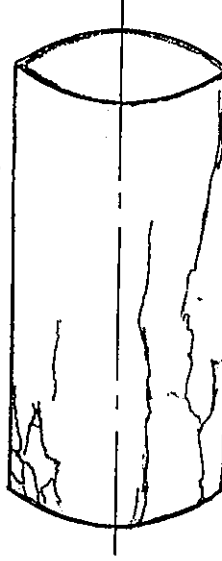


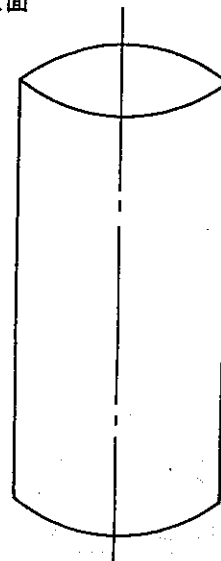
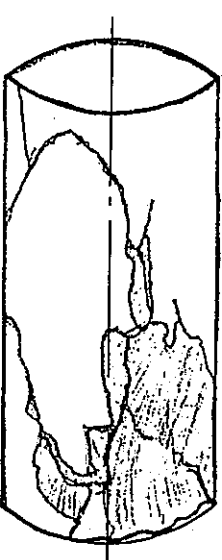
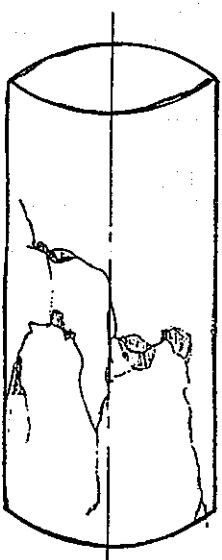
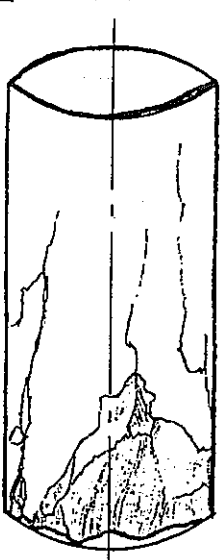
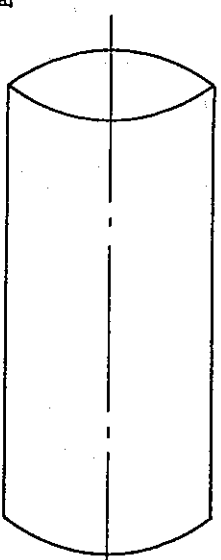
調査名・調査地点 _____

試験年月日 6年 10月 12日

試料番号・深さ：No _____

(m ~ m)

試験者 _____

No ①	No ②	No ③	No
深度	深度	深度	深度
正面 	正面 	正面 	正面 
60度に剪断.	80度に剪断.	70度に剪断.	
裏面 	裏面 	裏面 	裏面 



超音波伝播速度測定試験

報告用紙

調査名・調査地点

試験年月日 6年 / 月 / 2日

試験者

試料番号 No.	①	②	③	
採取深さ (m)				
供試体 No.				
含水状態	自然・ <u>強湿</u> ・強乾	自然・ <u>強湿</u> ・強乾	自然・ <u>強湿</u> ・強乾	自然・強湿・強乾
岩質名称				
長さ l (cm)	9.93	9.96	9.99	
直径 D (cm)	5.01	5.00	5.00	
体積 V (cm ³)	195.76	195.56	196.15	
重量 W (g)	426.2	425.2	427.6	
単位体積重量 γ (g/cm ³)	2.177	2.174	2.180	
縦波 (P波)	伝播時間 t_p ($\times 10^{-6}$ sec)	24.2	24.2	24.4
	速度 $V_p = \frac{l}{t_p}$ ($\times 10^3$ m/sec)	4.103	4.116	4.094
縦波 (S波)	伝播時間 t_s ($\times 10^{-6}$ sec)	54.7	54.0	53.6
	速度 $V_s = \frac{l}{t_s}$ ($\times 10^3$ m/sec)	1.815	1.844	1.864
$V_p/V_s = t_s/t_p$	2.261	2.232	2.196	
$(V_p/V_s)^2$	5.112	4.982	4.822	
$(V_p/V_s)^2 - 2$	3.112	2.982	2.822	
$2 \{ (V_p/V_s)^2 - 1 \}$	8.224	7.964	7.644	
動的ポアソン比 μ_d^*	0.378	0.374	0.369	
$2(1 + \mu_d)$	2.756	2.748	2.738	
V_s^2 ($\times 10^{10}$ cm ² /sec ²)	3.294	3.400	3.474	
動的弾性係数 E_d^{**} (kg/cm ²)	2.02×10^5	2.07×10^5	2.12×10^5	$\times 10$

$$* \mu_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2 \{ (V_p/V_s)^2 - 1 \}}$$

$$** E_d = \frac{2\gamma(1 + \mu_d)V_s^2}{g}$$

g = 重力加速度 (=980cm/sec²)

備考

超音波伝播速度測定試験

報告用紙

調査名・調査地点

試験年月日 6年 2月 19日

試験者

試料番号 No.	①	②	③	
採取深さ (m)				
供試体 No.				
含水状態	自然・ <u>強湿</u> ・強乾	自然・ <u>強湿</u> ・強乾	自然・ <u>強湿</u> ・強乾	自然・強湿・強乾
岩質名称				
長さ l (cm)	9.96	9.96	9.93	
直径 D (cm)	5.01	5.00	5.01	
体積 V (cm ³)	196.35	195.56	195.76	
重量 W (g)	425.8	425.4	426.1	
単位体積重量 γ (g/cm ³)	2.169	2.175	2.177	
縦波 (P波)	伝播時間 t_p ($\times 10^{-6}$ sec)	23.2	23.8	23.6
	速度 $V_p = \frac{l}{t_p}$ ($\times 10^3$ m/sec)	4.293	4.185	4.208
縦波 (S波)	伝播時間 t_s ($\times 10^{-6}$ sec)	56.4	55.6	56.2
	速度 $V_s = \frac{l}{t_s}$ ($\times 10^3$ m/sec)	1.766	1.791	1.767
$V_p/V_s = t_s/t_p$		2.431	2.337	2.381
$(V_p/V_s)^2$		5.910	5.462	5.669
$(V_p/V_s)^2 - 2$		3.910	3.462	3.669
$2 \{ (V_p/V_s)^2 - 1 \}$		9.820	8.924	9.338
動的ポアソン比 μ_d^*		0.398	0.388	0.393
$2(1 + \mu_d)$		2.796	2.776	2.786
V_s^2 ($\times 10^{10}$ cm ² /sec ²)		3.119	3.208	3.122
動的弾性係数 E_d^{**} (kg/cm ²)		1.93×10^5	1.98×10^5	1.93×10^5

$$* \mu_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2 \{ (V_p/V_s)^2 - 1 \}}$$

$$** E_d = \frac{2\gamma(1 + \mu_d)V_s^2}{g}$$

g = 重力加速度 (=980cm/sec²)

備考

岩石試験結果一覧表

報告用紙

調査名 モルタル供試体特性実験 試験年月日 6年 2月 19日

調査地点 _____ 整理担当者 _____

試料番号 No.	①	②	③				
採取位置 m							
岩石名							
密度試験 ρ_s (g/cm ³)	2.169	2.176	2.177				
含水量試験 w_s (%)	13.7	13.2	11.6				
比重・吸水率試験	自然比重 G_n						
	絶乾比重 G_d						
	表乾比重 G_s						
	見掛比重 G_r						
	吸水率 Q (%)						
	有効間隙率 (%)						
一軸試験	一軸圧縮強さ σ_c (kgf/cm ²)	397.1	400.2	451.2			
	静的弾性係数 E (kgf/cm ²)	2.94×10^5	3.37×10^5	2.71×10^5			
	静的ポアソン比 ν_s	0.200	0.211	0.229			
超音波速度試験	P波	自然 ($\times 10^3$ m/sec)	4.293	4.185	4.208		
		強湿 ($\times 10^3$ m/sec)					
		強乾 ($\times 10^3$ m/sec)					
	S波	自然 ($\times 10^3$ m/sec)	1.766	1.791	1.767		
		強湿 ($\times 10^3$ m/sec)					
		強乾 ($\times 10^3$ m/sec)					
引張強さ試験 σ_t (kgf/cm ²)							
三軸試験	条件						
	粘着力 C (kgf/cm ²)						
	内部摩擦角 ϕ (度)						
一面セー断	条件						
	粘着力 C (kgf/cm ²)						
	内部摩擦角 ϕ (度)						
安定性試験 P (%)							
すりへり試験 R (%)							
乾湿くり返し試験 (%)							
浸水崩壊度試験 (区分)							
スレーキング試験 (指数)							
膨張率試験 e_r (%)							

備考

調査件名 _____ 試験年月日 6年 2月 19日

試験者 _____

試料番号(深さ)		①	②		
供試体 No		1	1		
供試体の質量 m g		425.8	425.4		
供試体	直	上部 cm	5.01	4.98	
			5.01	4.99	
		中央部 cm	4.98	5.00	
			5.02	5.00	
		下部 cm	5.01	5.00	
			5.01	5.00	
	径	平均値 D cm	5.01	5.00	
		高		9.96	9.96
				9.95	9.96
	平均値 H cm	9.96	9.96		
体積 $V = (\pi D^2/4) \cdot H$ cm ³		196.31	195.51		
含	容器 No	-	-		
	m_a g	425.80	425.40		
	m_b g	374.4	375.9		
	m_c g	-	-		
	w %	13.7	13.2		
水	容器 No				
	m_a g				
	m_b g				
	m_c g				
	w %				
平均値 w %	13.7	13.2			
湿潤密度 $\rho_t = m/V$ g/cm ³		2.169	2.176		
乾燥密度 $\rho_d = \rho_t / (1 + w/100)$ g/cm ³		1.908	1.922		
間隙比 $e = (\rho_s / \rho_d) - 1$					
飽和度 $S_r = w \rho_s / (e \rho_w)$ %					
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³					
平	w %	13.7	13.2		
	ρ_t g/cm ³	2.169	2.176		
	ρ_d g/cm ³	1.908	1.922		
	e				
	S_r %				

特記事項 _____

調査件名

試験年月日

6年2月19日

試験者

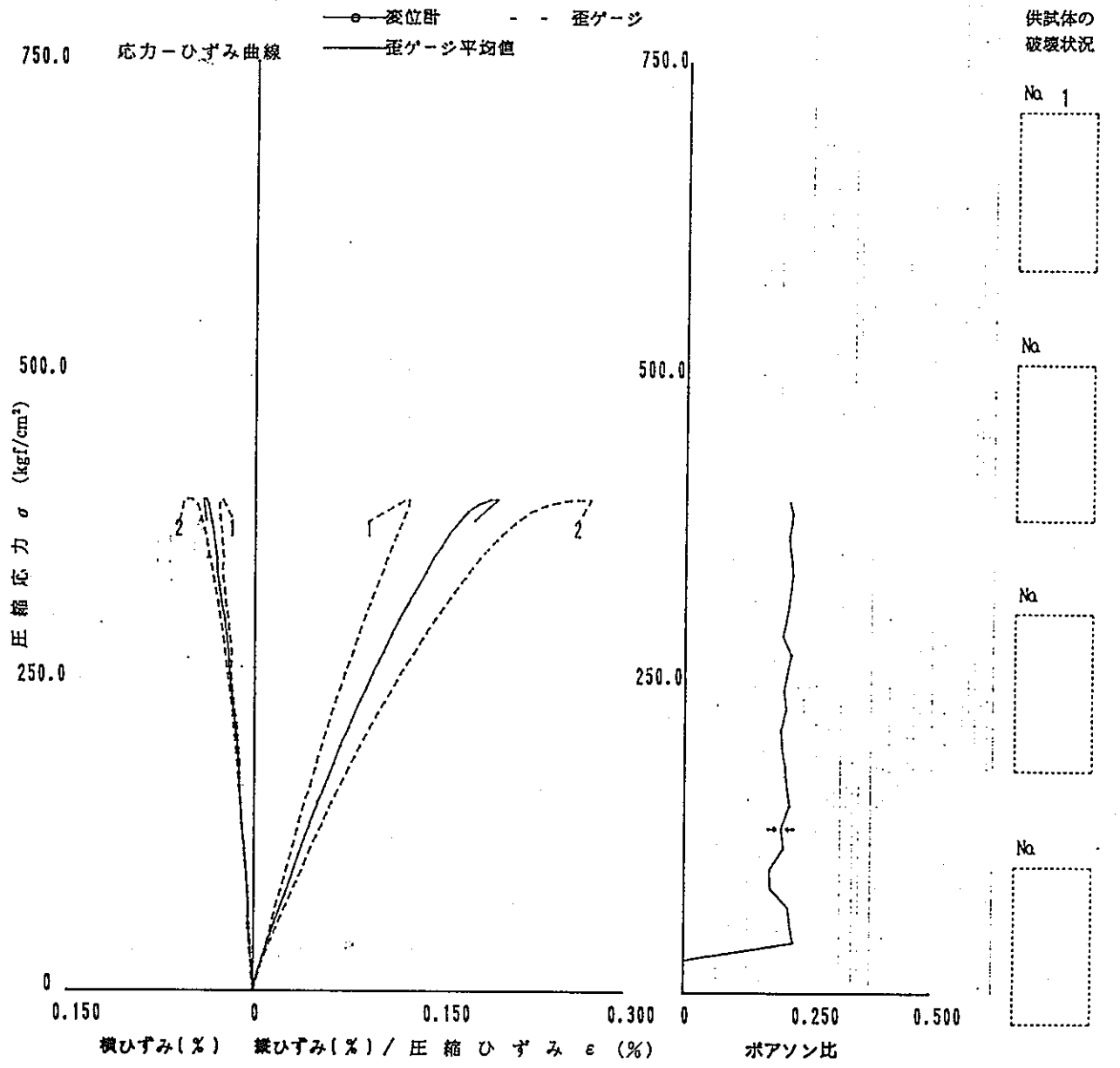
試料番号(深さ)		③						
供試体 No		1						
供試体の質量 m g		426.1						
供試体積	直徑	上部 cm	5.00					
			5.02					
		中央部 cm	5.02					
			4.99					
		下部 cm	5.00					
		5.00						
		平均値 D cm	5.01					
	高さ		cm	9.92				
			9.94					
		平均値 H cm	9.93					
体積 $V = (\pi D^2/4) \cdot H$ cm ³		195.72						
含水比	容器 No		-					
	m_a	g	426.10					
	m_b	g	381.9					
	m_c	g	-					
	w	%	11.6					
水	容器 No							
	m_a	g						
	m_b	g						
	m_c	g						
	w	%						
平均値 w %		11.6						
湿潤密度 $\rho_t = m/V$ g/cm ³		2.177						
乾燥密度 $\rho_d = \rho_t / (1 + w/100)$ g/cm ³		1.951						
間隙比 $e = (\rho_s / \rho_d) - 1$								
飽和度 $S_r = w \rho_s / (e \rho_w)$ %								
土粒子の密度 ρ_s g/cm ³								
平均値	w	%	11.6					
	ρ_t	g/cm ³	2.177					
	ρ_d	g/cm ³	1.951					
	e							
	S_r	%						

特記事項

調査件名 _____ 試験年月日 6年 2月 19日

試料番号(深さ) ⑦ (~ m) 試験者 _____

土質名称		供試体 No	1			
液性限界 w_L %		試料の状態	湿潤			
塑性限界 w_p %		高さ H_0 cm	9.96			
荷重計容量 t_{cap} kgf	50	直径 D_0 cm	5.01			
ひずみ速度 %/min	0.1	質量 m g	425.8			
特記事項		湿潤密度 ρ_t g/cm ³	2.169			
		含水比 w %	13.7			
		一軸圧縮強さ q_u kgf/cm ²	397.08			
		破壊ひずみ ϵ_f %				
		E_{50} (割線) kgf/cm ²				
		鋭敏比 S_r			静弾性係数	2.94×10^5 Kg/cm ²
	E_{50} (接線) kgf/cm ²			静ポアソン比	0.200	



調査件名

試験年月日

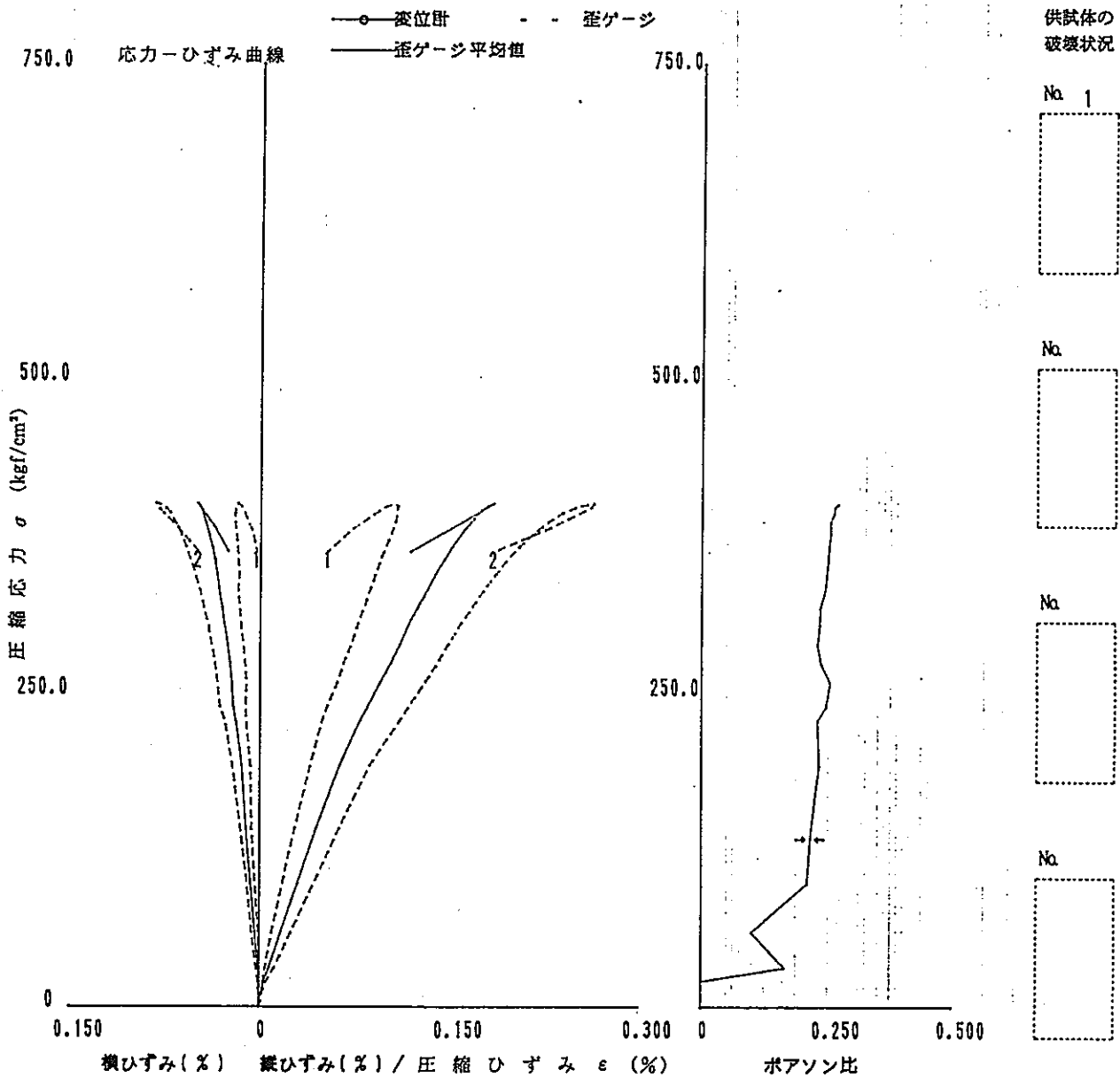
試料番号(深さ)

②

(~)

m) 試験者

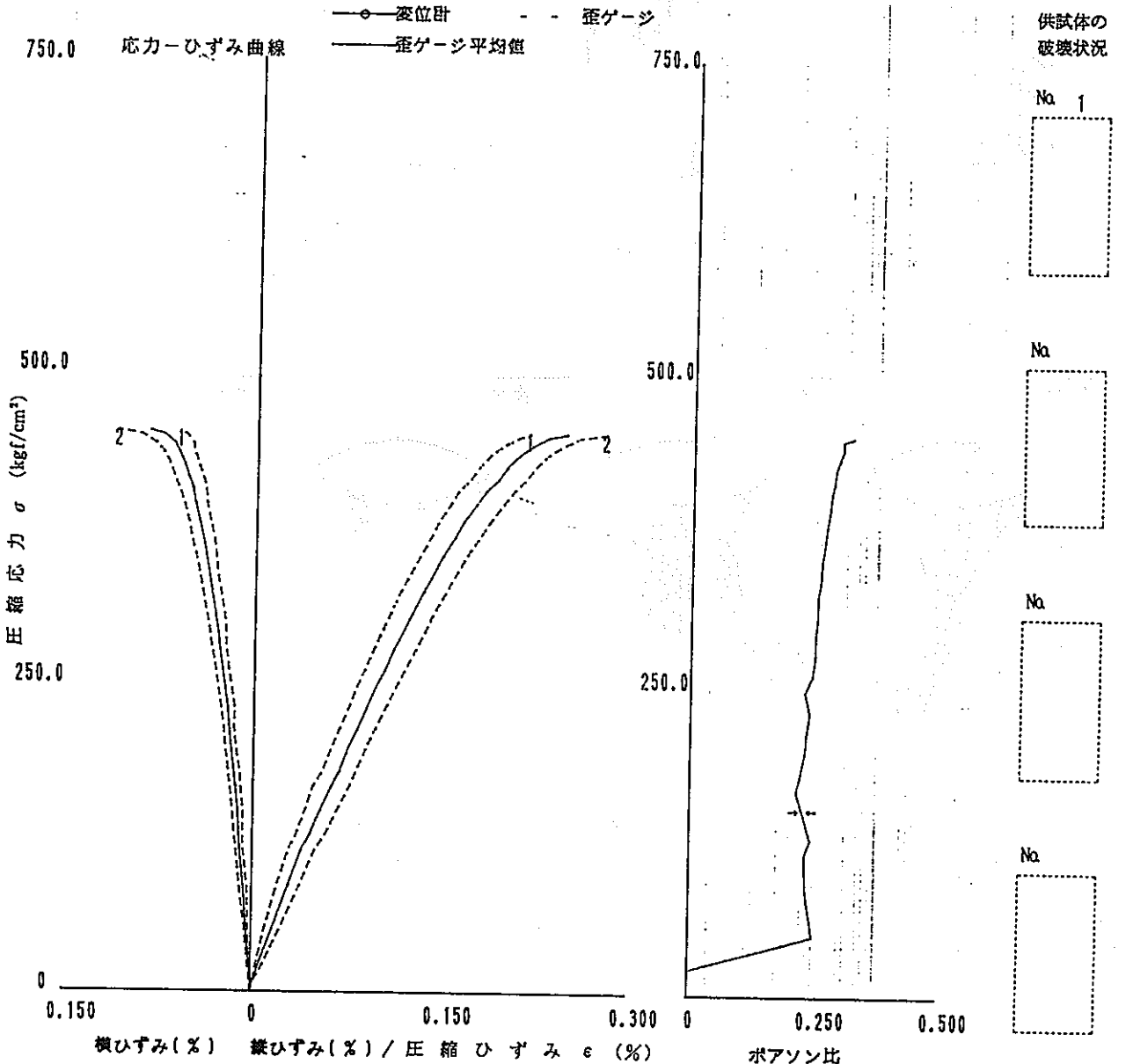
土質名称		供試体 No	1			
液性限界 w_L %		試料の状態	湿潤			
塑性限界 w_p %		高さ H_0 cm	9.96			
荷重計容量 α (kgf)	50	直径 D_0 cm	5.00			
ひずみ速度 %/min	0.1	質量 m g	425.4			
特記事項		湿潤密度 ρ_t g/cm ³	2.175			
		含水比 w %	13.2			
		一軸圧縮強さ q_u kgf/cm ²	400.18			
		破壊ひずみ ϵ_f %				
		E_{50} (割線) kgf/cm ²				
		鋭敏比 S_r			静弾性係数	3.37×10^5 Kgf/cm ²
	E_{50} (接線) Kgf/cm ²			静ポアソン比	0.211	



調査件名 _____ 試験年月日 6年 2月 19日

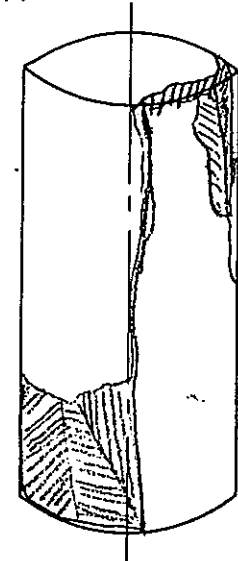
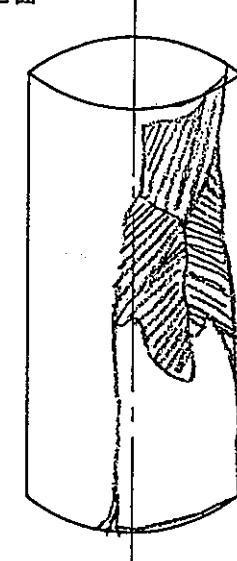
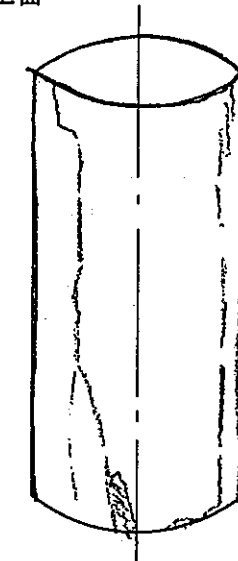
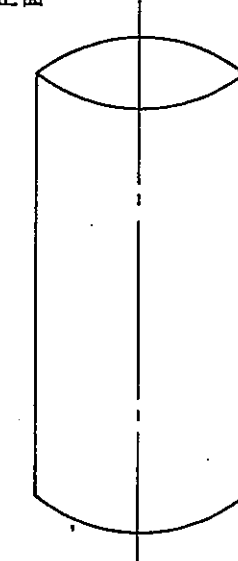
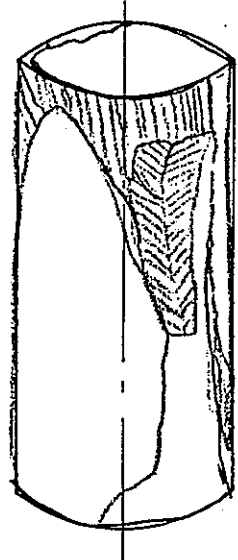
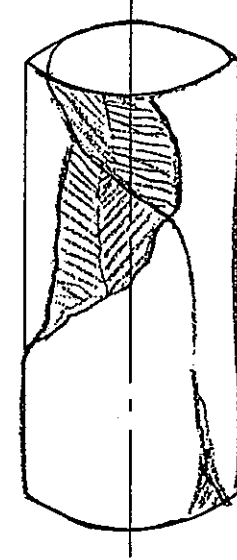
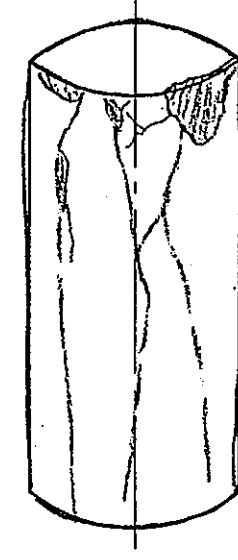
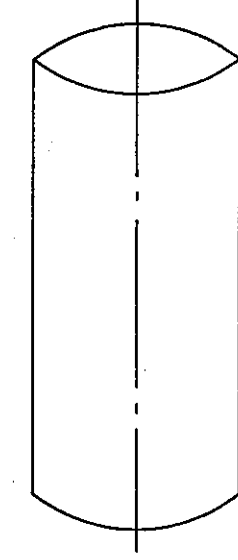
試料番号(深さ) ③ (~ m) 試験者 _____

土質名称		供試体 No	1			
液性限界 w_L %		試料の状態	湿潤			
塑性限界 w_p %		高さ H_0 cm	9.93			
荷重計容量 t_{enf} kgf	50	直径 D_0 cm	5.01			
ひずみ速度 %/min	0.1	質量 m g	426.1			
特記事項		湿潤密度 ρ_t g/cm ³	2.177			
		含水比 w %	11.6			
		一軸圧縮強さ q_u kgf/cm ²	451.17			
		破壊ひずみ ϵ_f %				
		E_{50} (割線) kgf/cm ²				
		鋭敏比 S_t			静弾性係数	2.71×10^5 Kgf/cm ²
	E_{50} (接線) Kgf/cm ²			静ポアソン比	0.229	



調査名・調査地点 _____ 試験年月日 6年 2月 19日

試料番号・深さ：No _____ (_____ m ~ _____ m) 試験者 _____

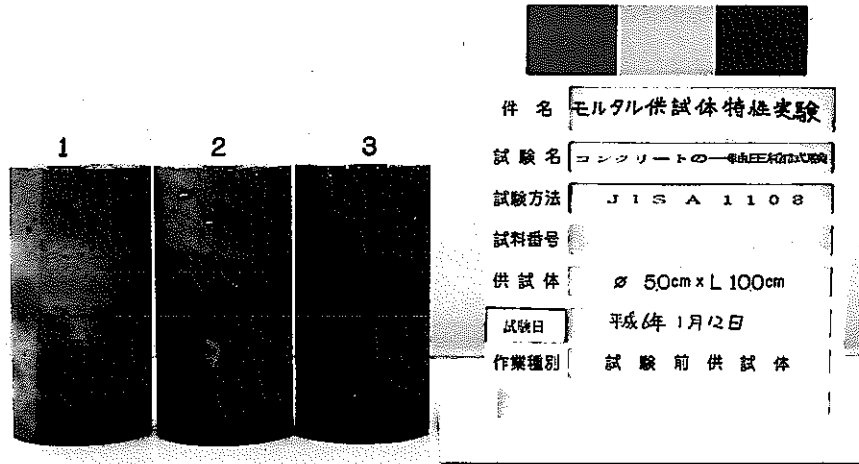
No ①	No ②	No ③	No
深度 正面 	深度 正面 	深度 正面 	深度 正面 
ほぼ垂直に剪断。	70~80度に剪断。	ほぼ垂直に剪断。	
裏面 	裏面 	裏面 	裏面 

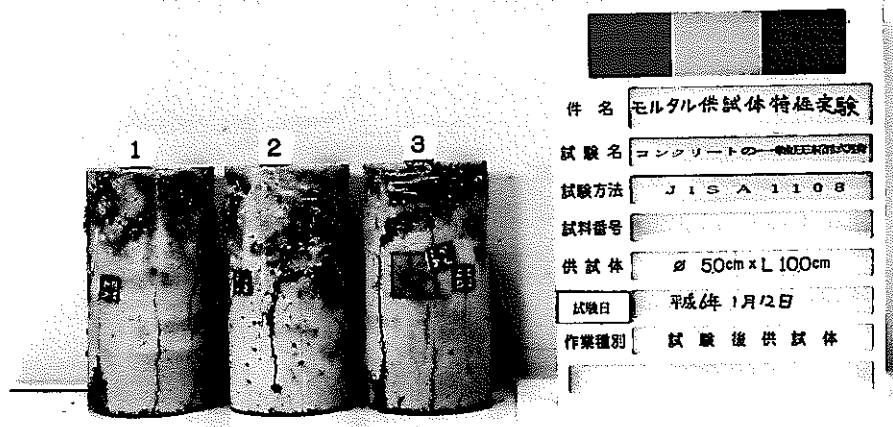
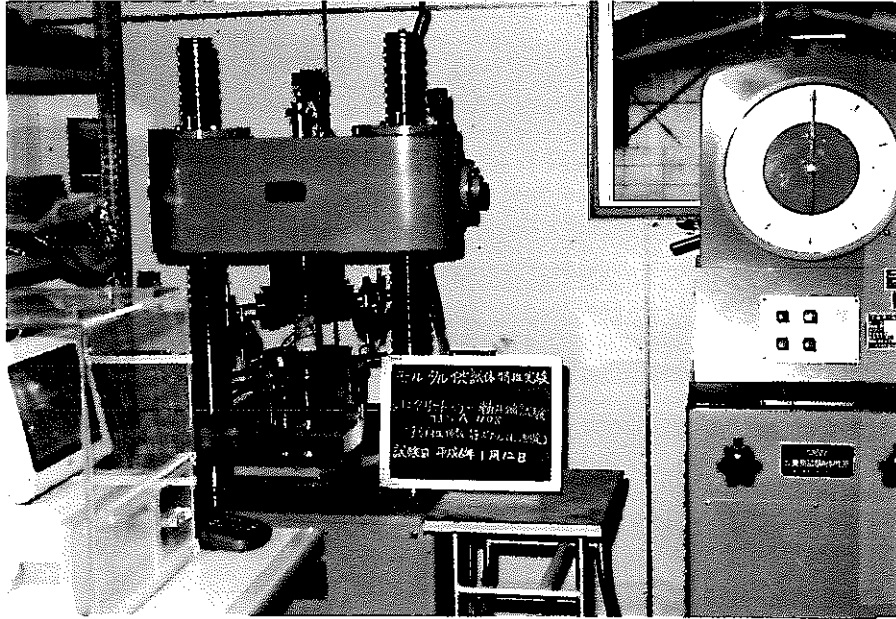
資料 - 5 写真集

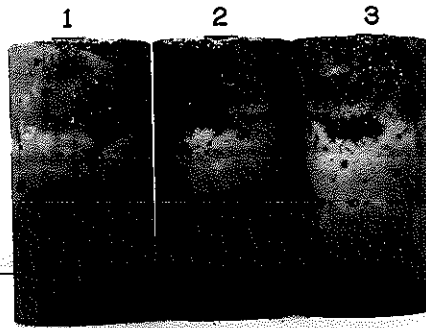
①モルタル物性試験

②試験状況

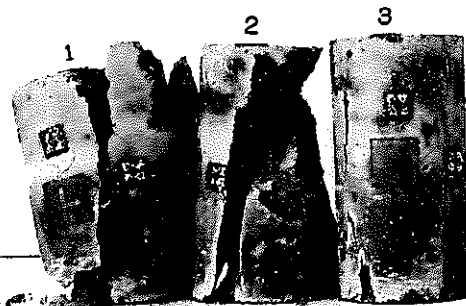
①モルタル物性試験







件名	モルタル供試体特性実験
試験名	コンクリートの圧縮強度試験
試験方法	JIS A 1108
試料番号	
供試体	φ 50cm x L 100cm
試験日	2月19日
作業種別	試験前供試体

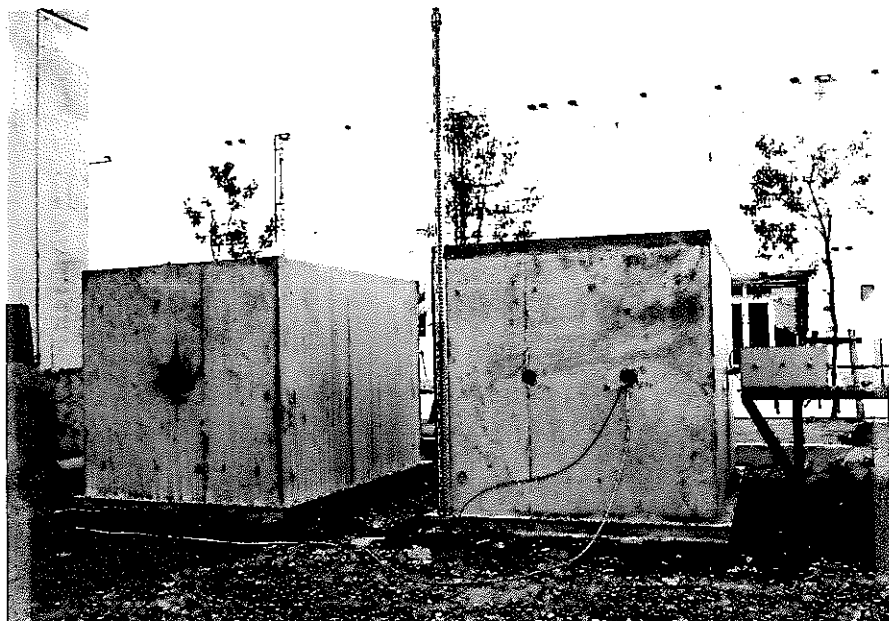


件名	モルタル供試体特性実験
試験名	コンクリートの圧縮強度試験
試験方法	JIS A 1108
試料番号	
供試体	
試験日	2月19日
作業種別	試験後供試体

② 試験状況

モルタルブロック試験体

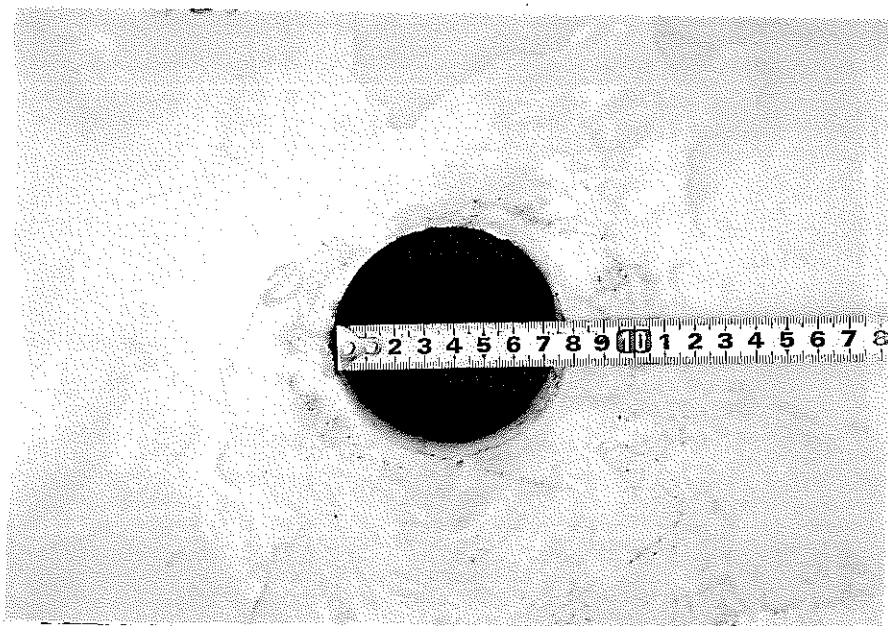
- ・モルタルの配合は砂セメント比 = 2 : 1
- ・周波数・振幅試験、指向特性試験ともに試験体の大きさは幅1.4m × 高さ1.4m × 長さ2 m



受振用ボーリング孔

- ・ボーリング孔径は $\phi 75\text{mm}$ 、穿孔間隔は 50cm
- ・穿孔長は周波数・振幅試験は $L = 75\text{cm}$ 、指向特性試験は $L = 175\text{cm}$

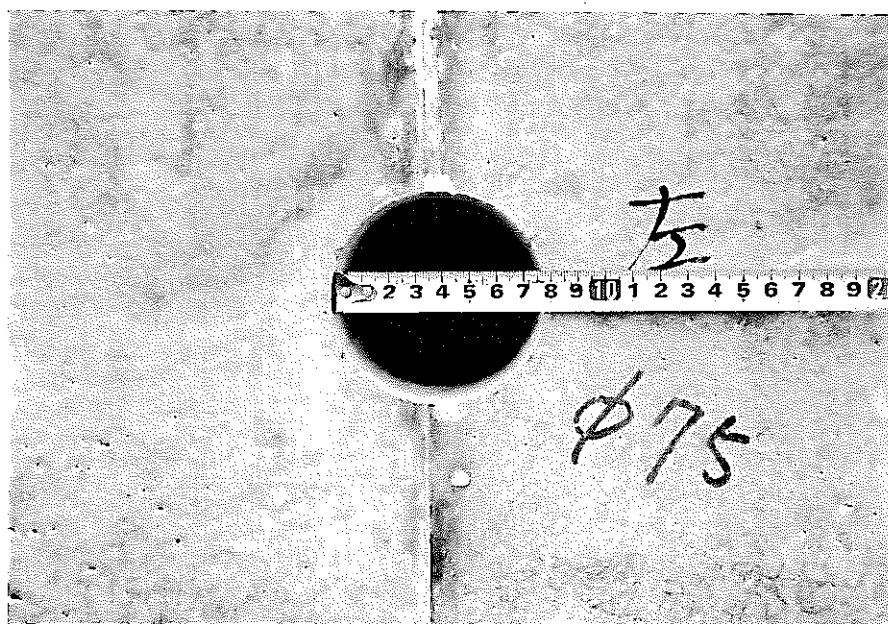
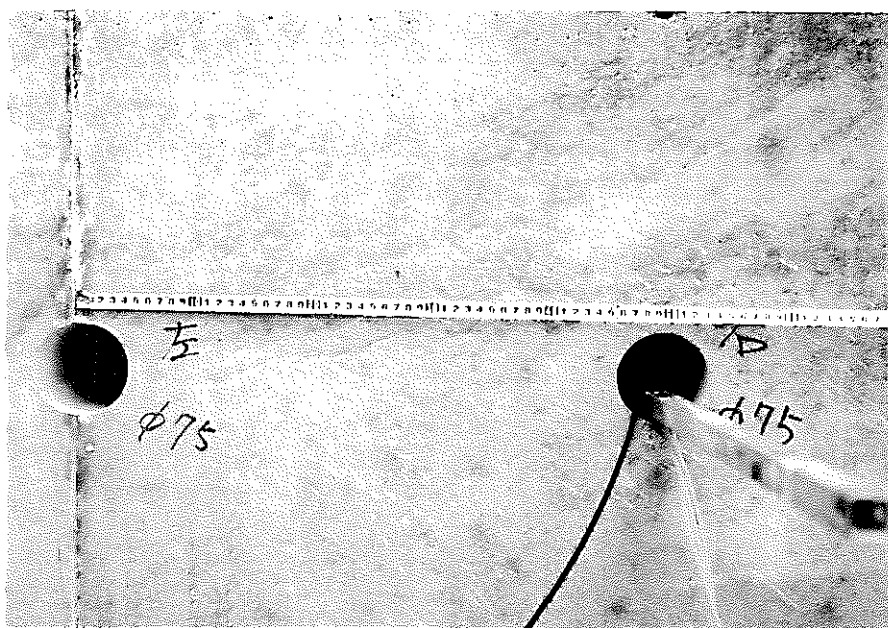
下の写真は周波数・振幅試験用試験体のボーリング



受振用ボーリング孔

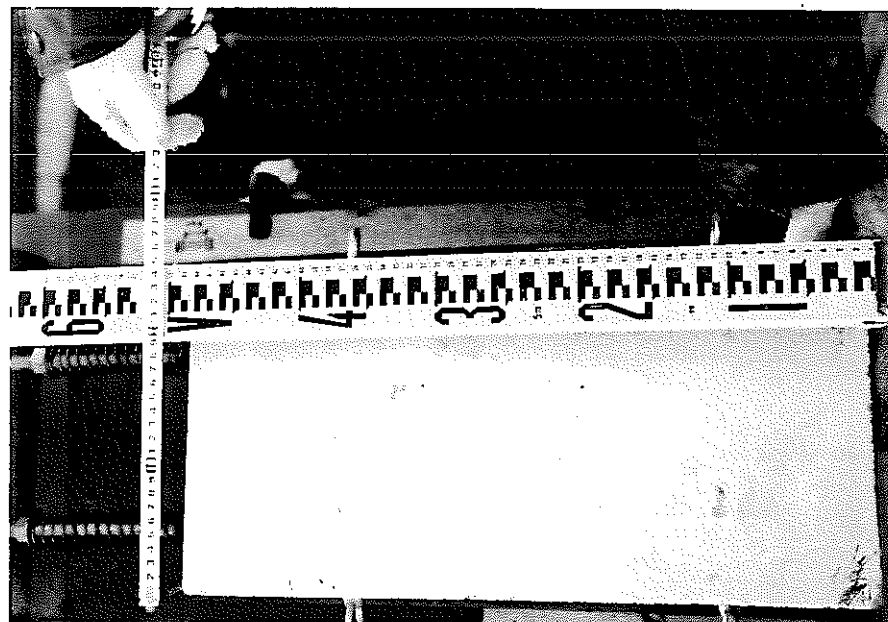
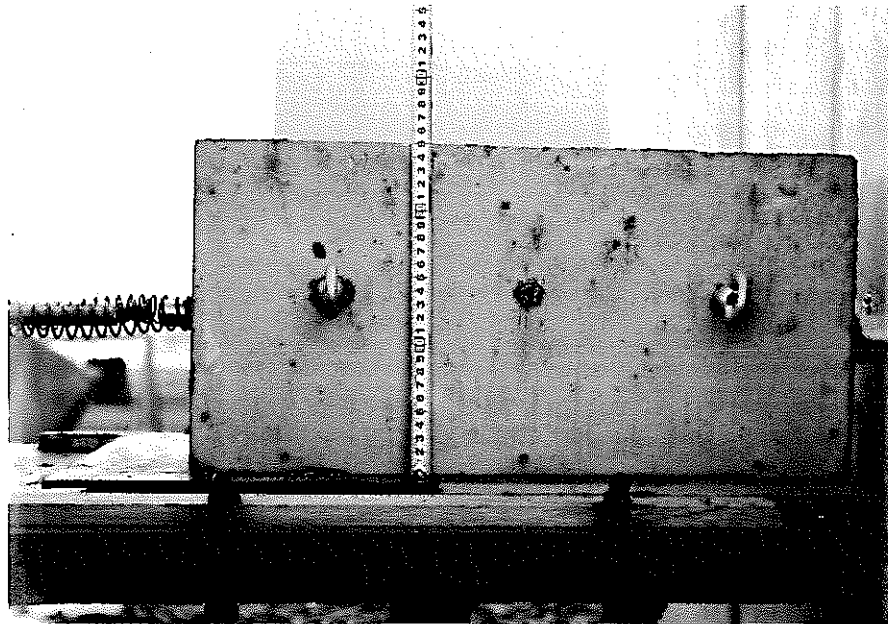
- ・ボーリング孔径は $\phi 75$ mm、穿孔間隔は50cm
- ・穿孔長は周波数・振幅試験は $L = 75$ cm、指向特性試験は $L = 175$ cm

下の写真は指向特性試験用試験体のボーリング



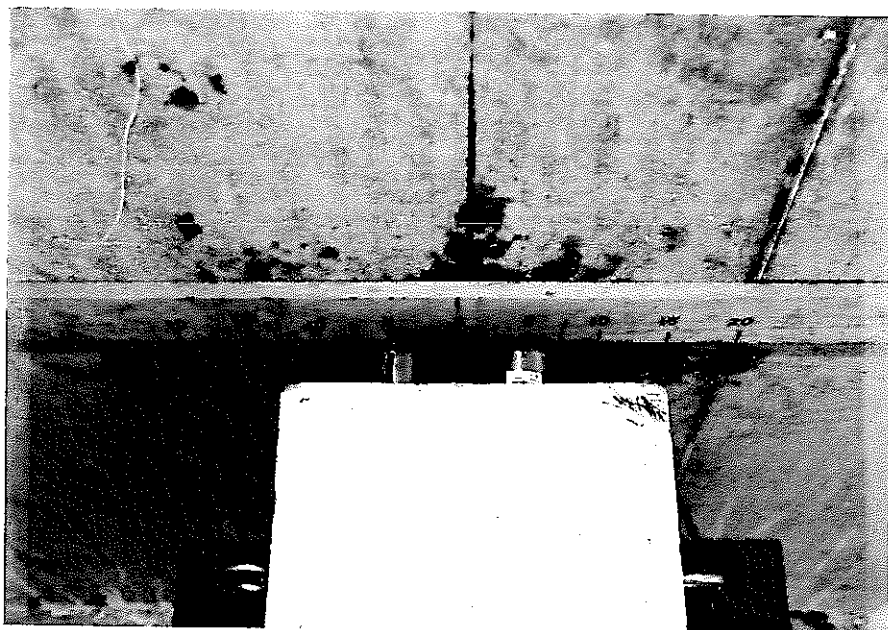
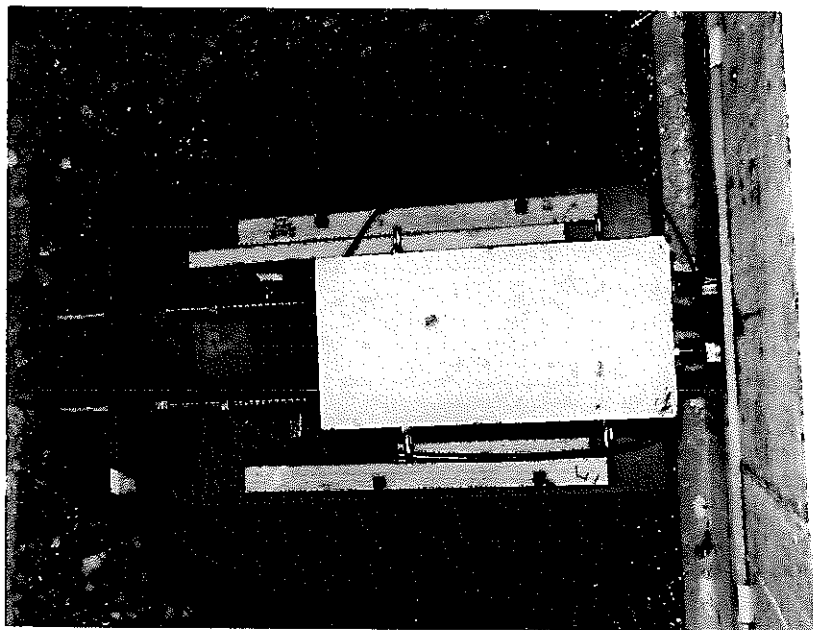
反カブロック

・反カブロックの大きさは幅25cm×高さ25cm×長さ50cm



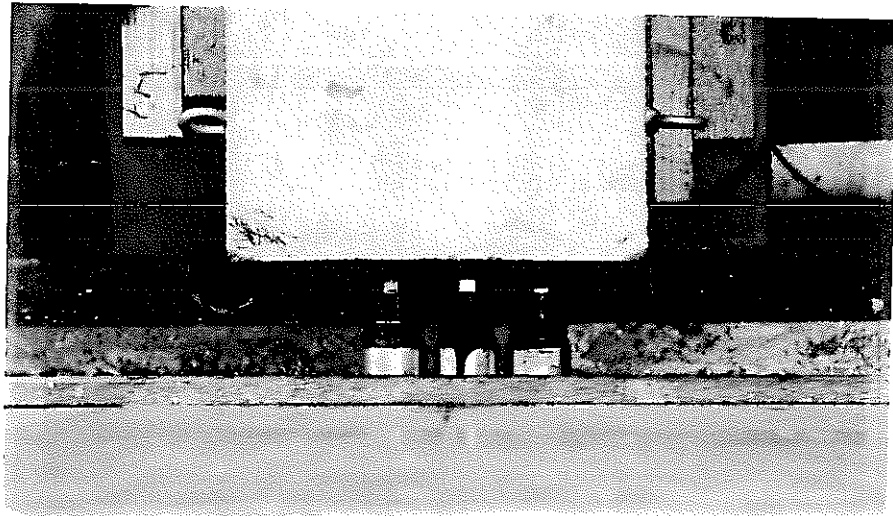
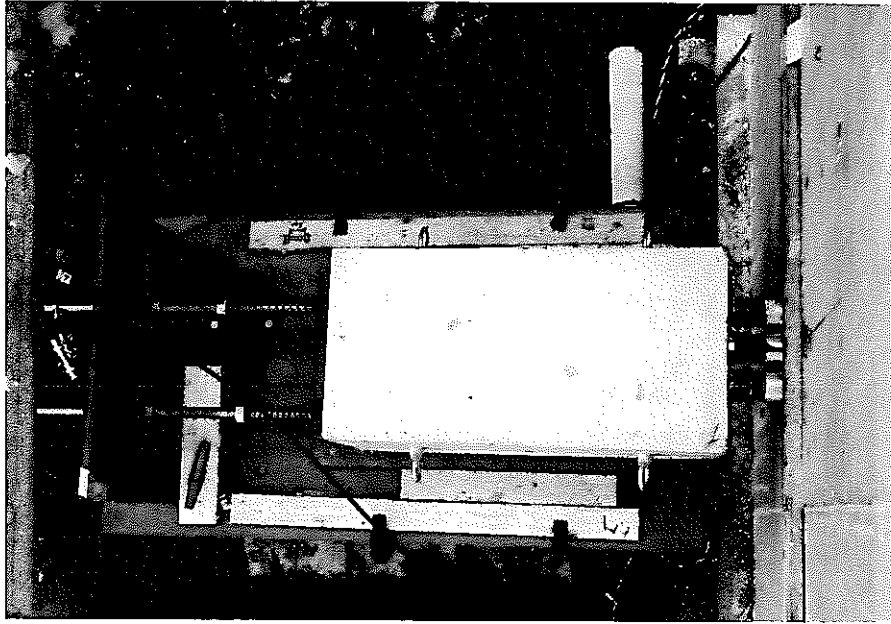
試験状況

- ・ 圧電素子を2個並列（中央振り分け方式）に設置した場合の実験
下の写真は素子間隔10cmの実験状況



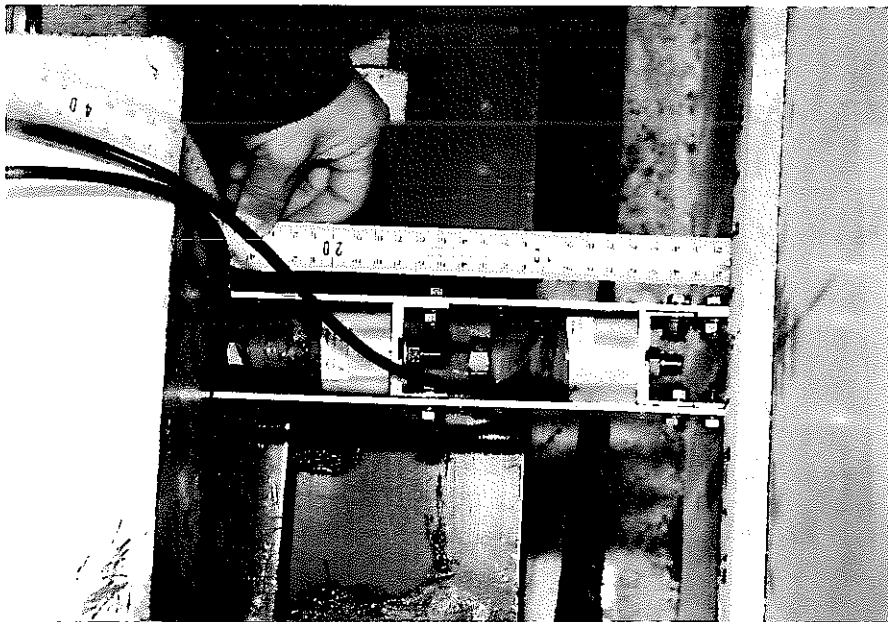
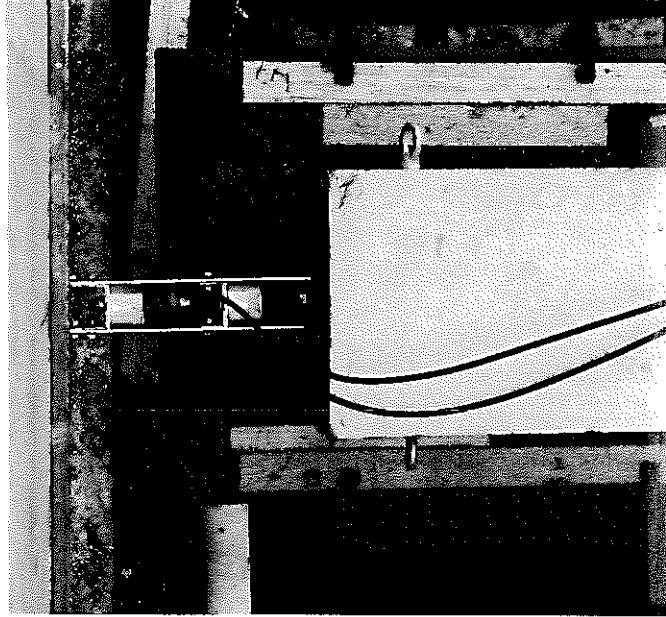
試験状況

- ・ 圧電素子 3 個の場合の実験状況



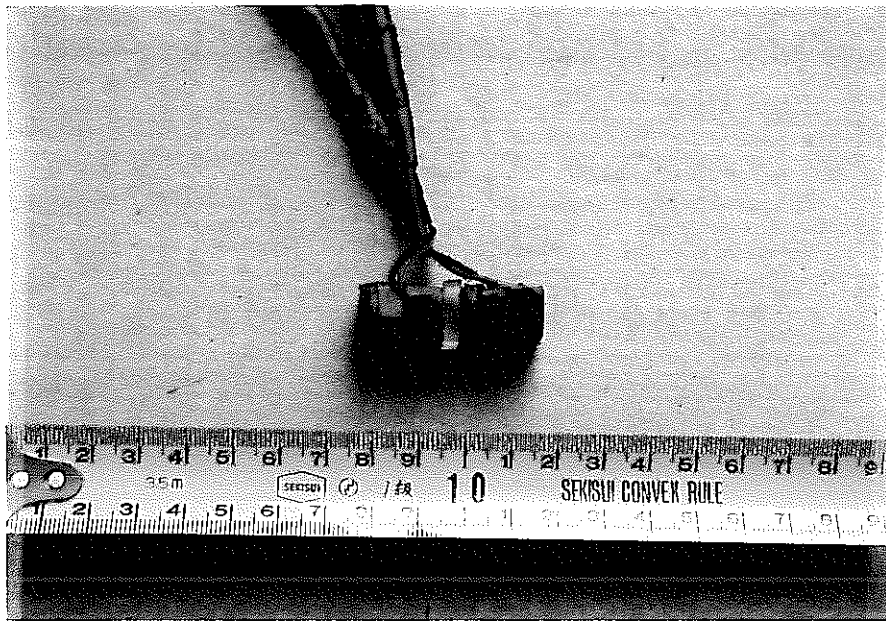
試験状況

- ・ 圧電素子を直列に配置した場合の実験状況



試験状況

- ・ 圧電アクチュエータを直列に配置する場合の発振素子



資料 - 6 測定結果

スペクトル分析

素子の種類	素子の配置	周波数・振幅測定試験	指向特性測定試験
圧電素子	1 個	実験 1	実験 1 1
	2 個 中央固定 並列	実験 2	
		実験 3	
	3 個 並列	実験 4	
	2 個 直列	実験 5	
圧電 アクチュ エータ	1 個	実験 6	実験 1 2
	2 個 中央固定 並列	実験 7	
		実験 8	
	3 個 並列	実験 9	
	2 個 直列	実験 1 0	

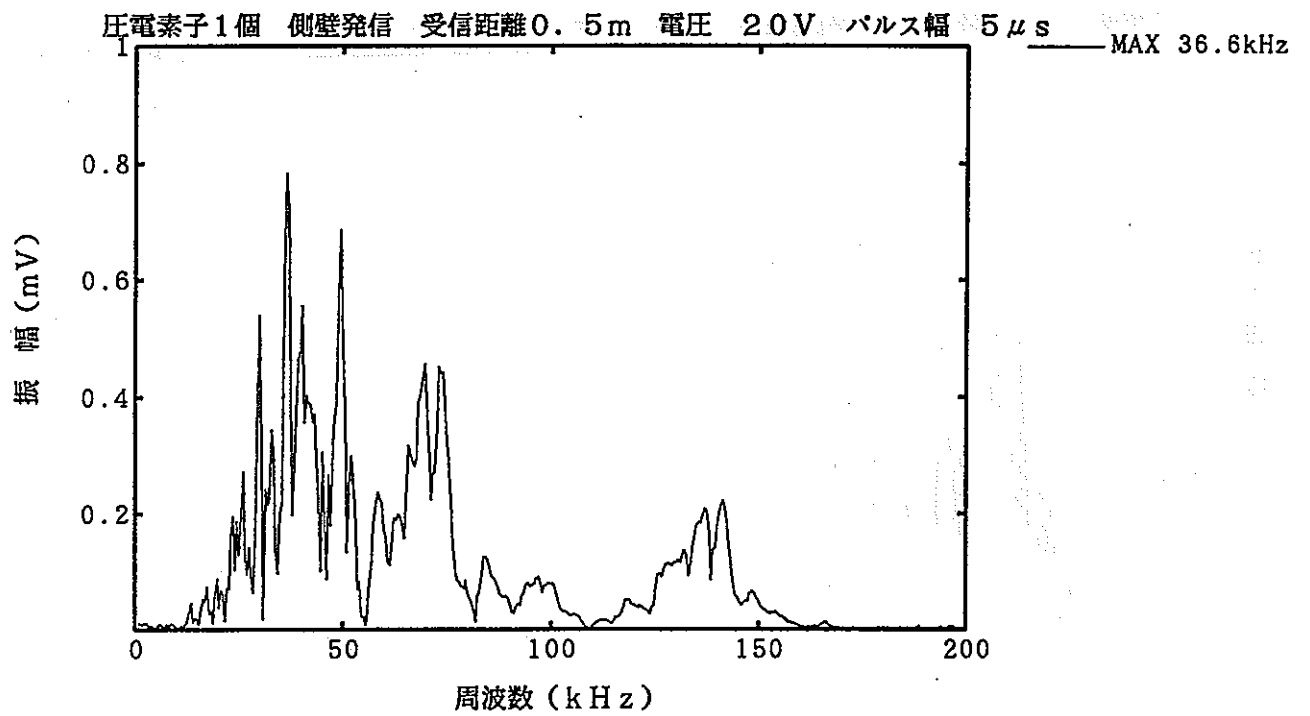
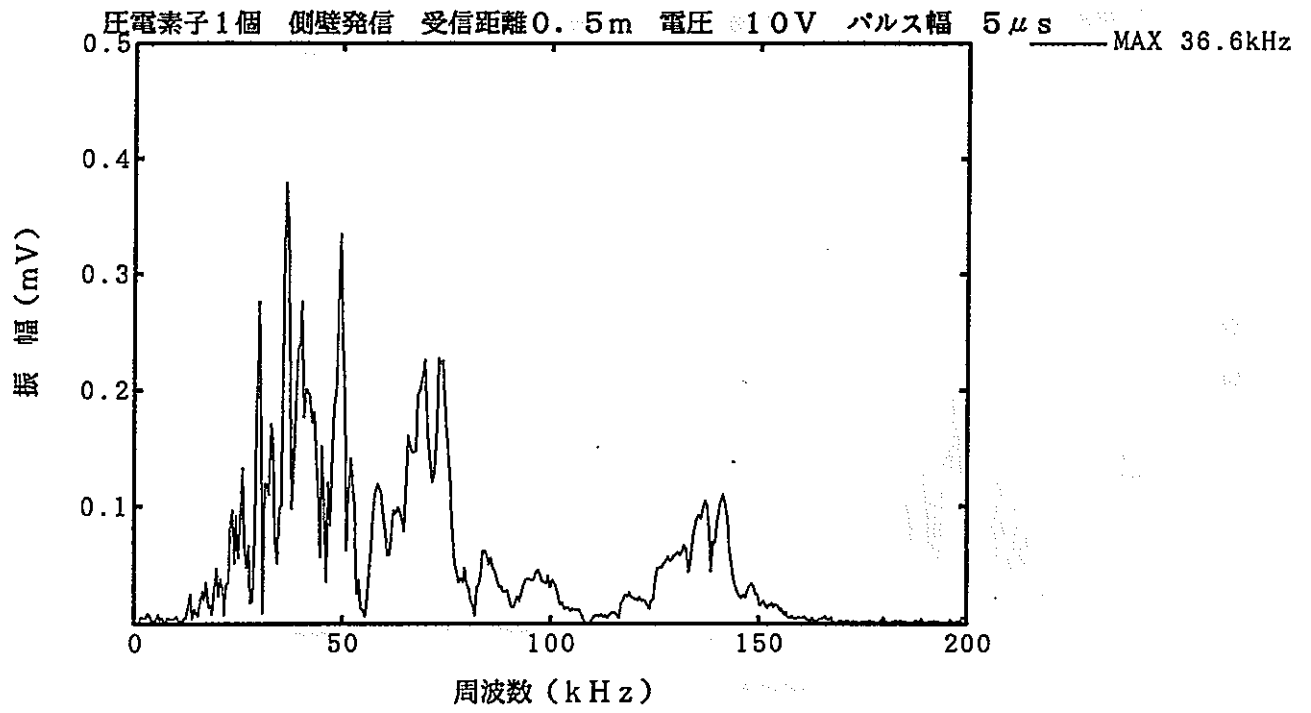
(備考)

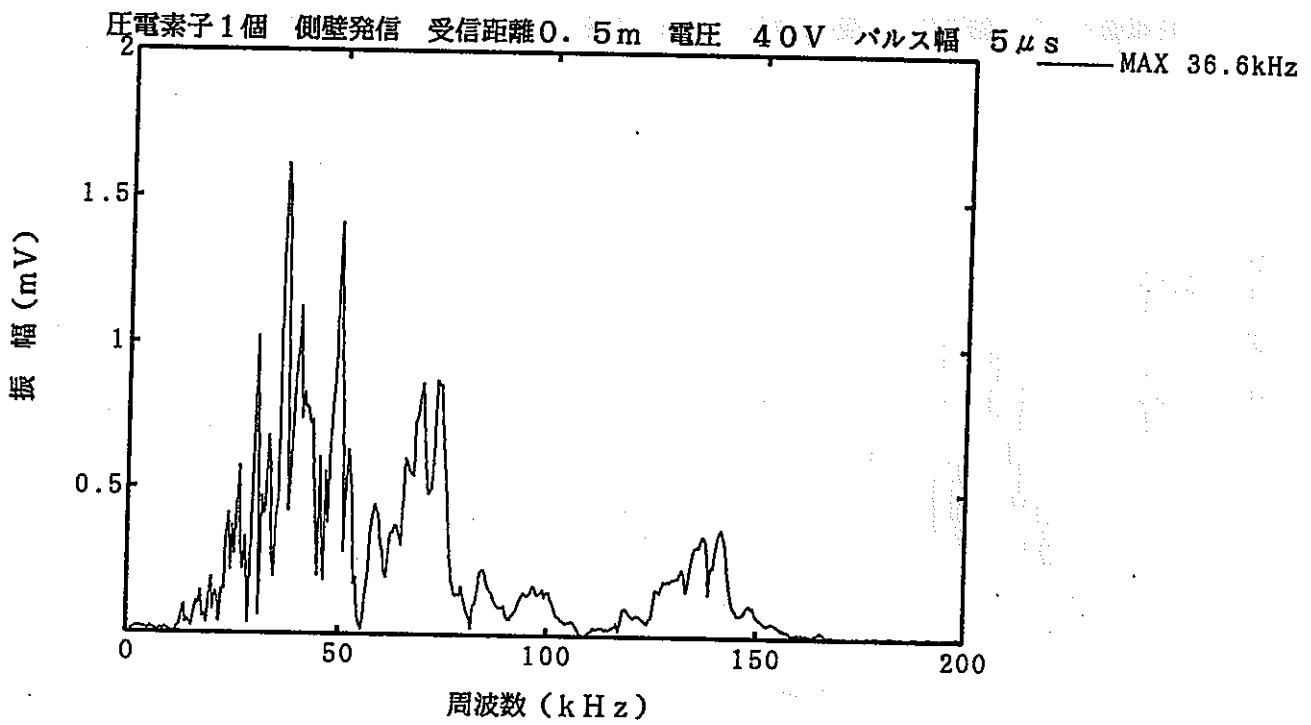
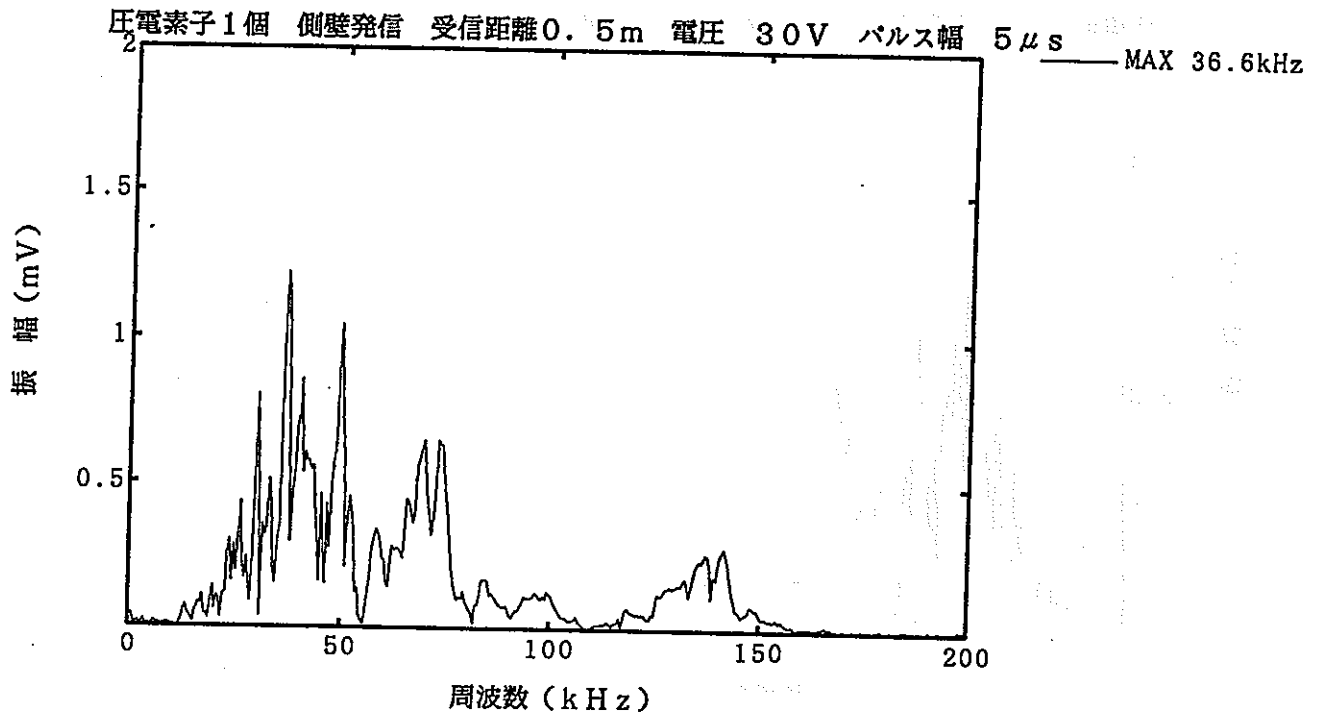
実験 1 ~ 実験 1 0 には下位のインデックスがある。

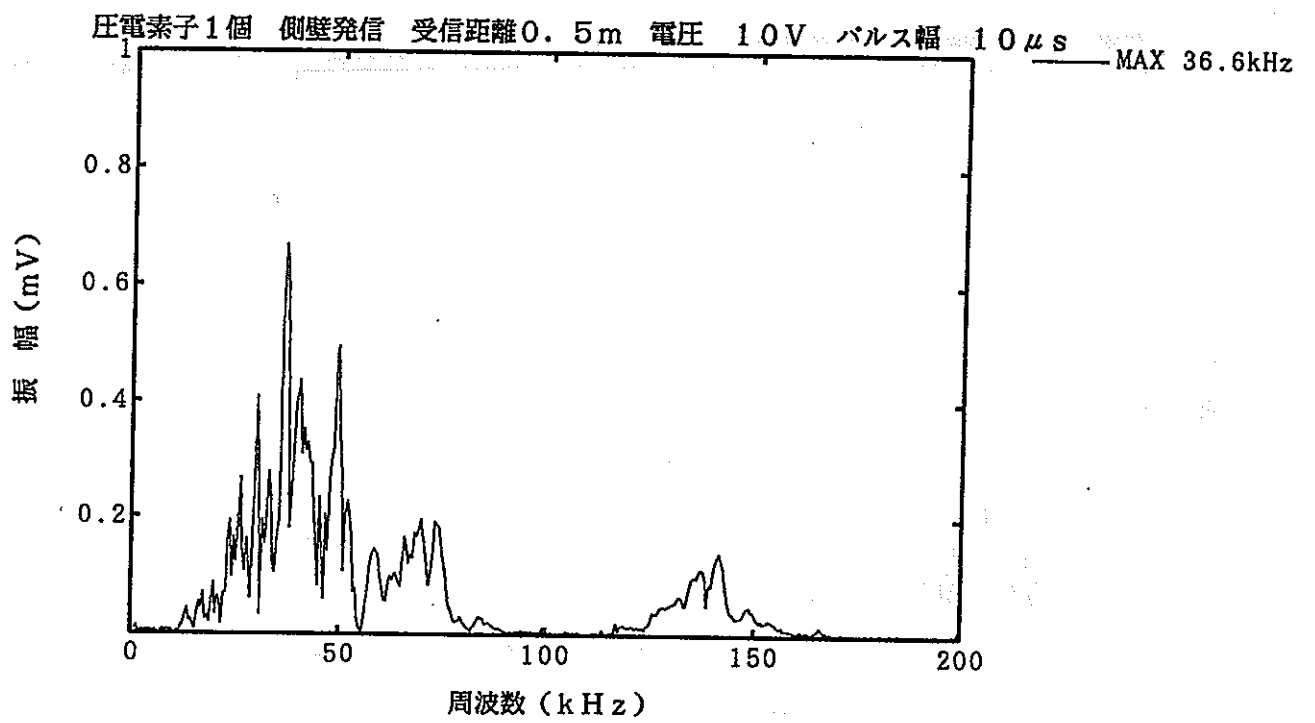
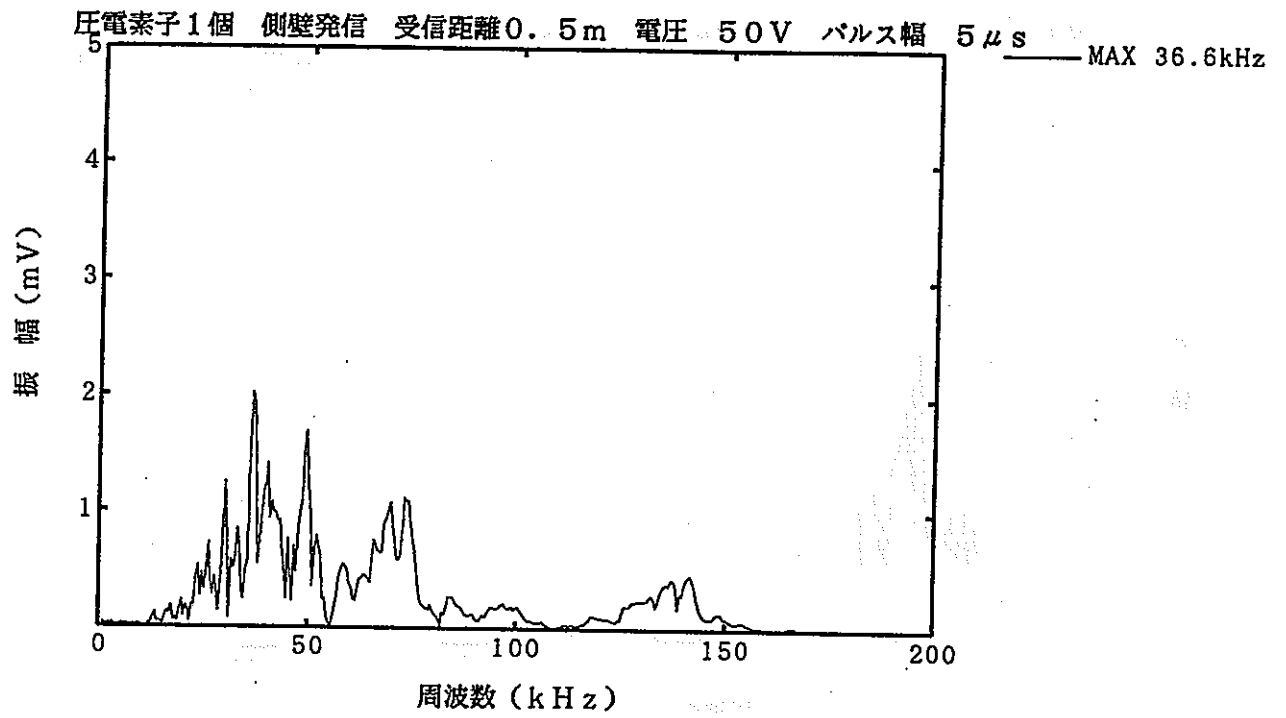
実験 0 - 1 : 発振・受振点間距離 5 0 c m での測定

実験 0 - 2 : 1 0 0 c m での測定

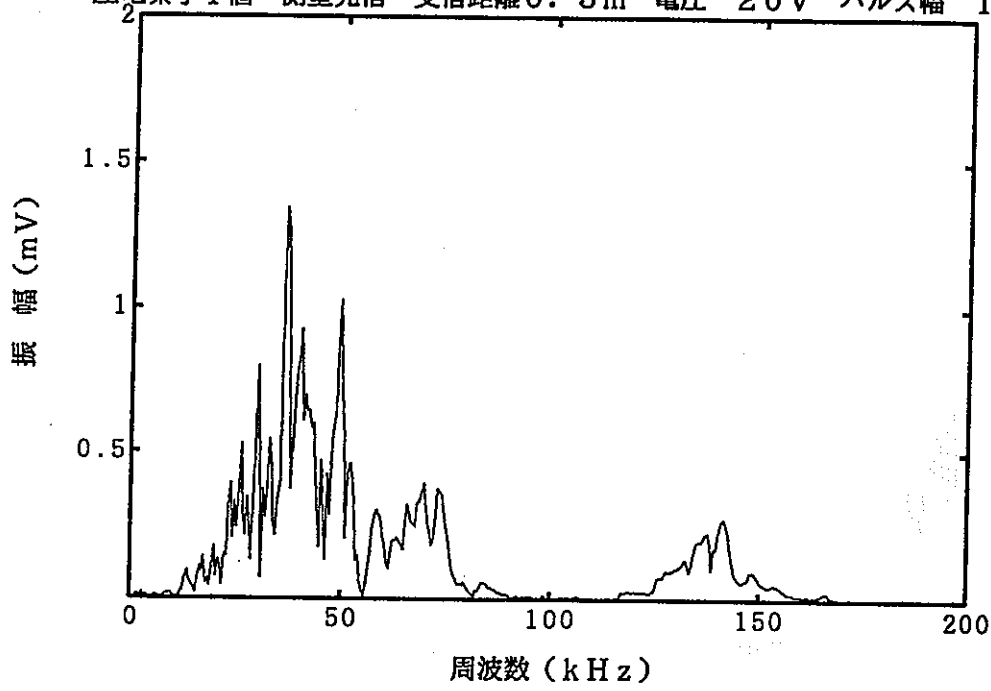
実験 0 - 3 : 1 5 0 c m での測定



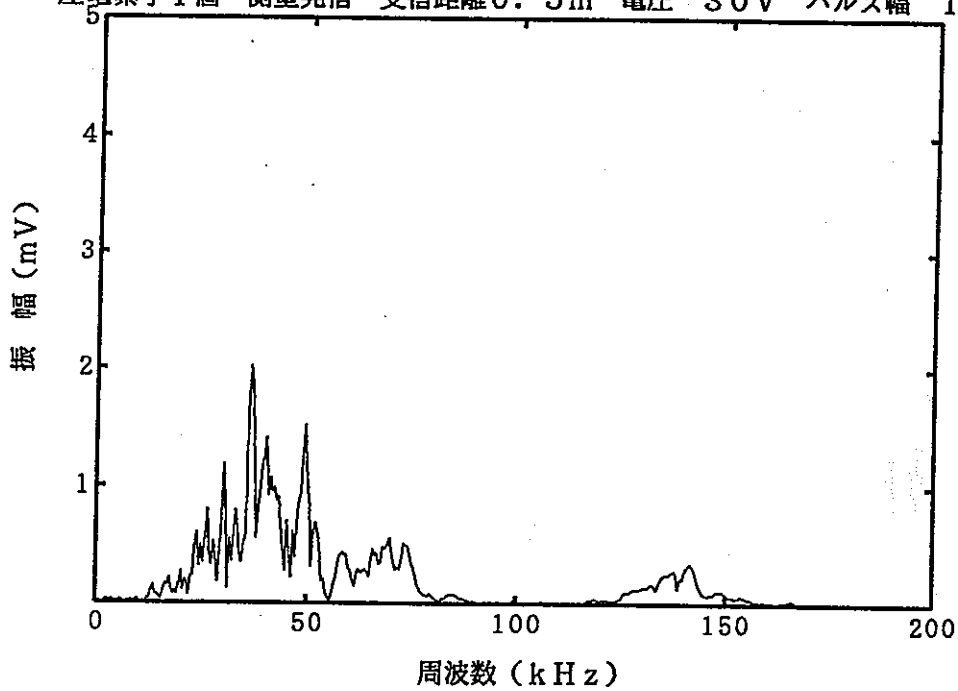


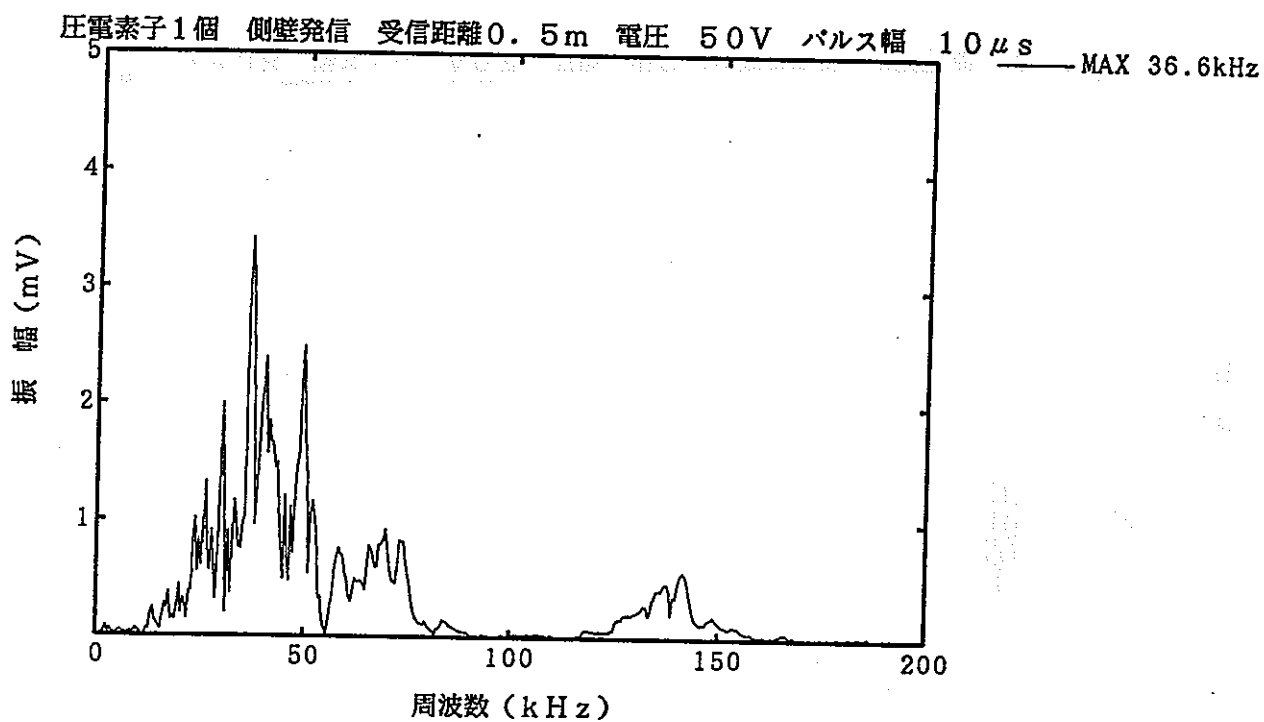
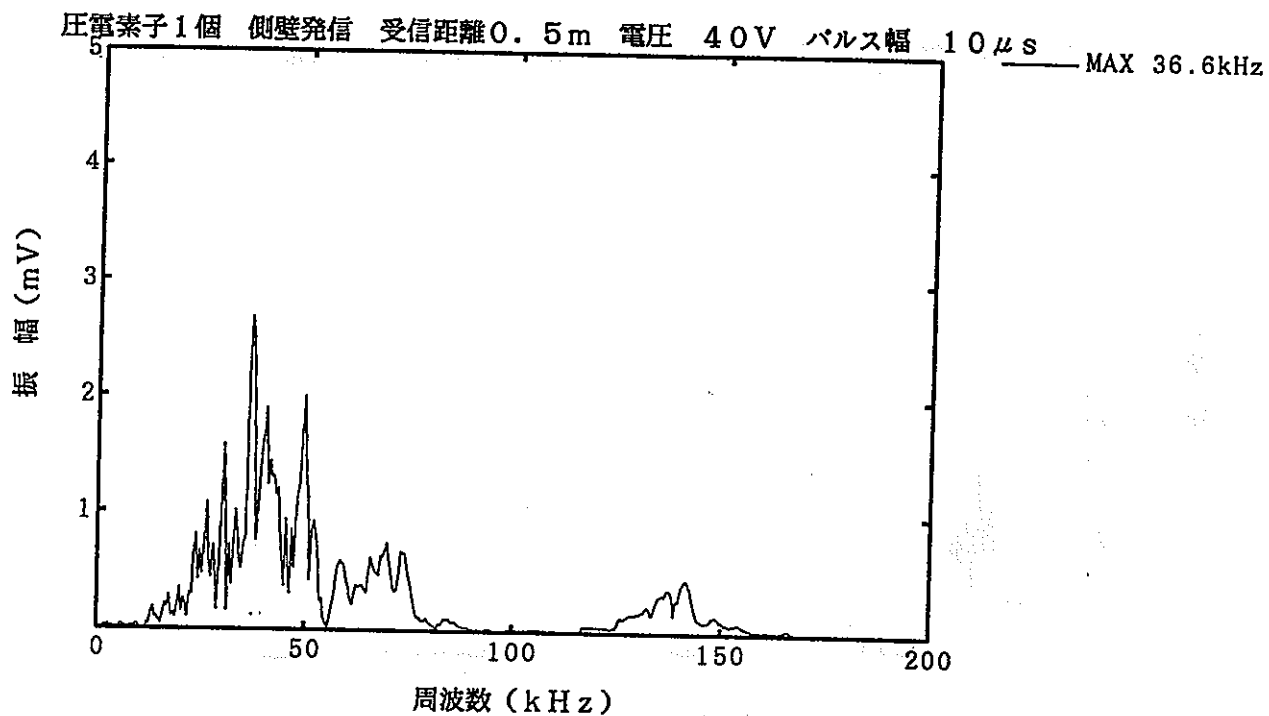


圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 20V パルス幅 10 μ s MAX 36.6kHz

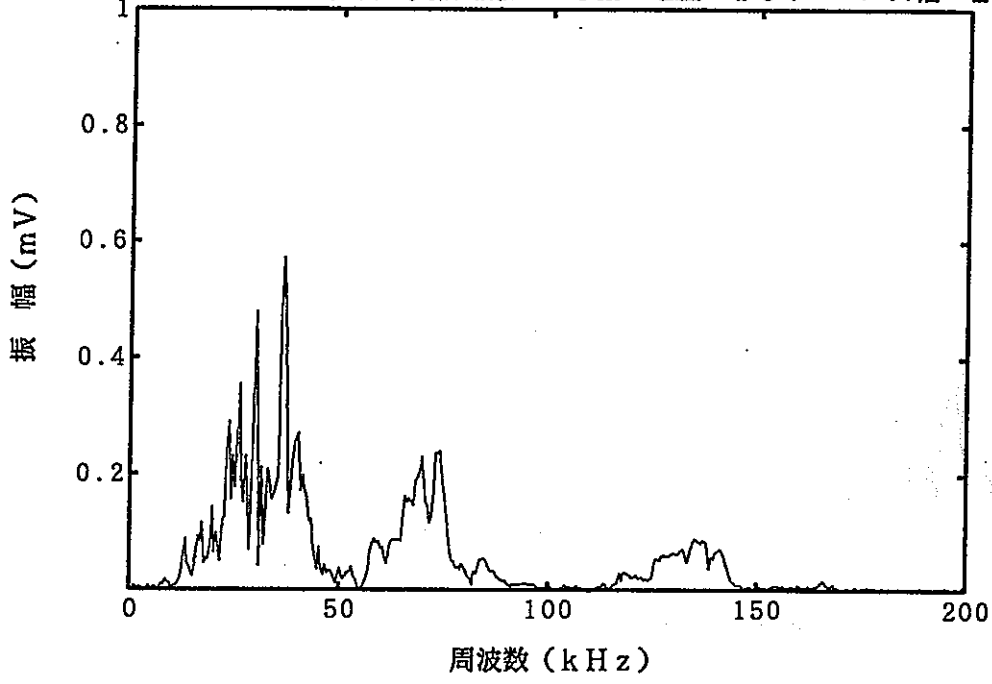


圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 30V パルス幅 10 μ s MAX 36.6kHz

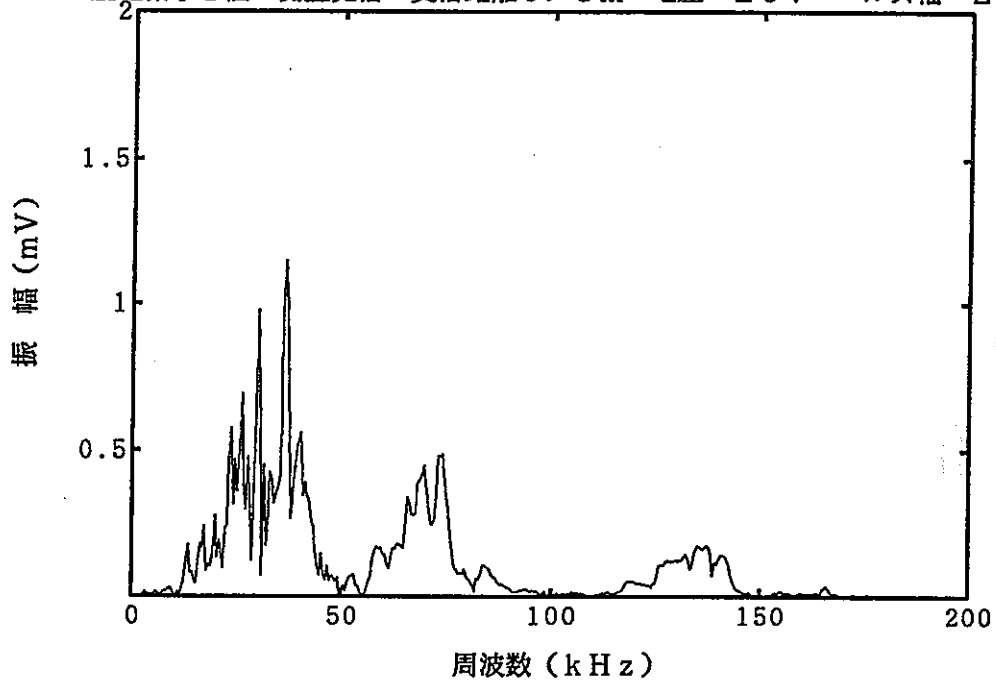


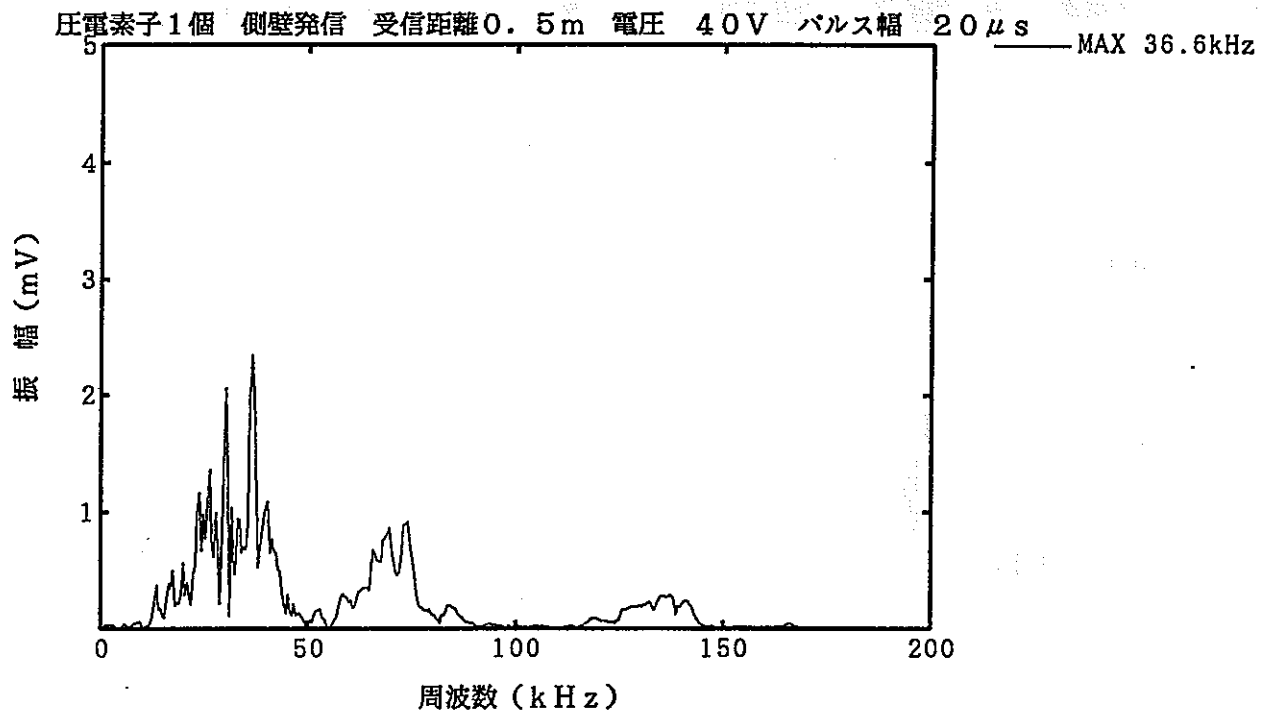
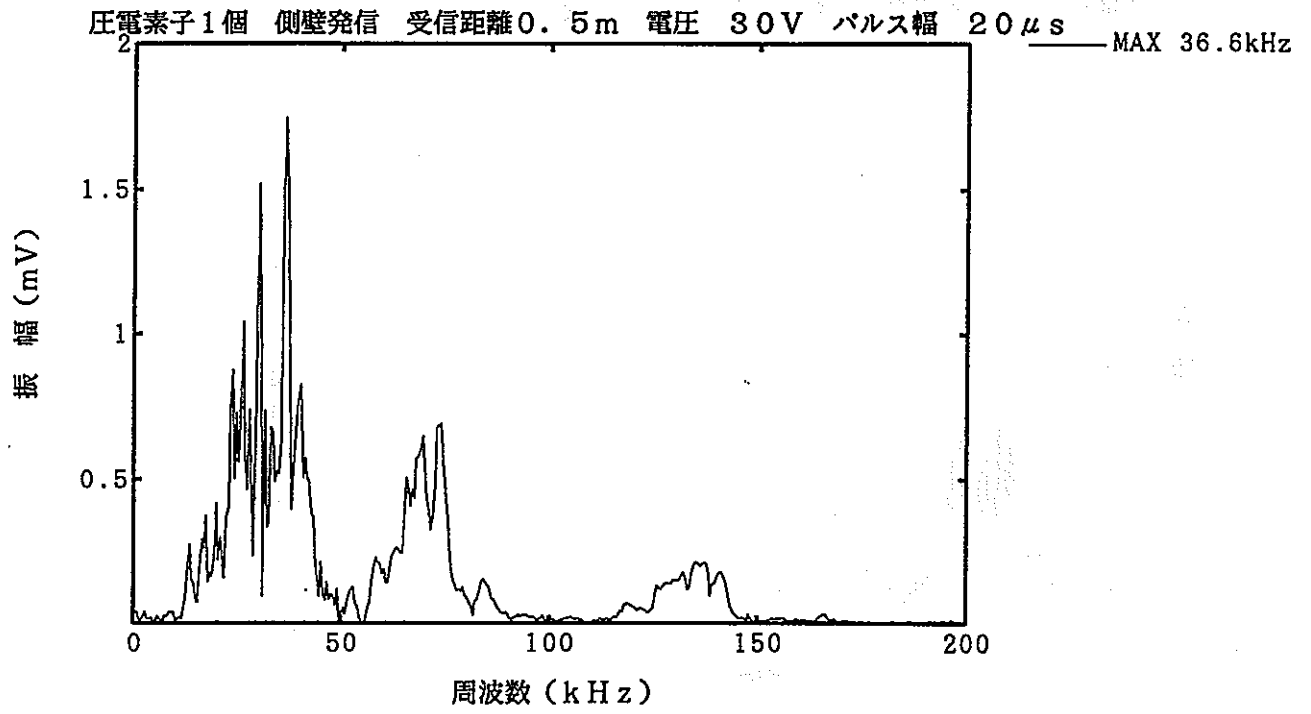


圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 10V パルス幅 20 μ s MAX 36.6kHz

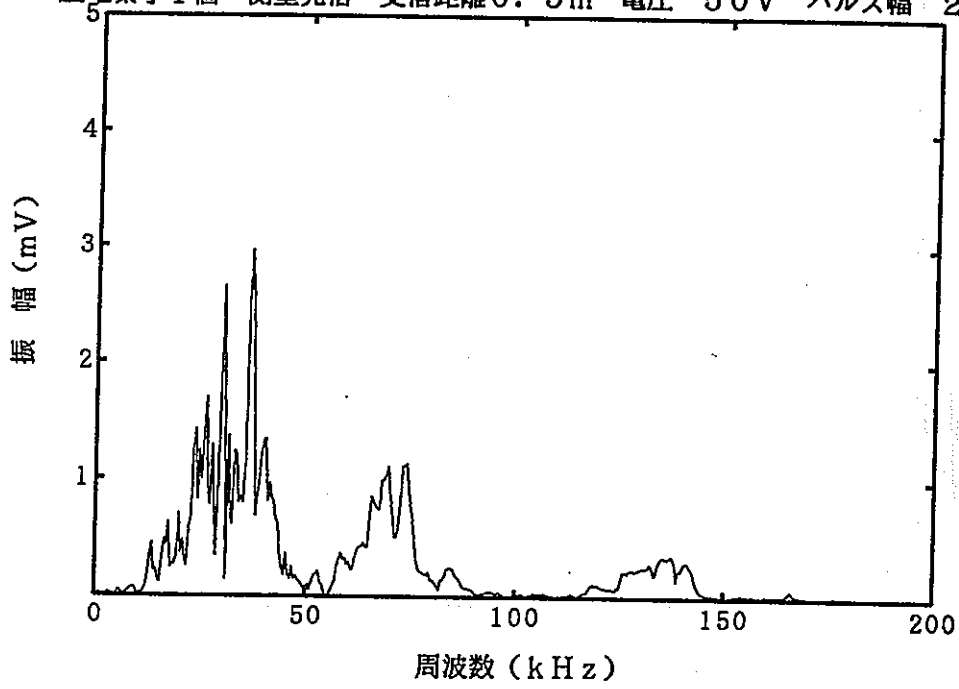


圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 20V パルス幅 20 μ s MAX 36.6kHz

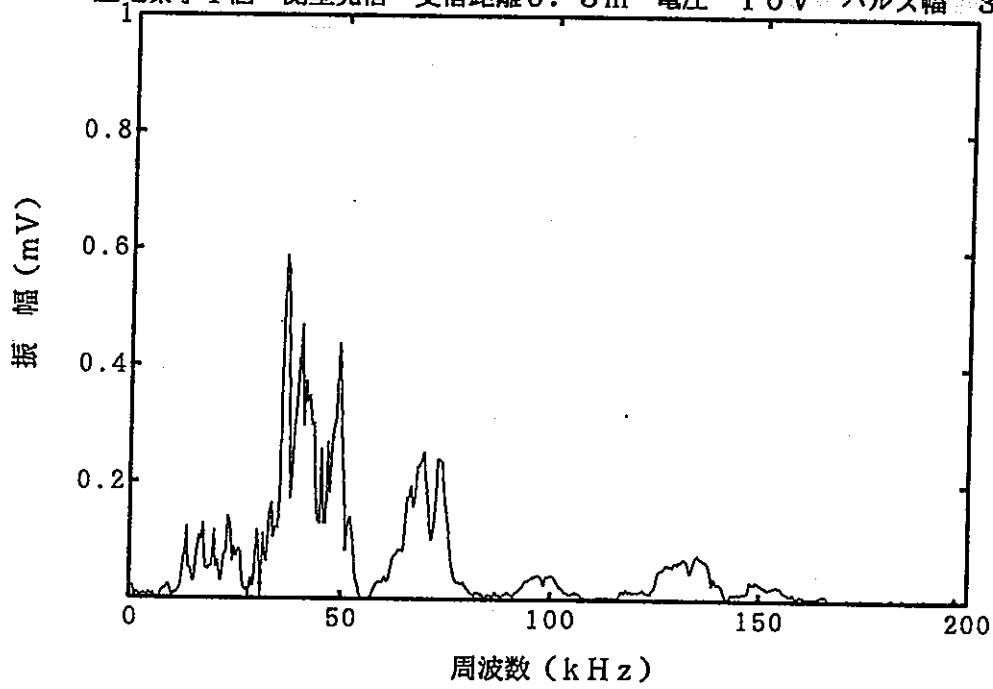




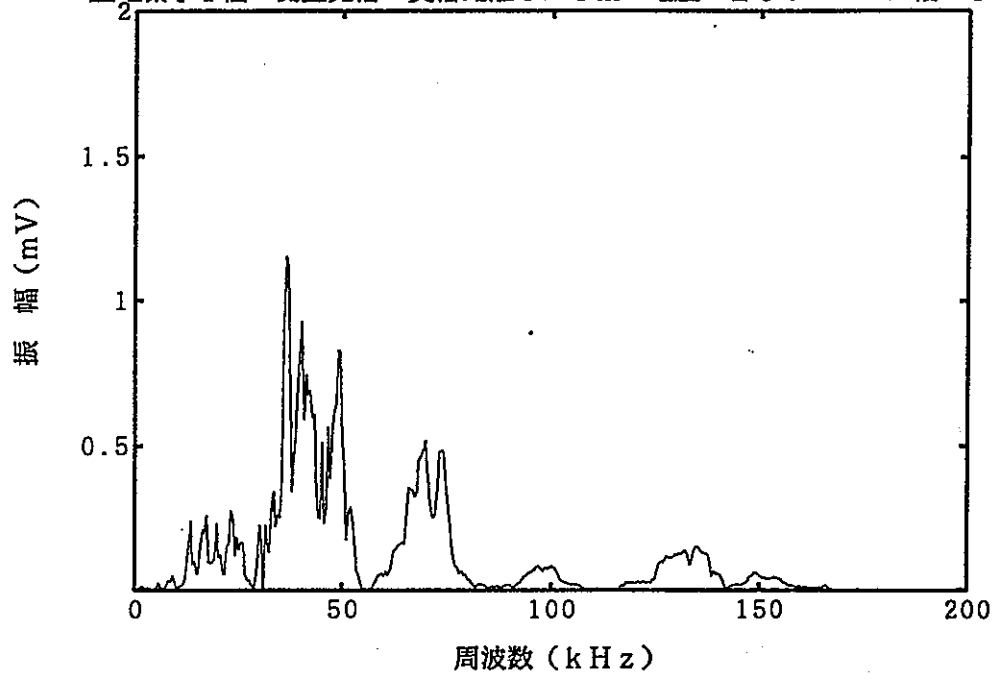
圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 50V パルス幅 20 μ s MAX 36.6kHz



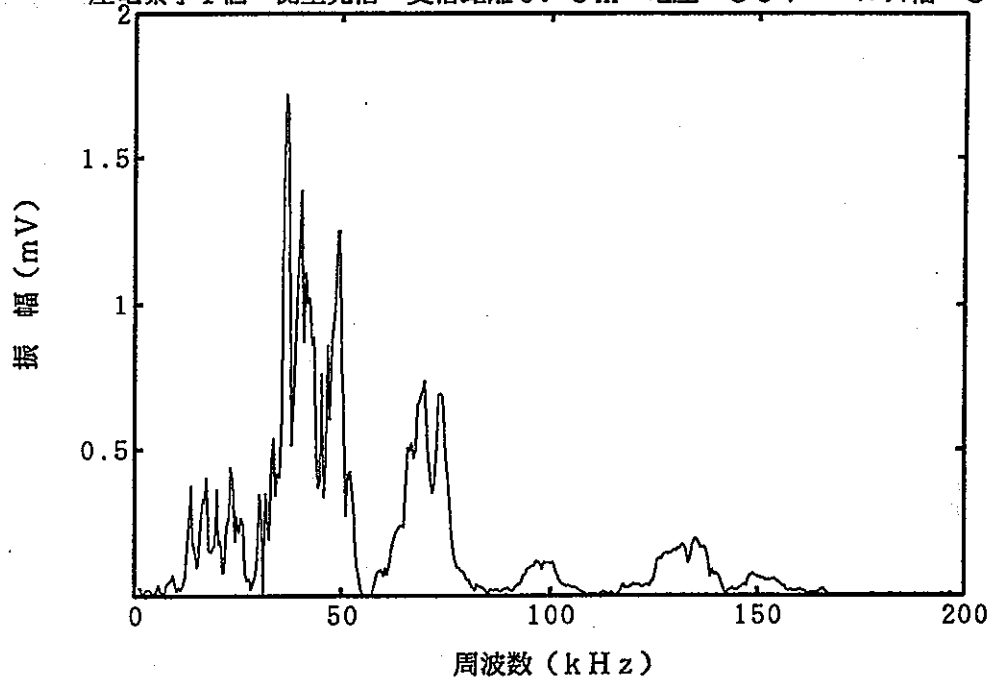
圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 10V パルス幅 35 μ s MAX 36.6kHz



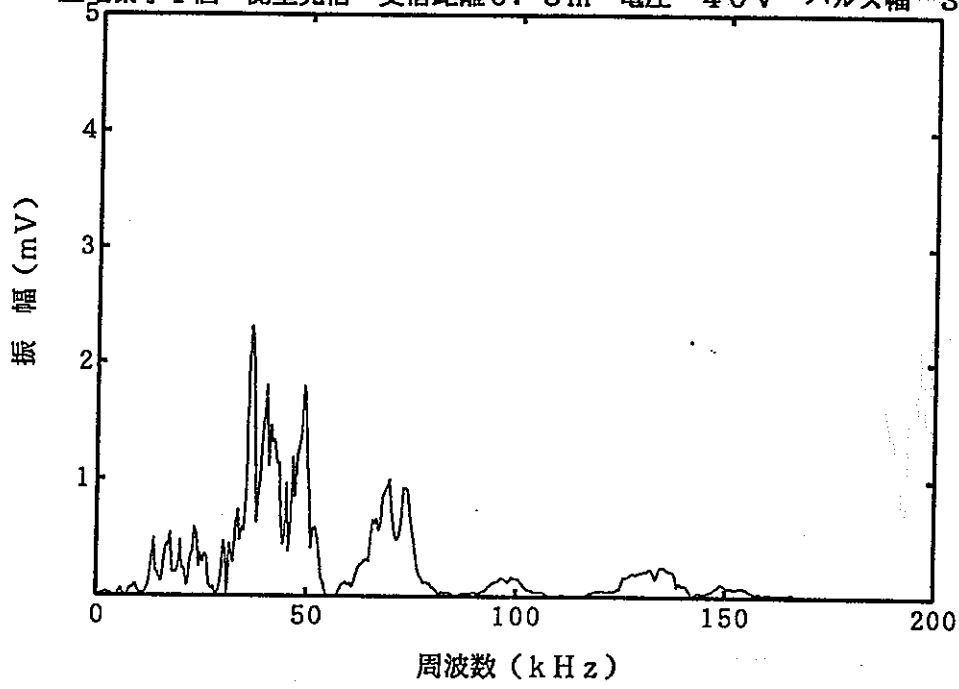
圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 20V パルス幅 35 μ s MAX 36.6kHz



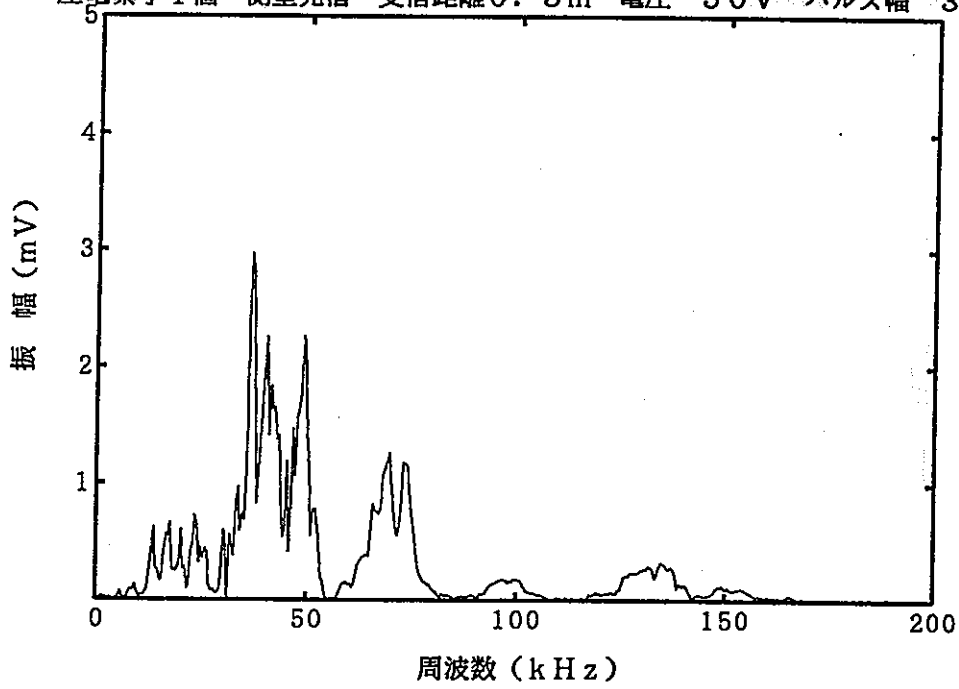
圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 30V パルス幅 35 μ s MAX 36.6kHz

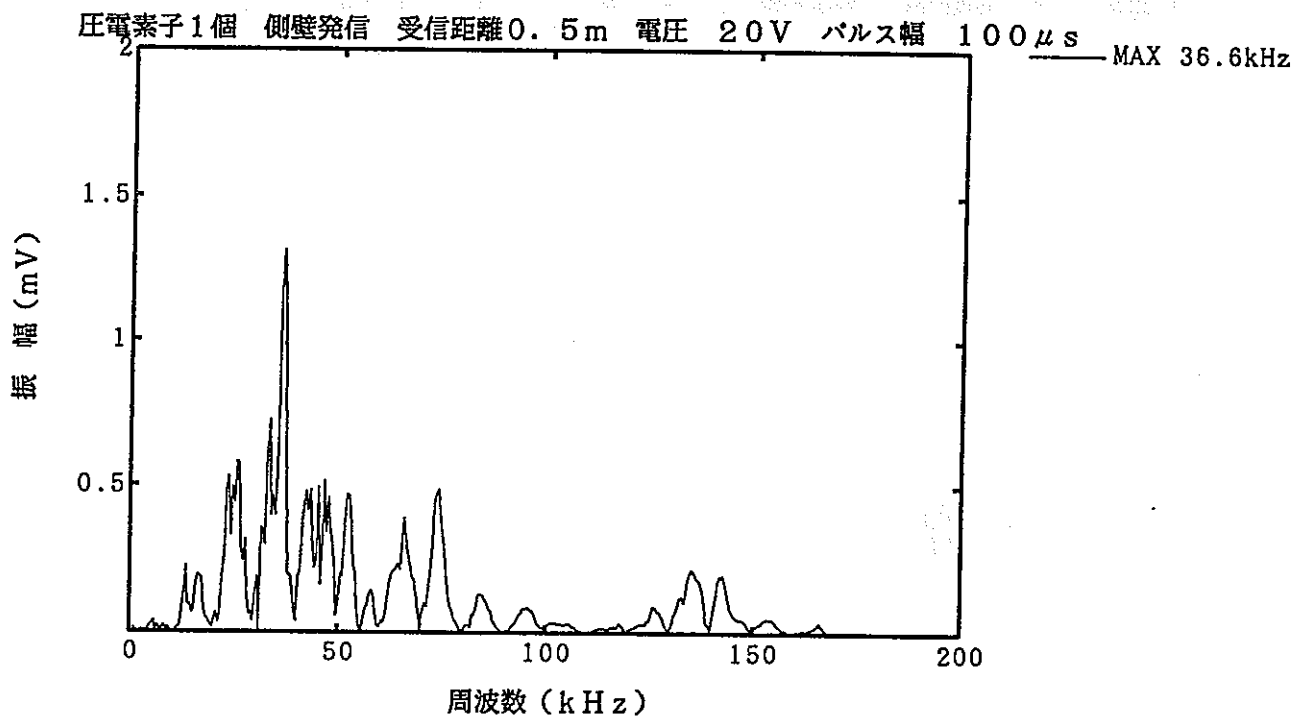
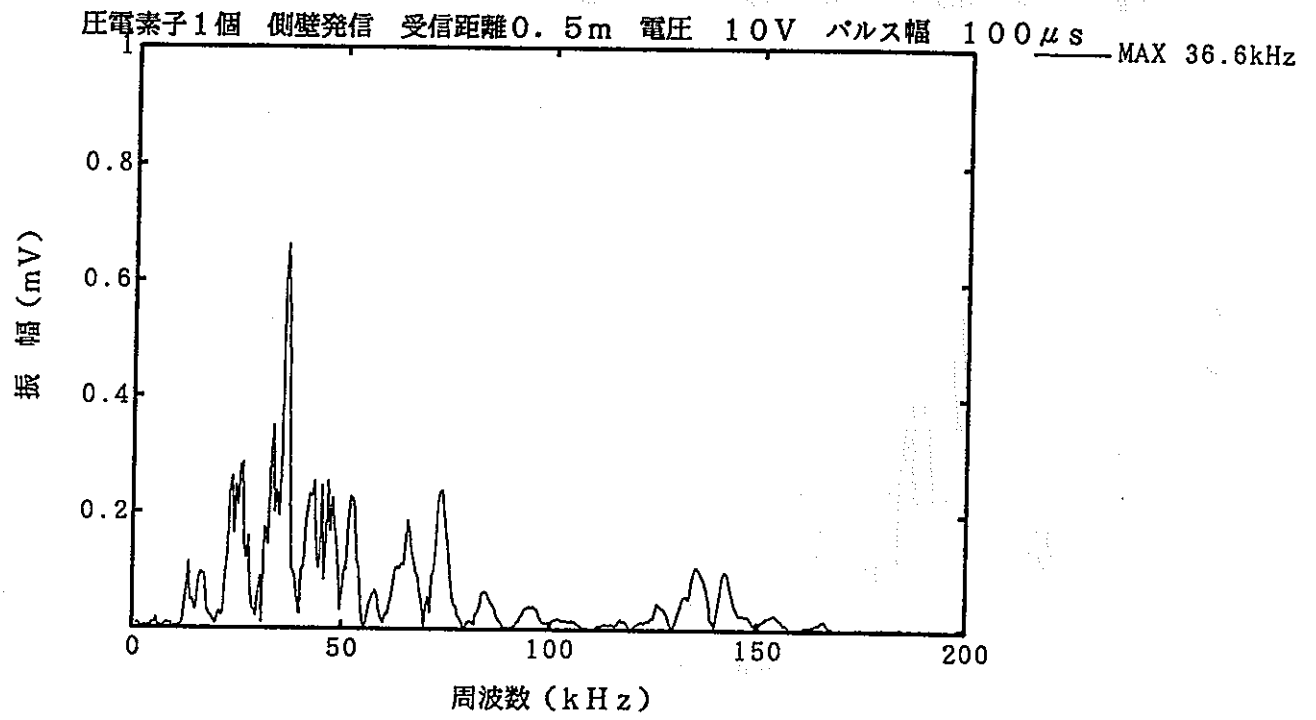


圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 40V パルス幅 35 μ s MAX 36.6kHz

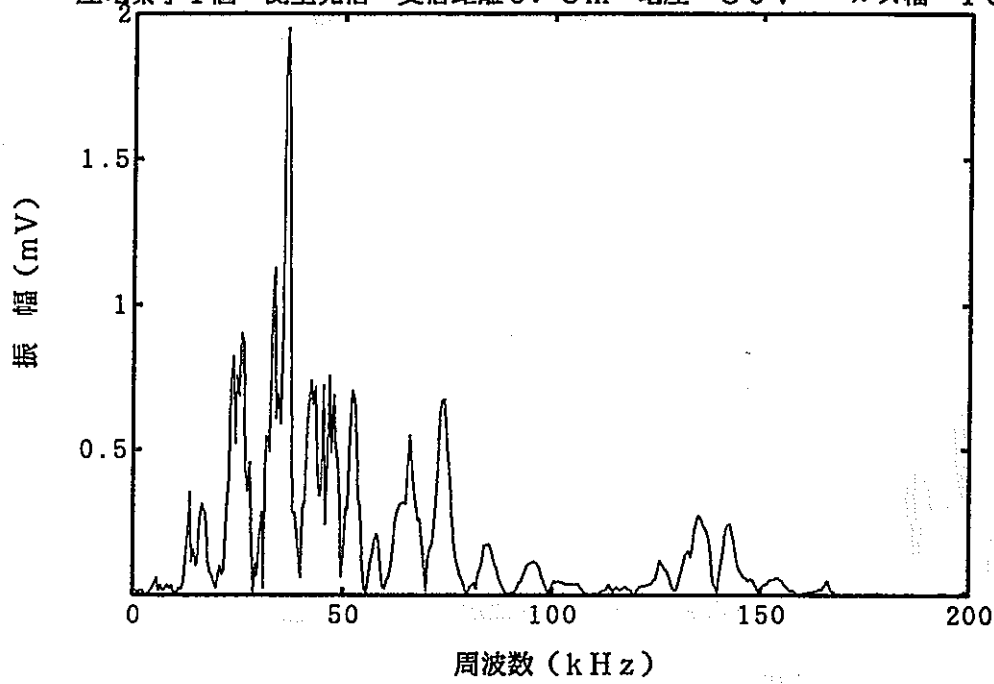


圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 50V パルス幅 35 μ s MAX 36.6kHz

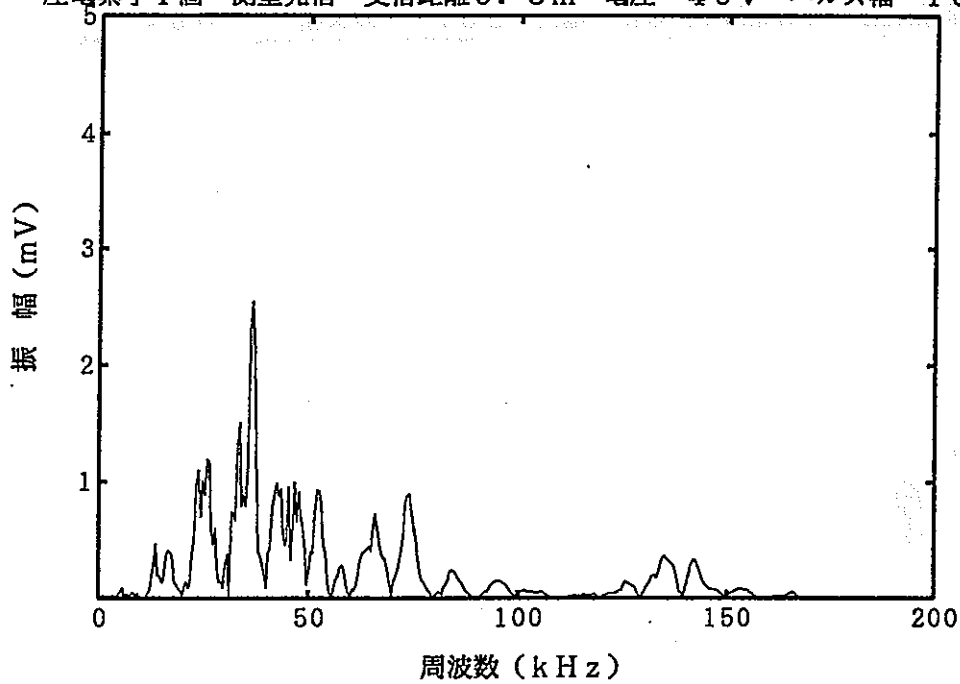




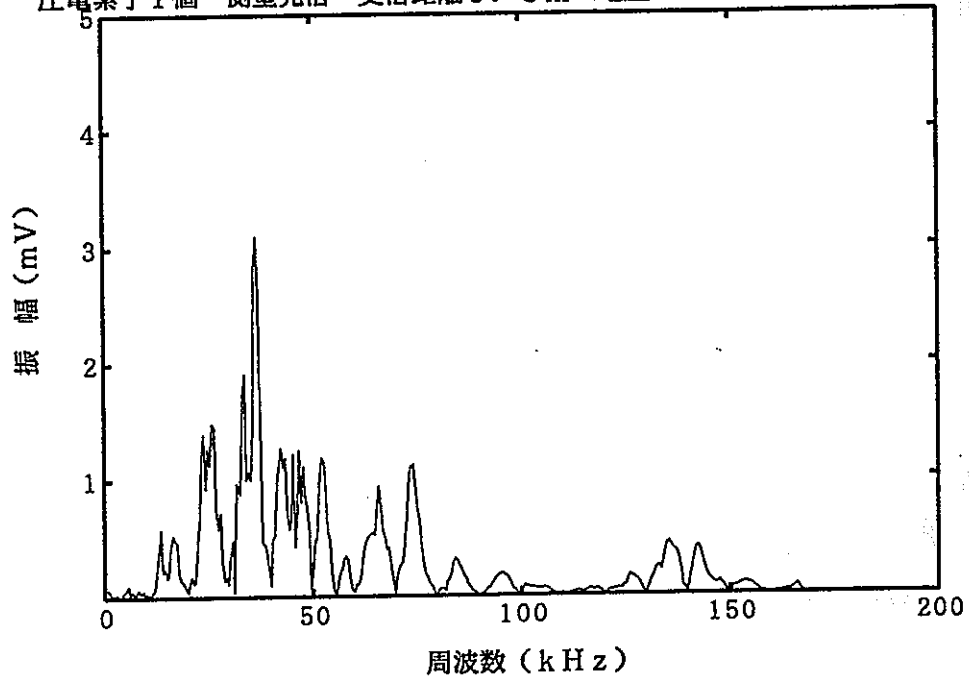
圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 30V パルス幅 100 μ s MAX 36.6kHz



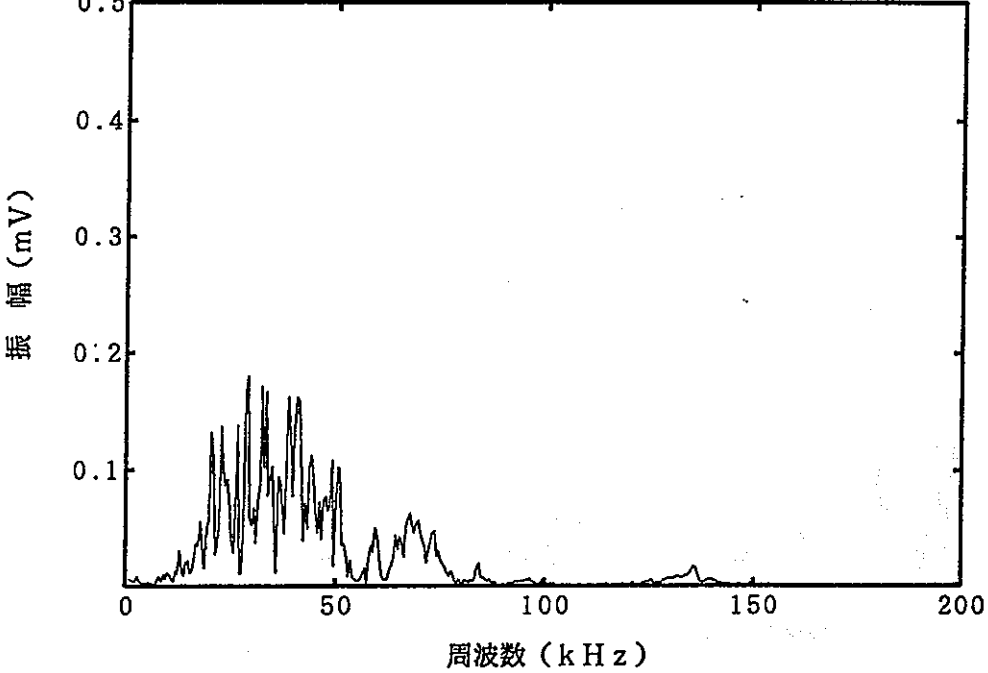
圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 40V パルス幅 100 μ s MAX 36.6kHz

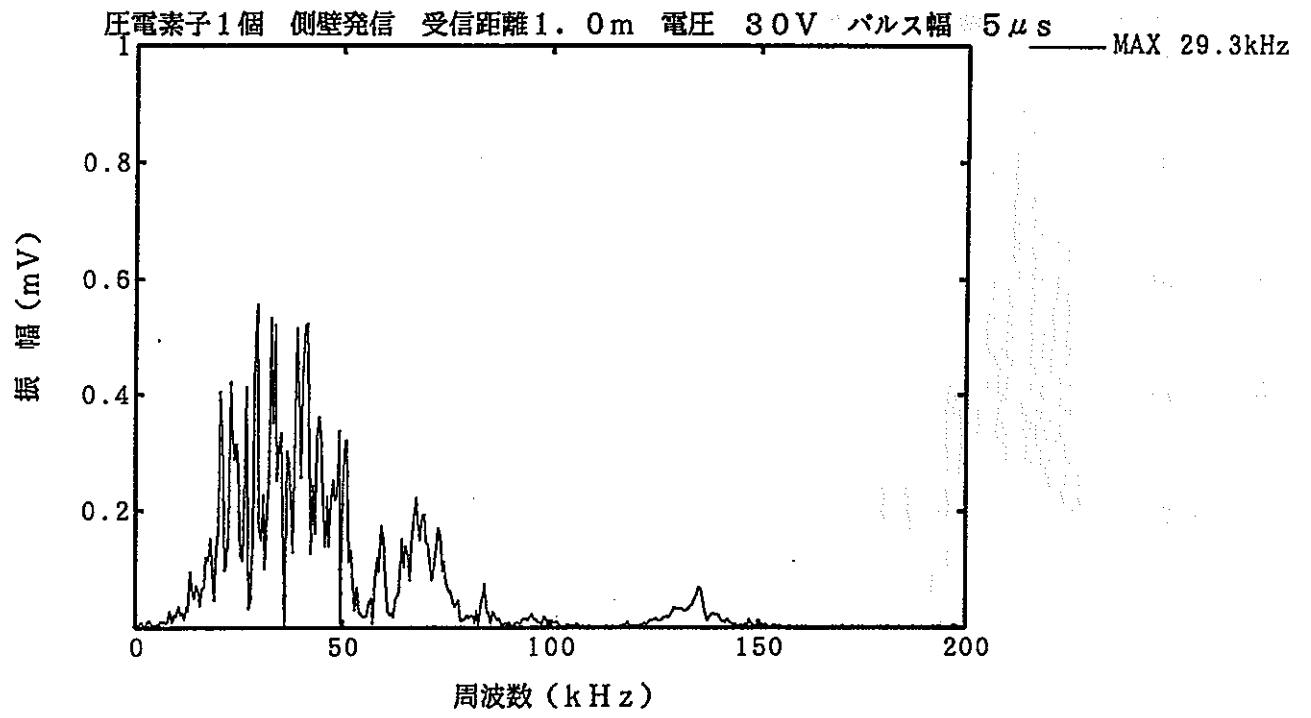
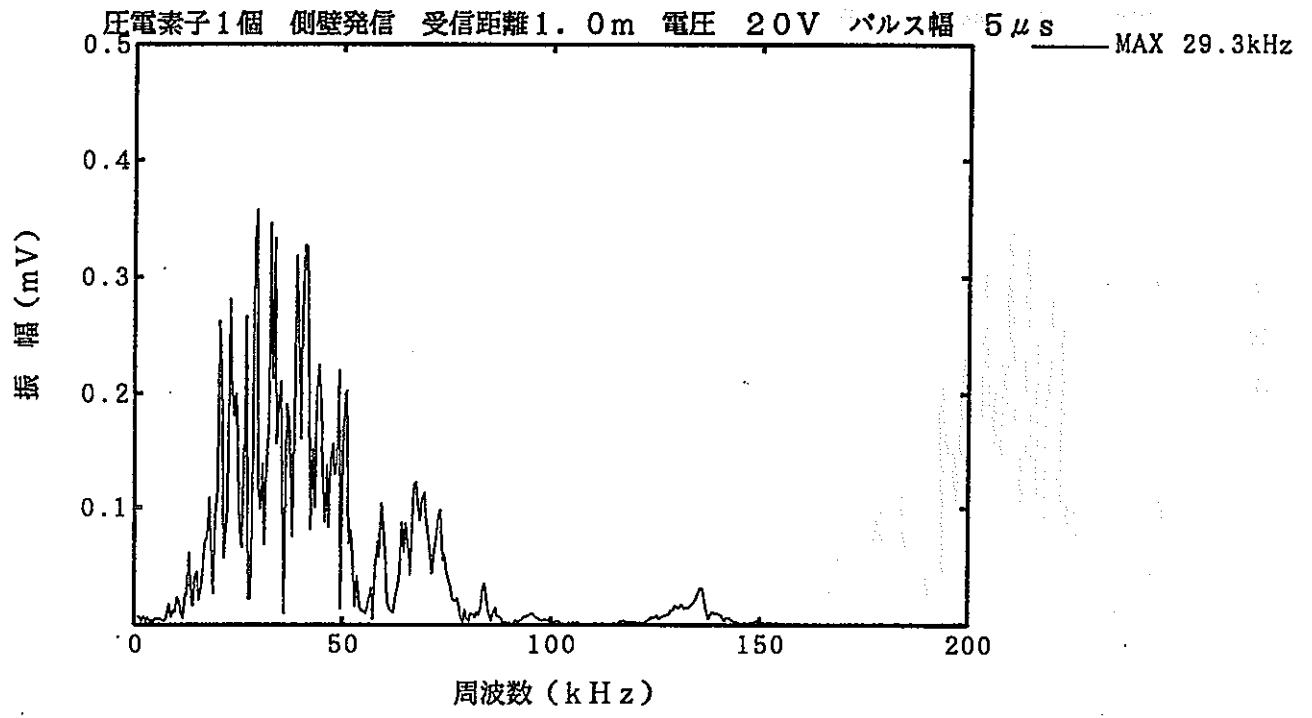


圧電素子1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 50V パルス幅 100 μ s MAX 36.6kHz

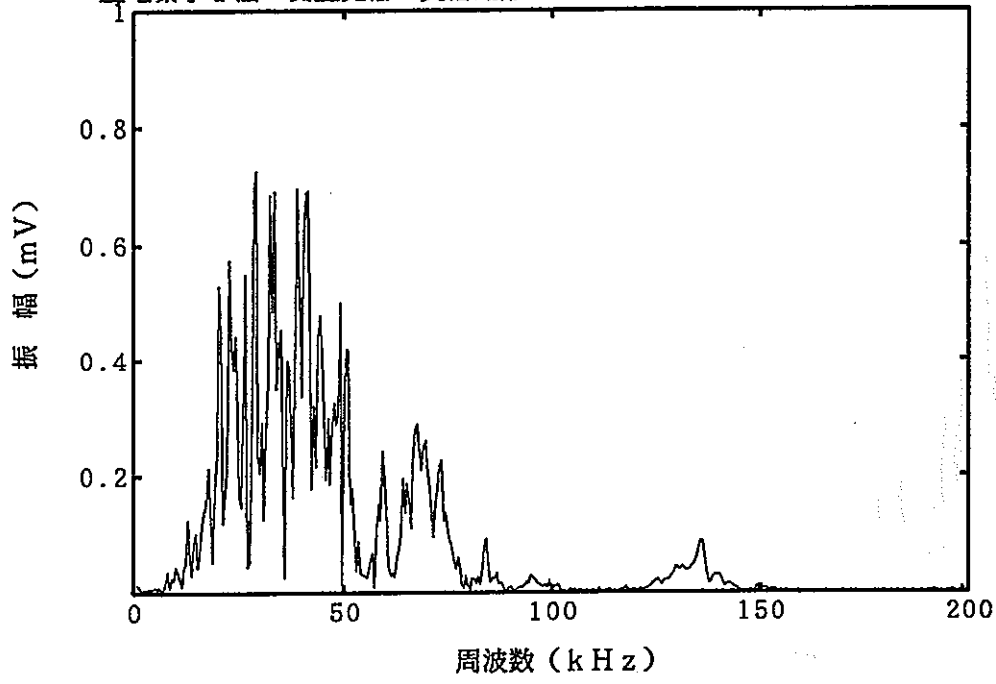


圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 10V パルス幅 5 μ s MAX 29.3kHz

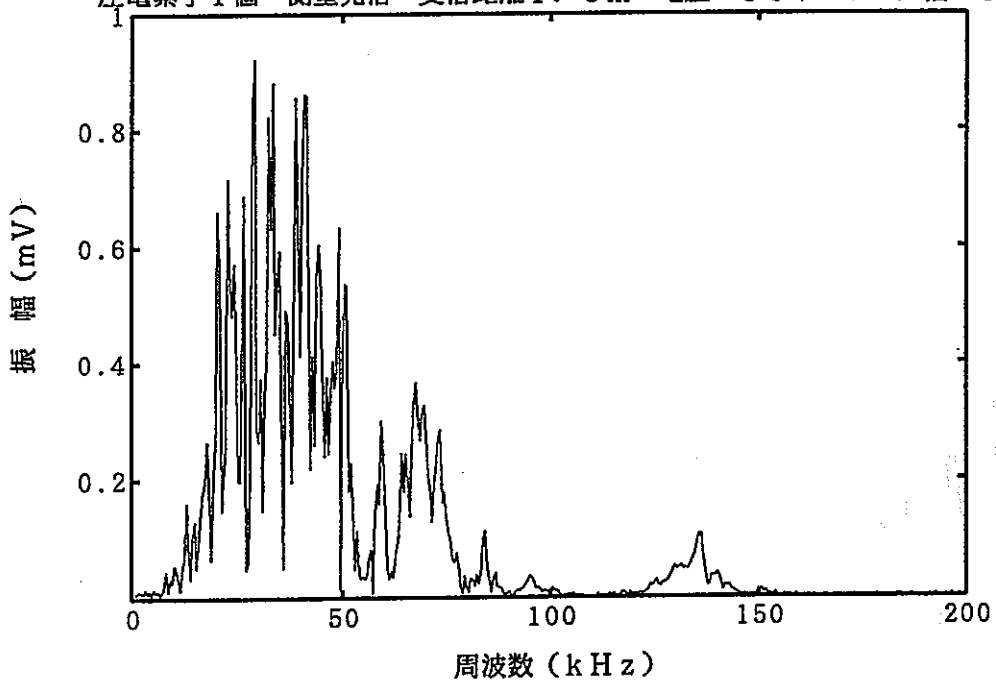


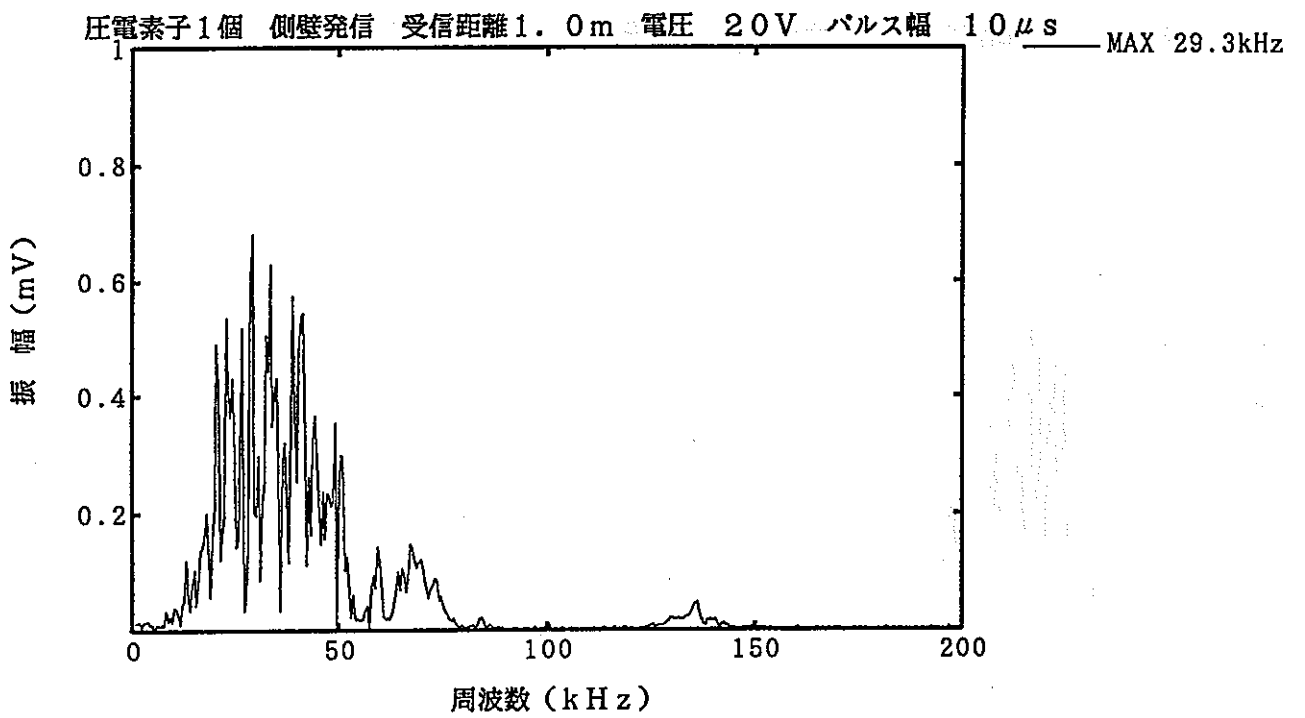
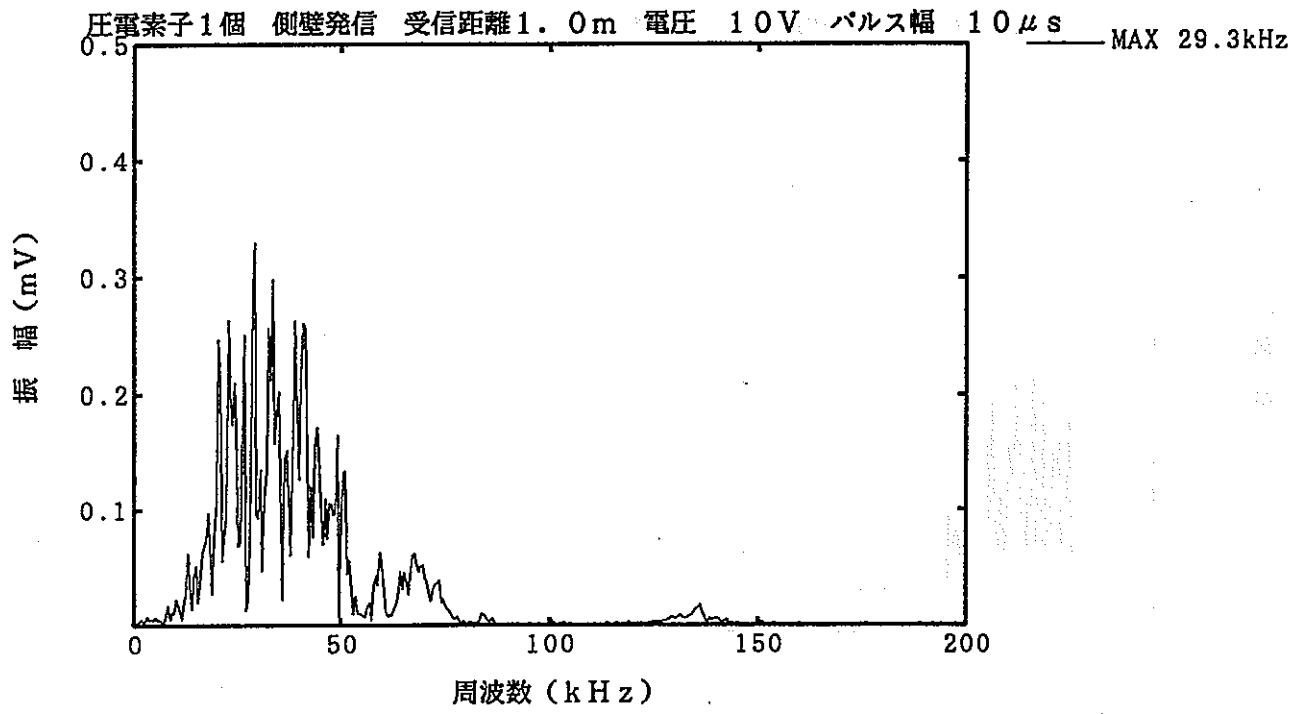


圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 40V パルス幅 5 μ s MAX 29.3kHz

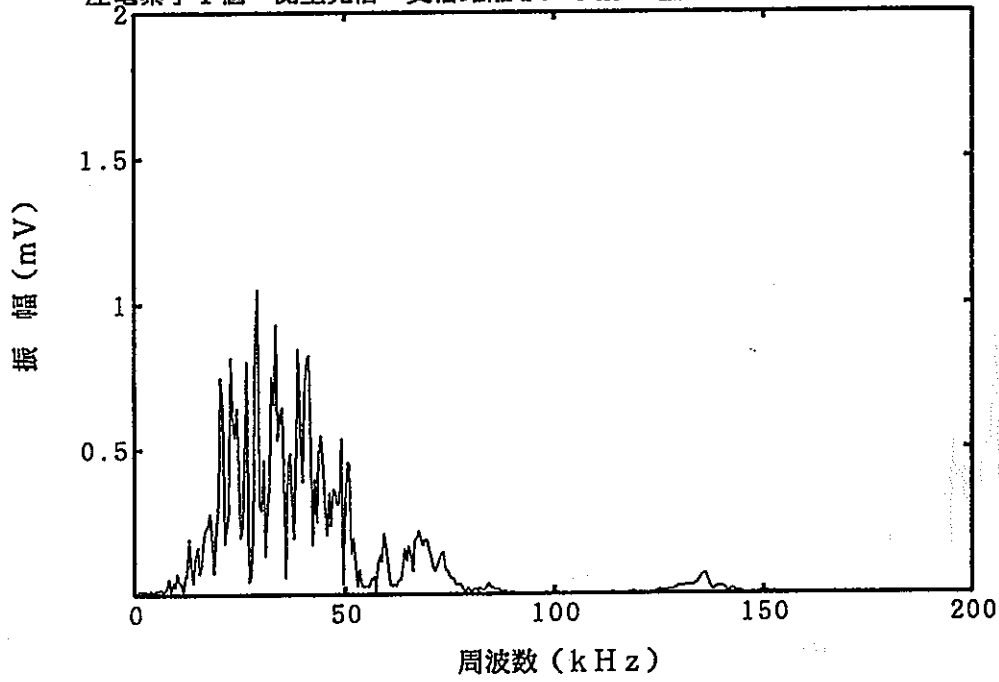


圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 50V パルス幅 5 μ s MAX 29.3kHz

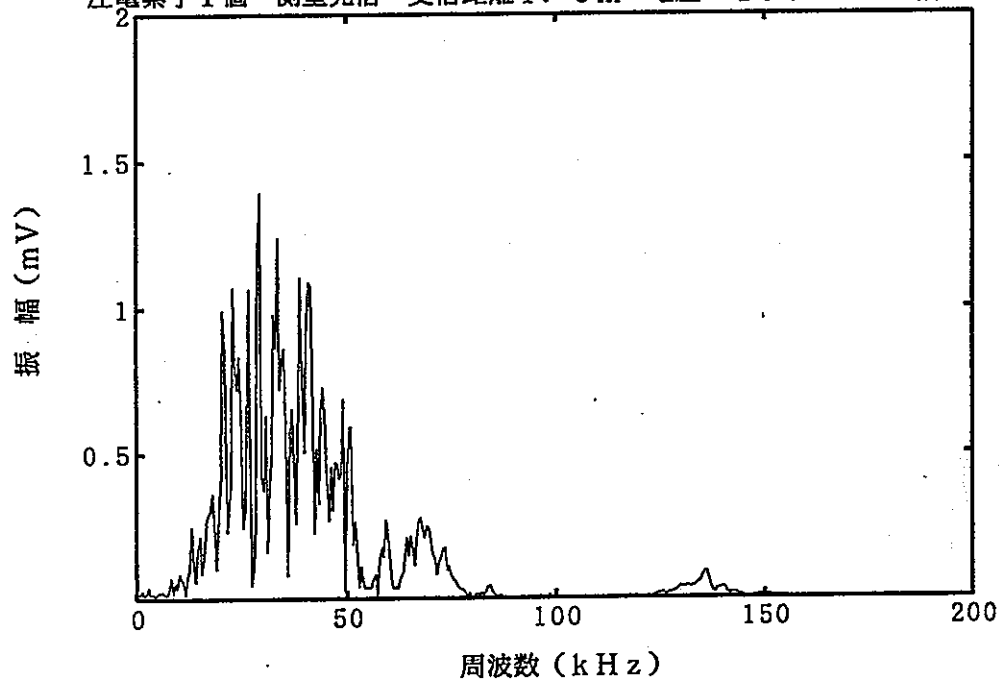




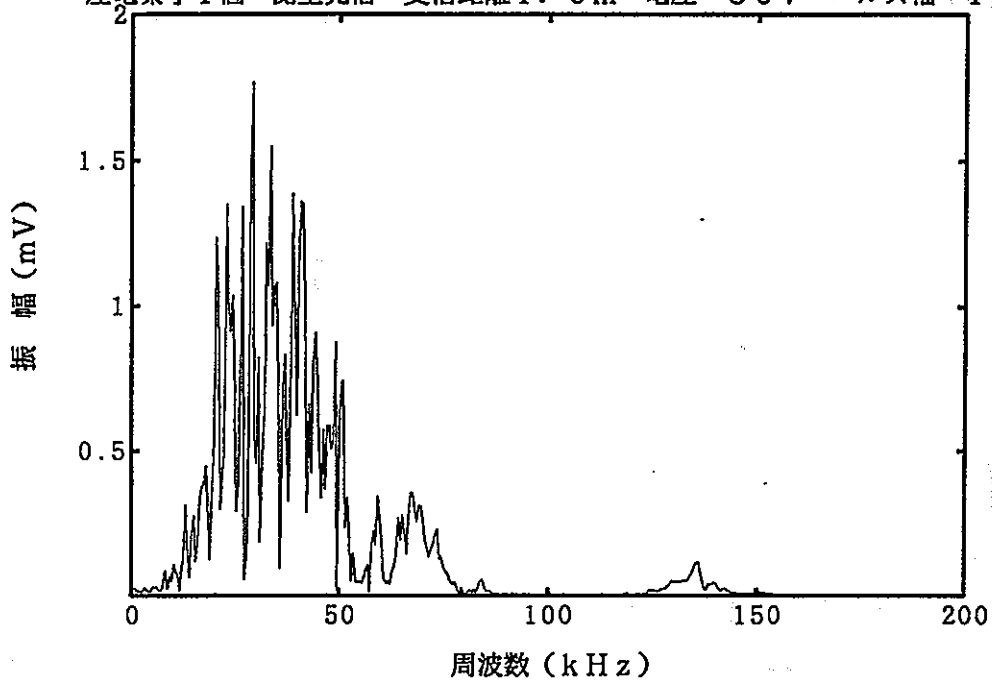
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 30V パルス幅 10 μ s MAX 29.3kHz



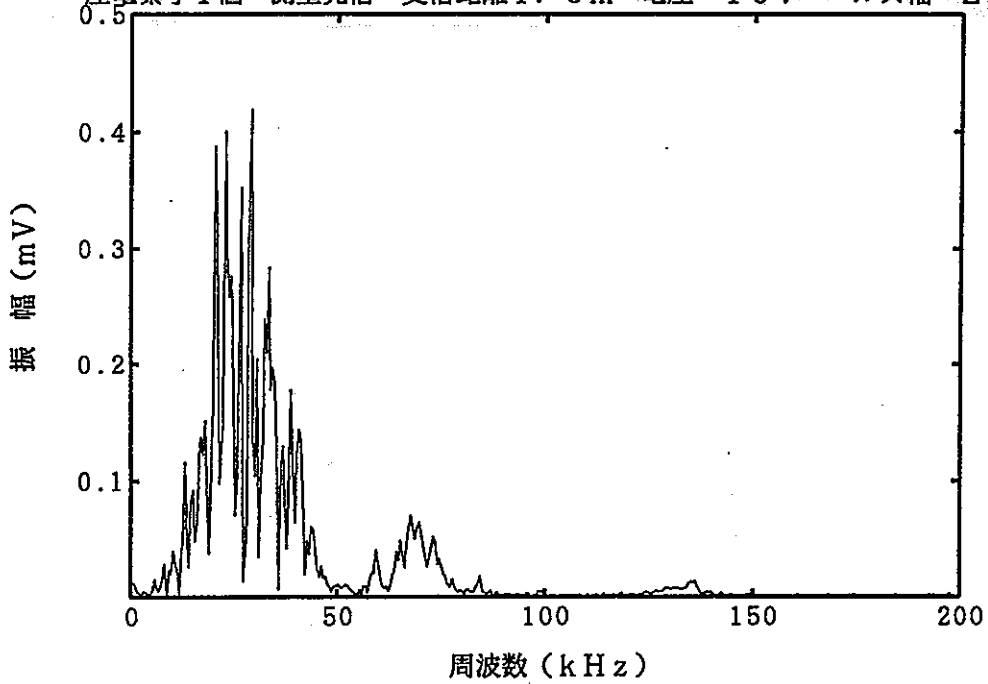
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 40V パルス幅 10 μ s MAX 29.3kHz



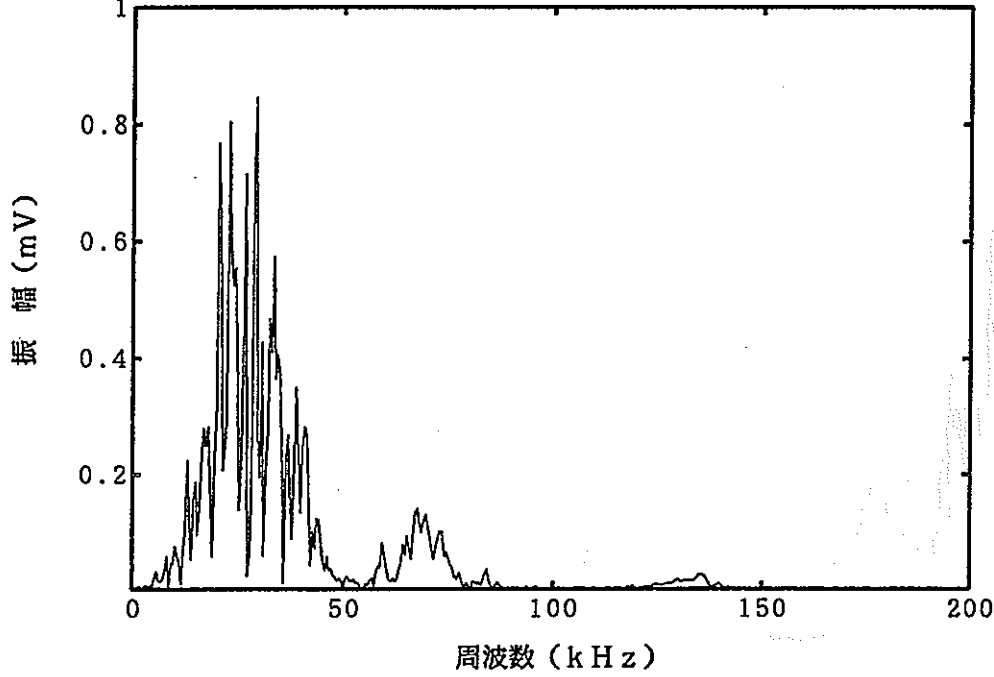
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 50V パルス幅 10 μ s MAX 29.3kHz



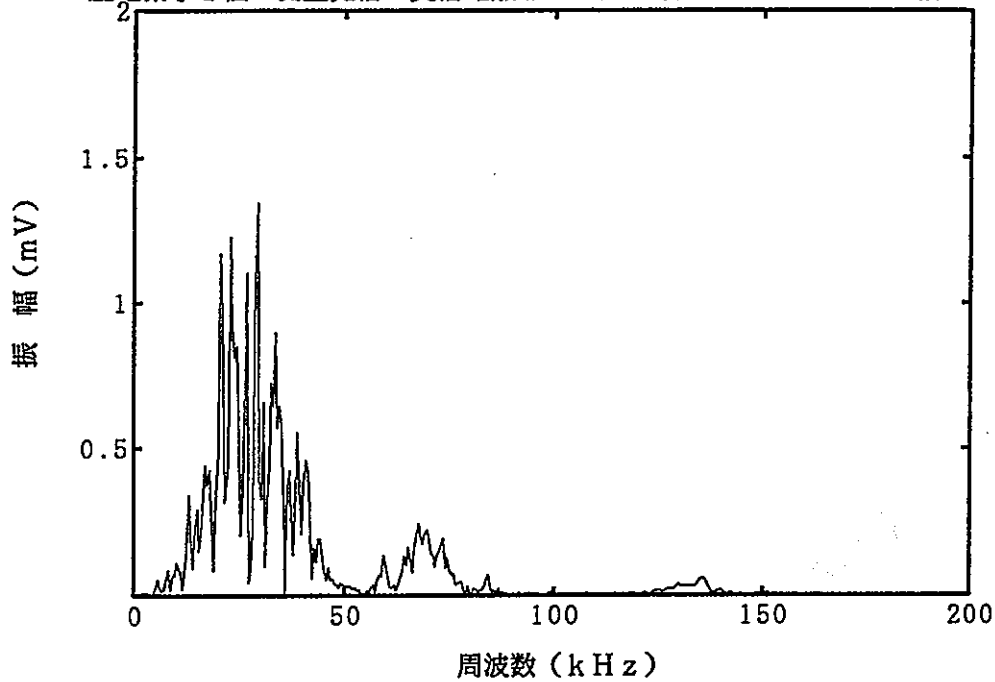
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 10V パルス幅 20 μ s MAX 29.3kHz



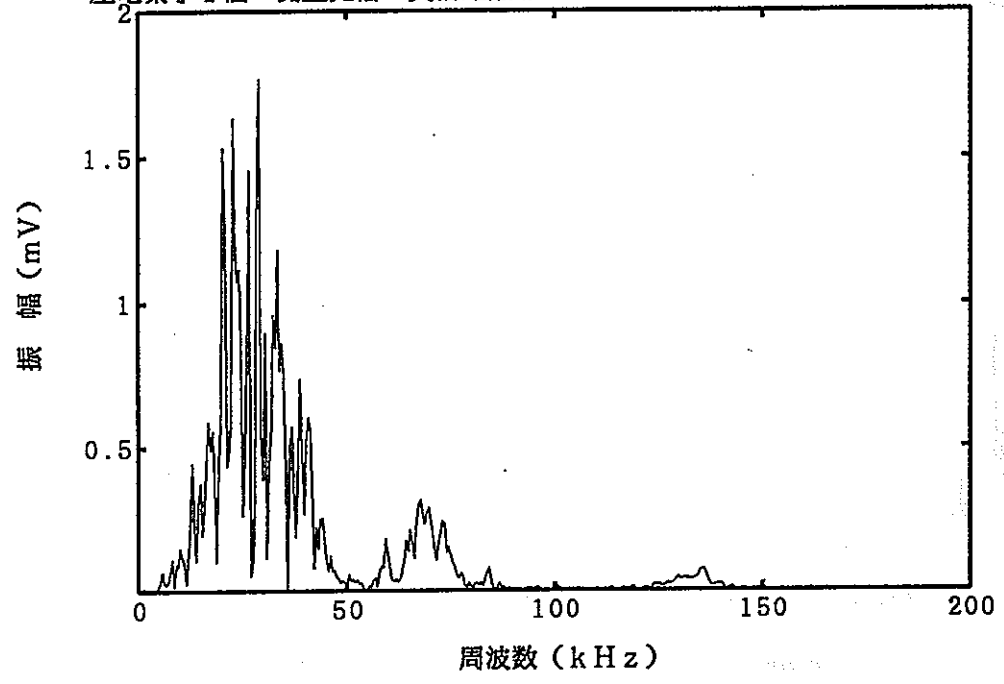
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 20V パルス幅 20 μ s MAX 29.3kHz



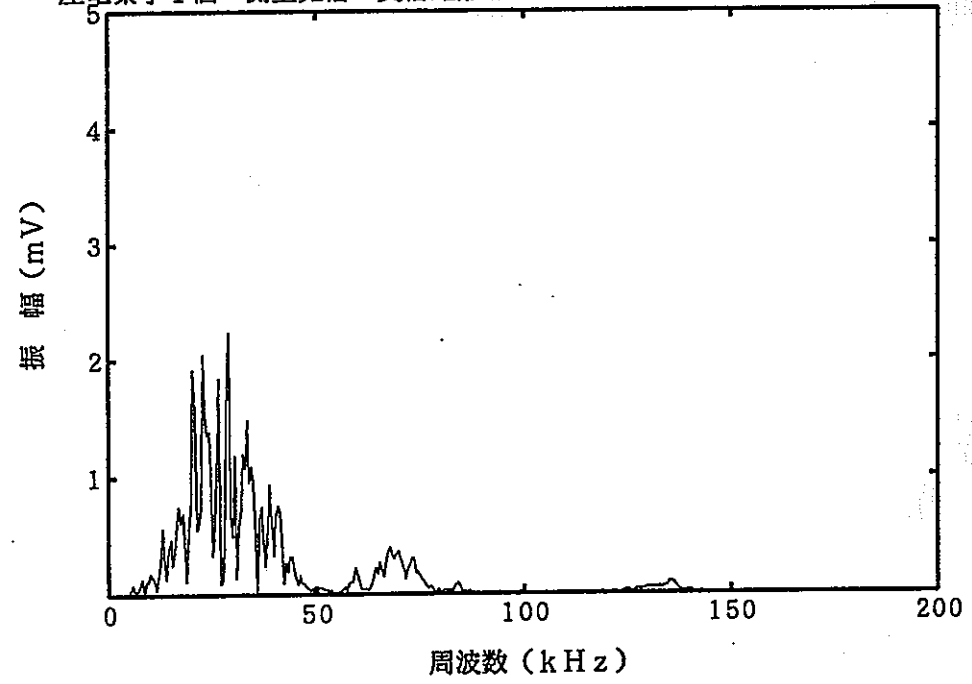
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 30V パルス幅 20 μ s MAX 29.3kHz



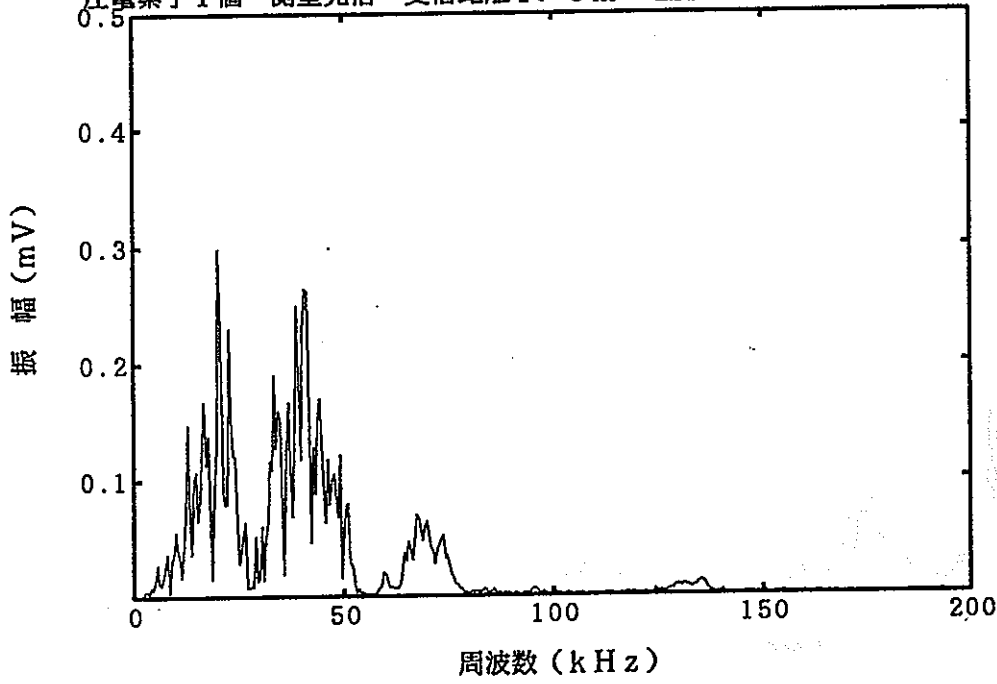
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 40V パルス幅 20 μ s MAX 29.3kHz



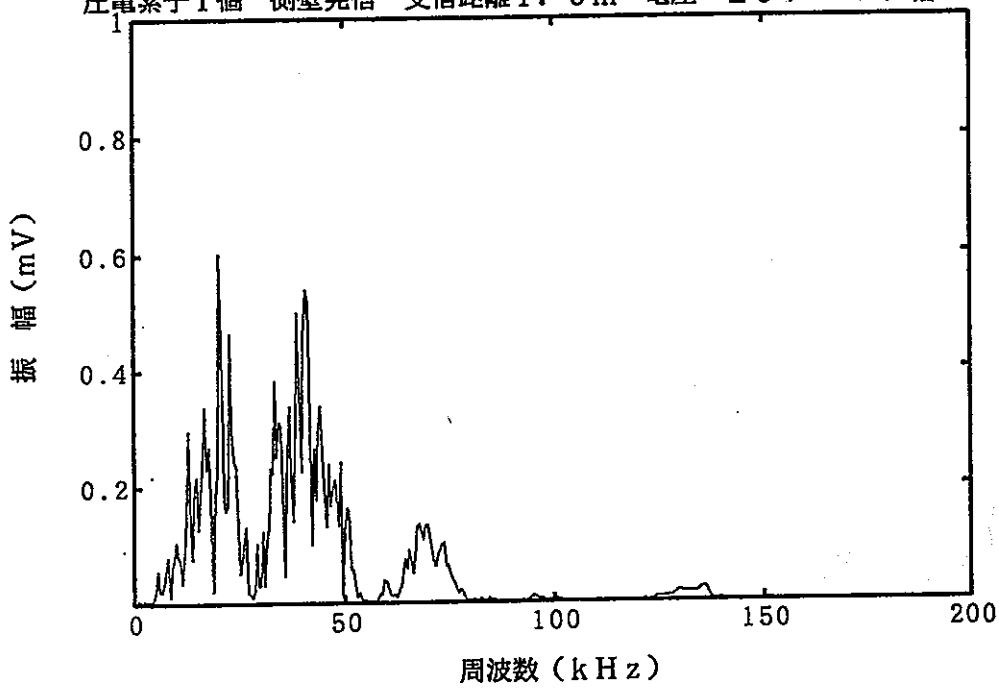
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 50V パルス幅 20 μ s MAX 29.3kHz

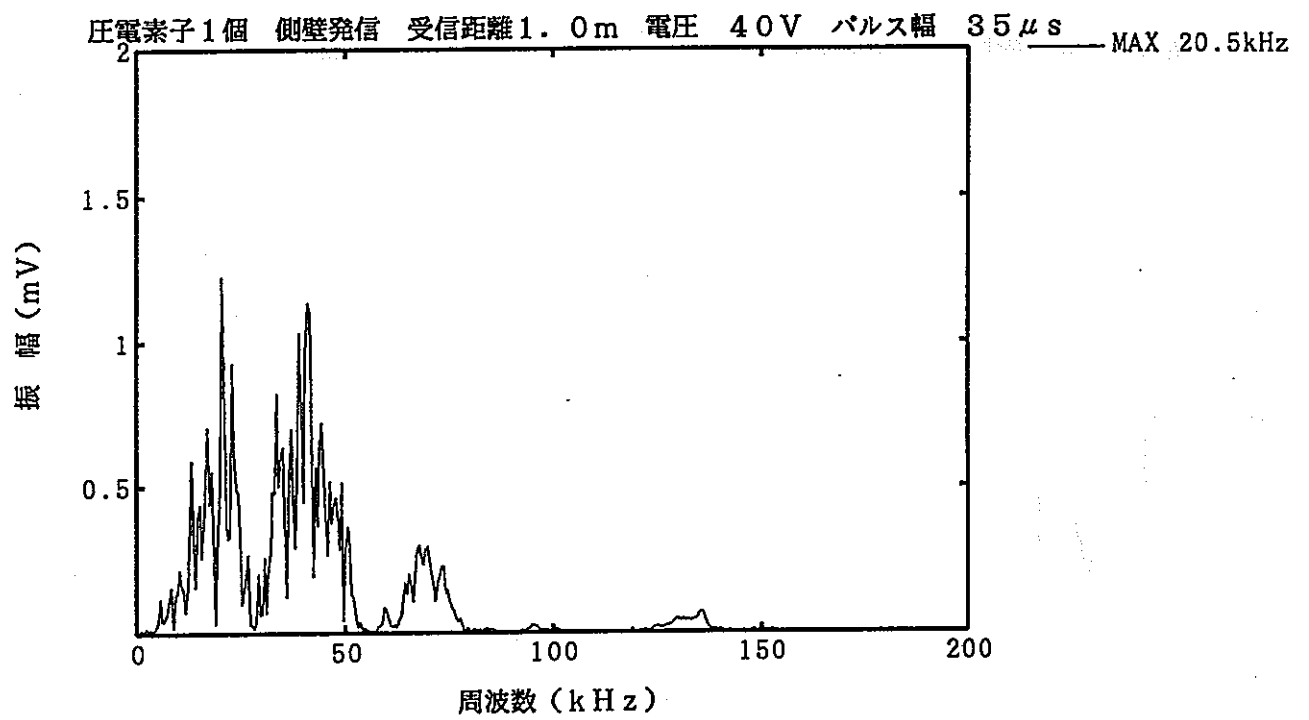
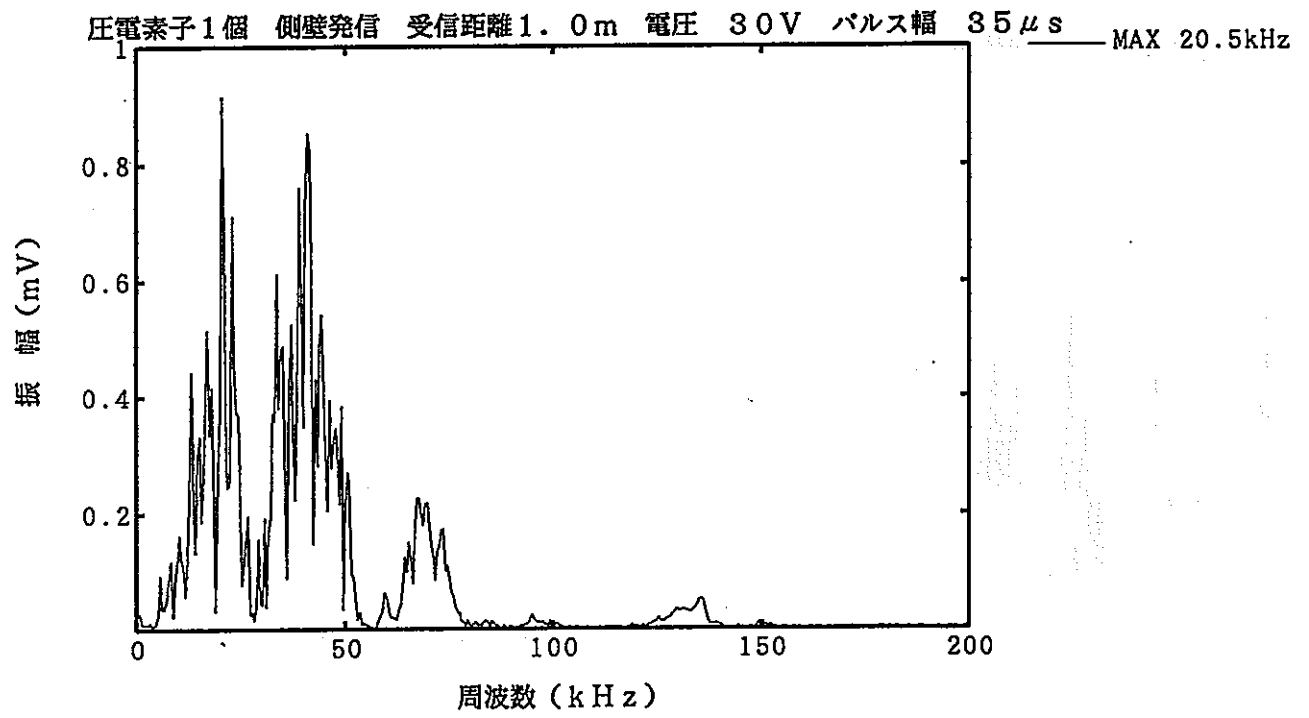


圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 10V パルス幅 35 μ s MAX 20.5kHz

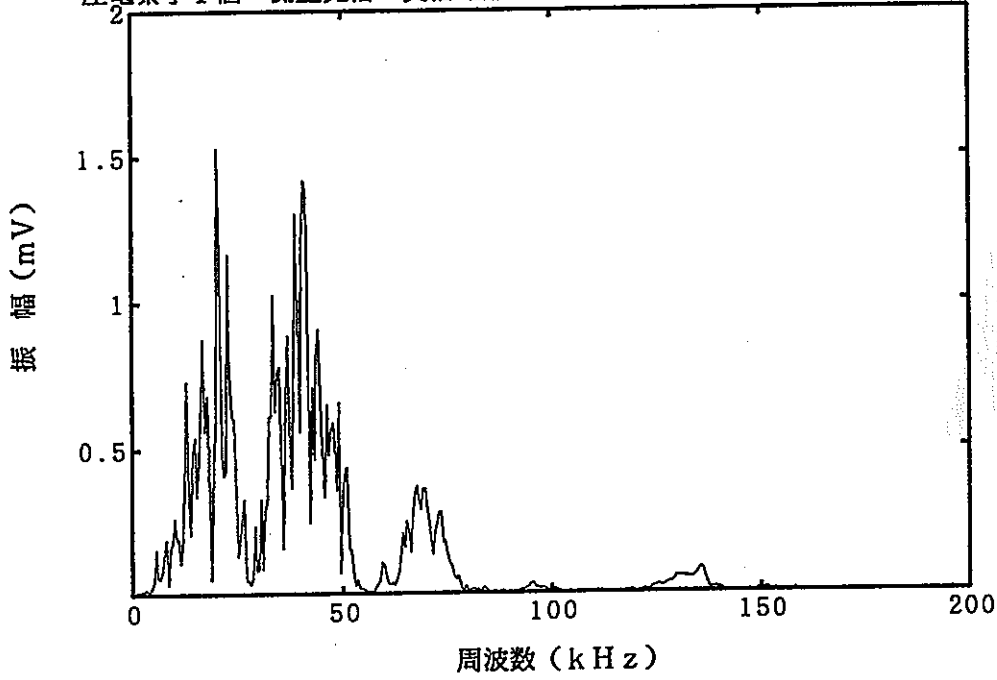


圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 20V パルス幅 35 μ s MAX 20.5kHz

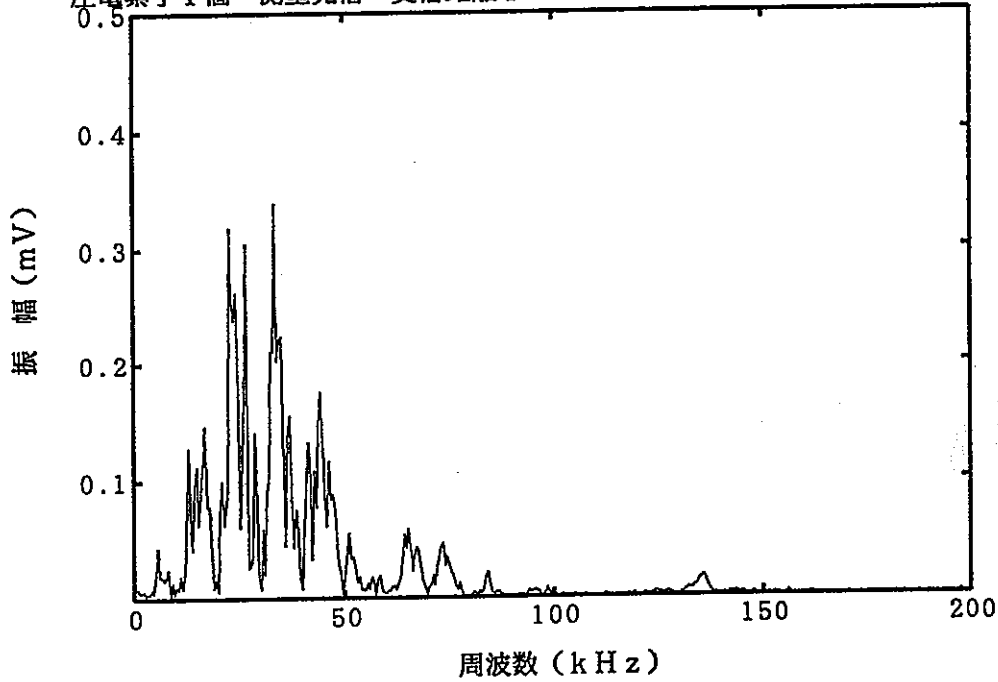




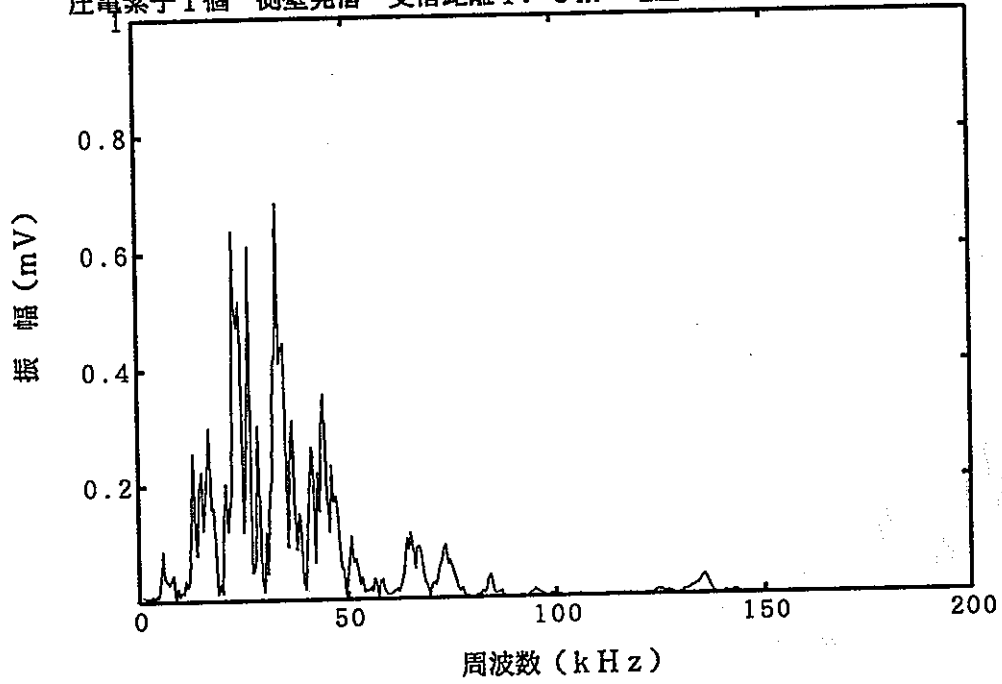
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 50V パルス幅 35 μ s MAX 20.5kHz



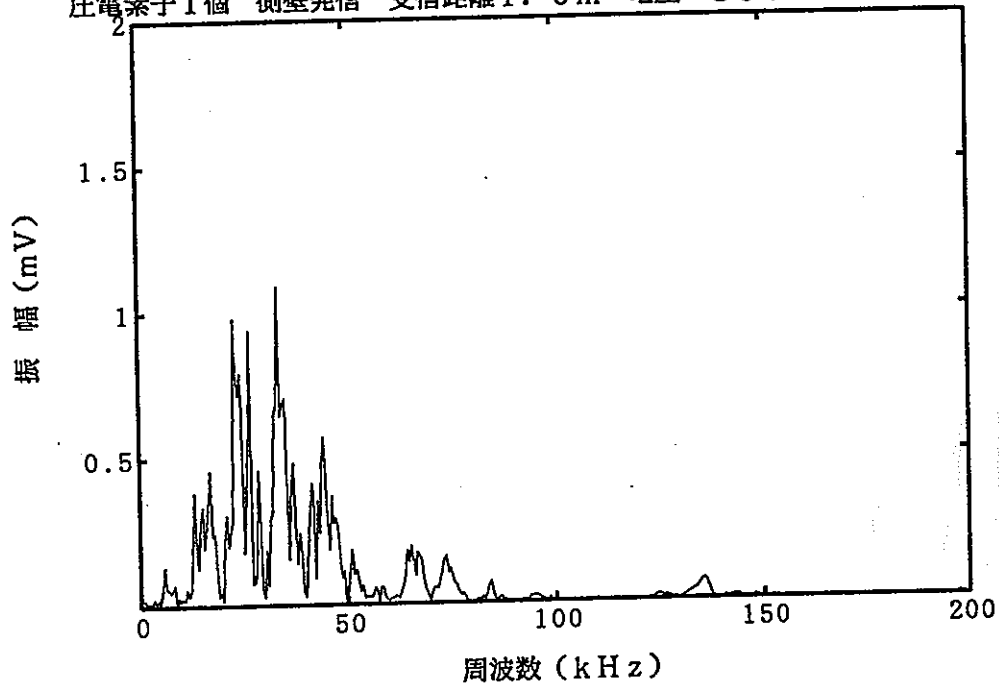
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 10V パルス幅 100 μ s MAX 33.7kHz



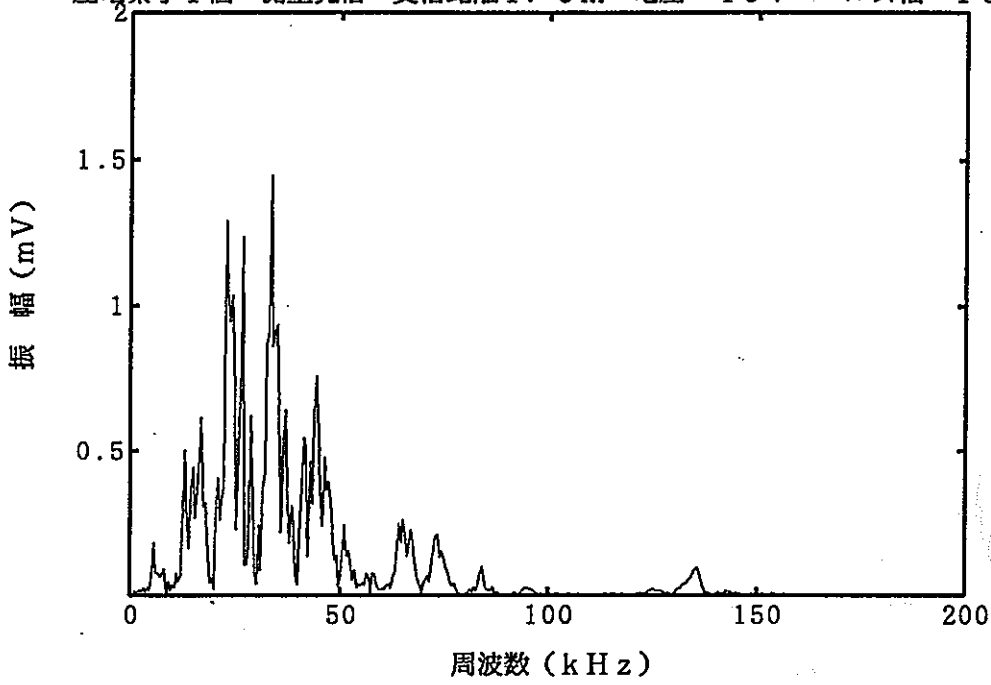
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 20V パルス幅 100 μ s MAX 33.7kHz



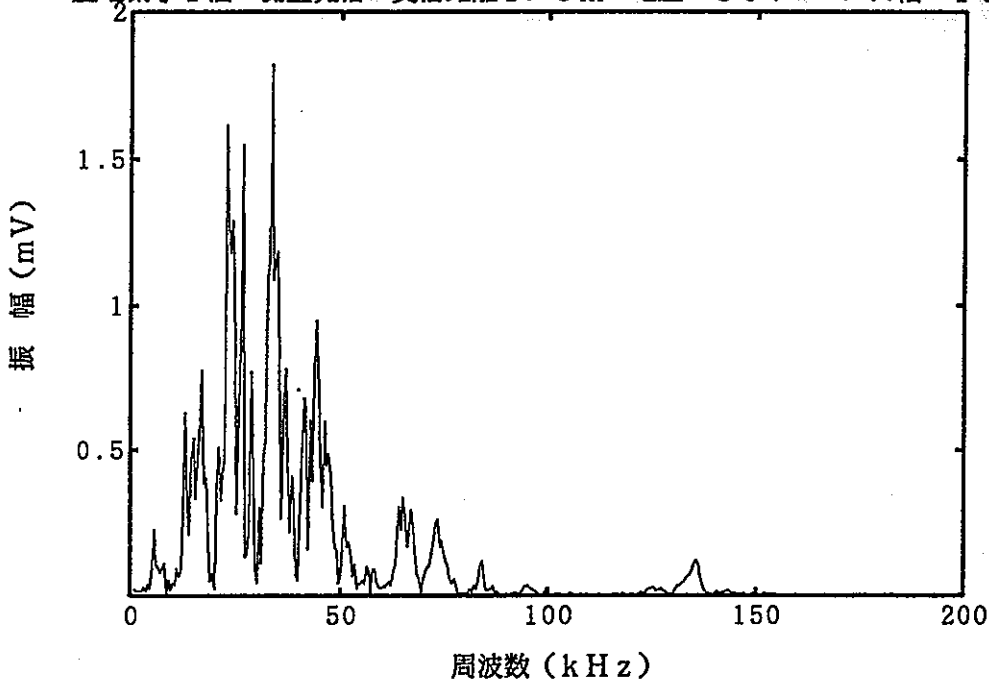
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 30V パルス幅 100 μ s MAX 33.7kHz

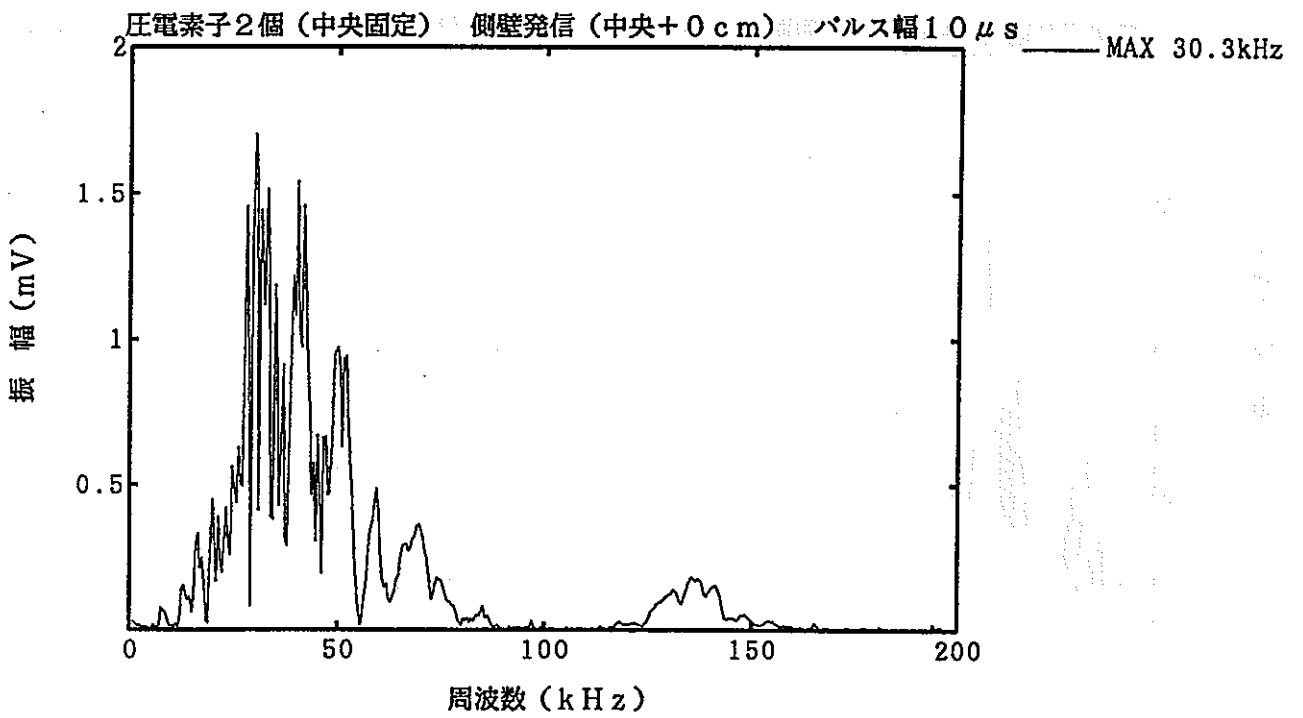
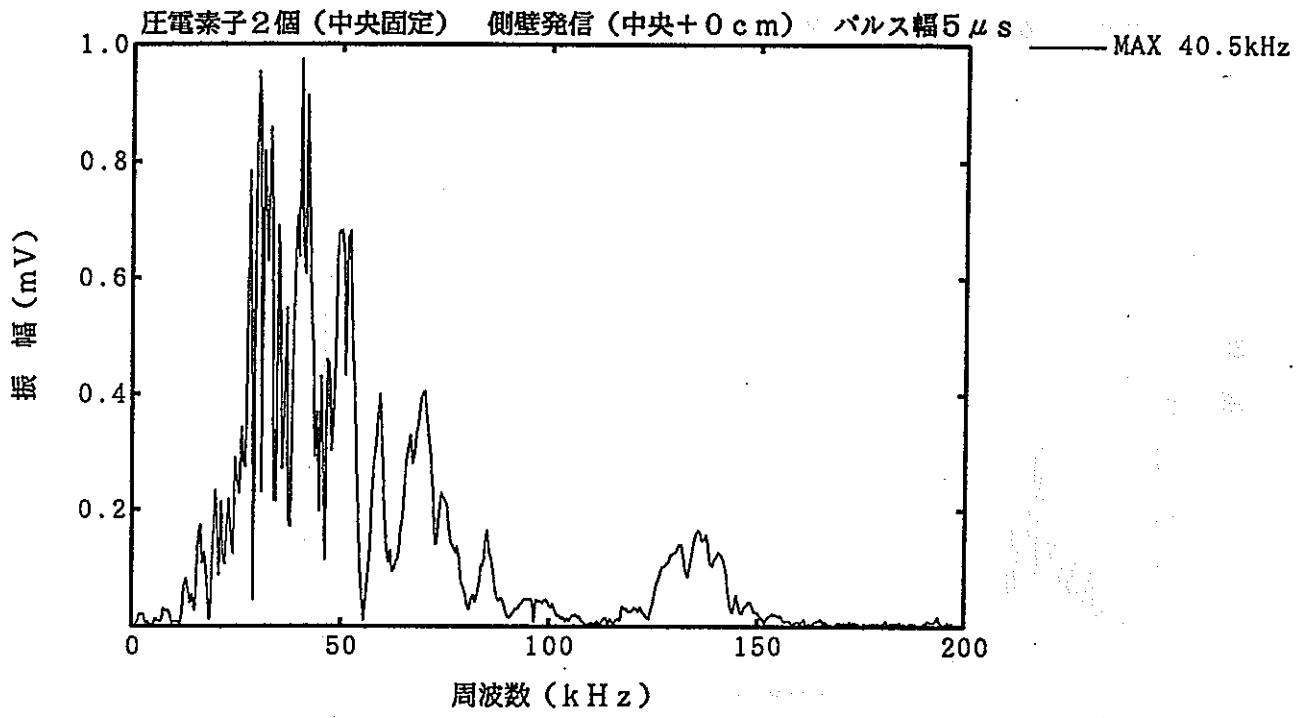


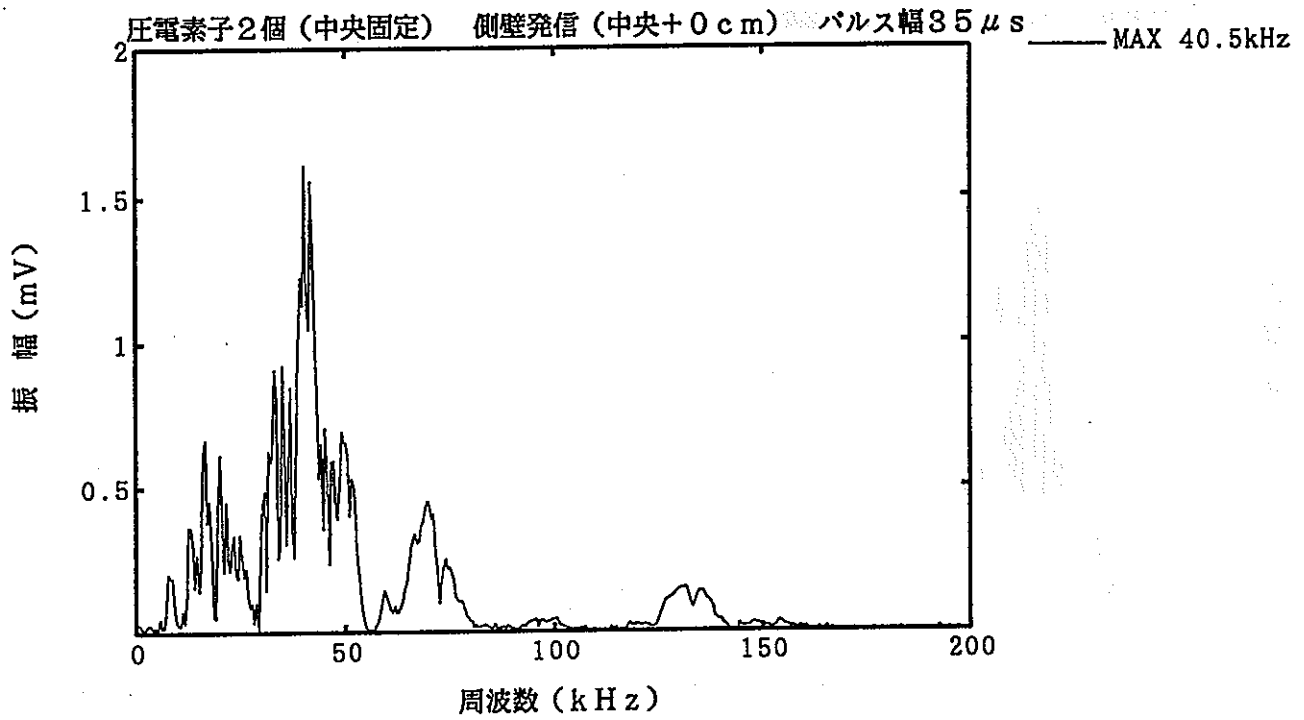
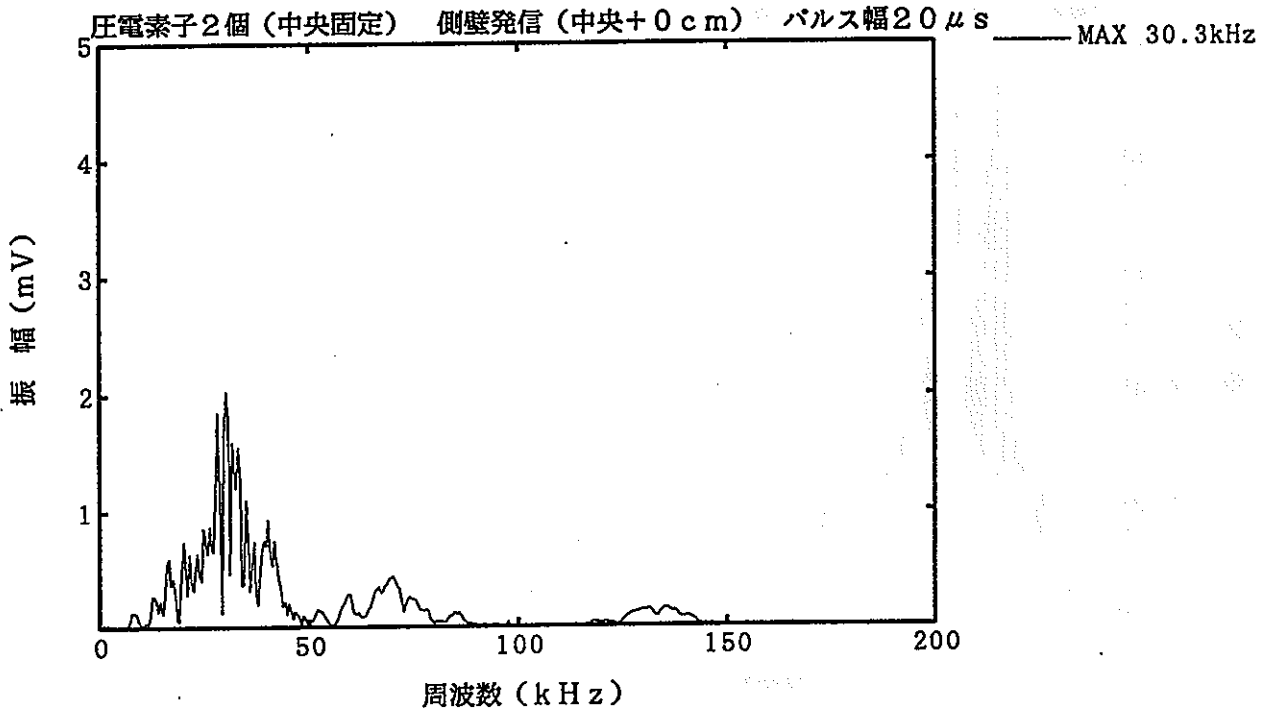
圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 40V パルス幅 100 μ s MAX 33.7kHz

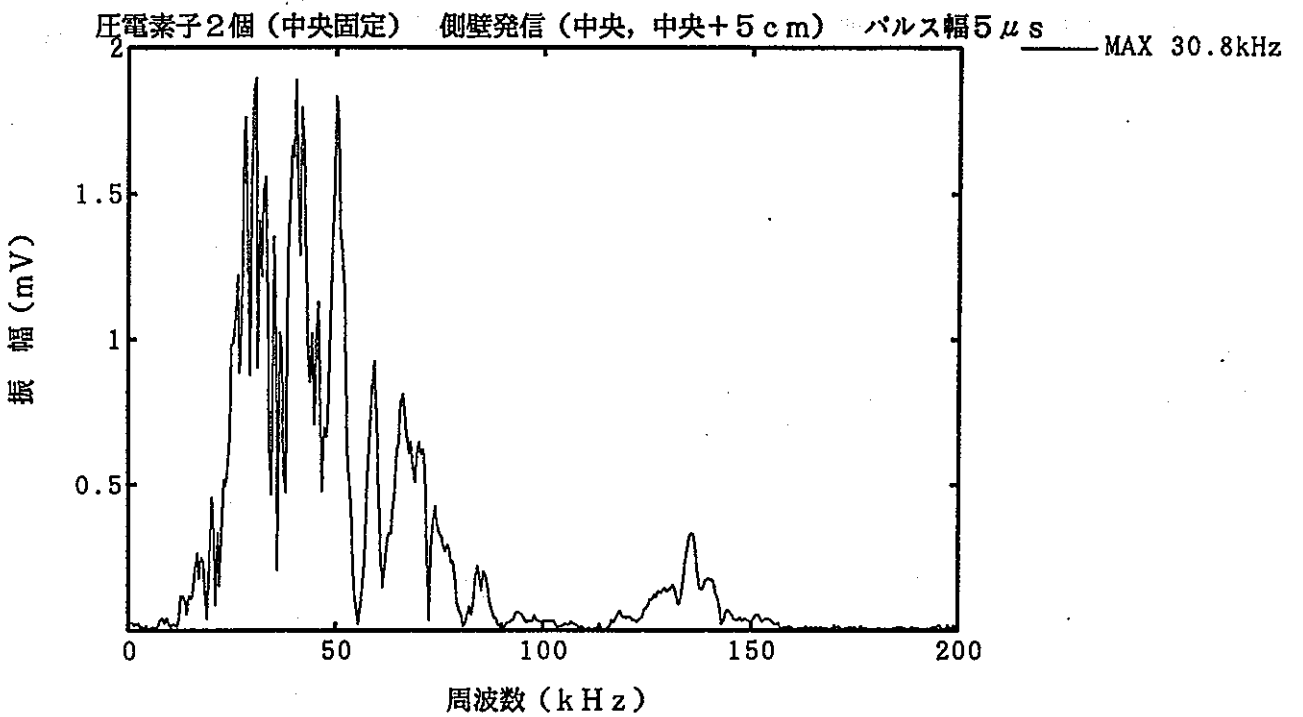
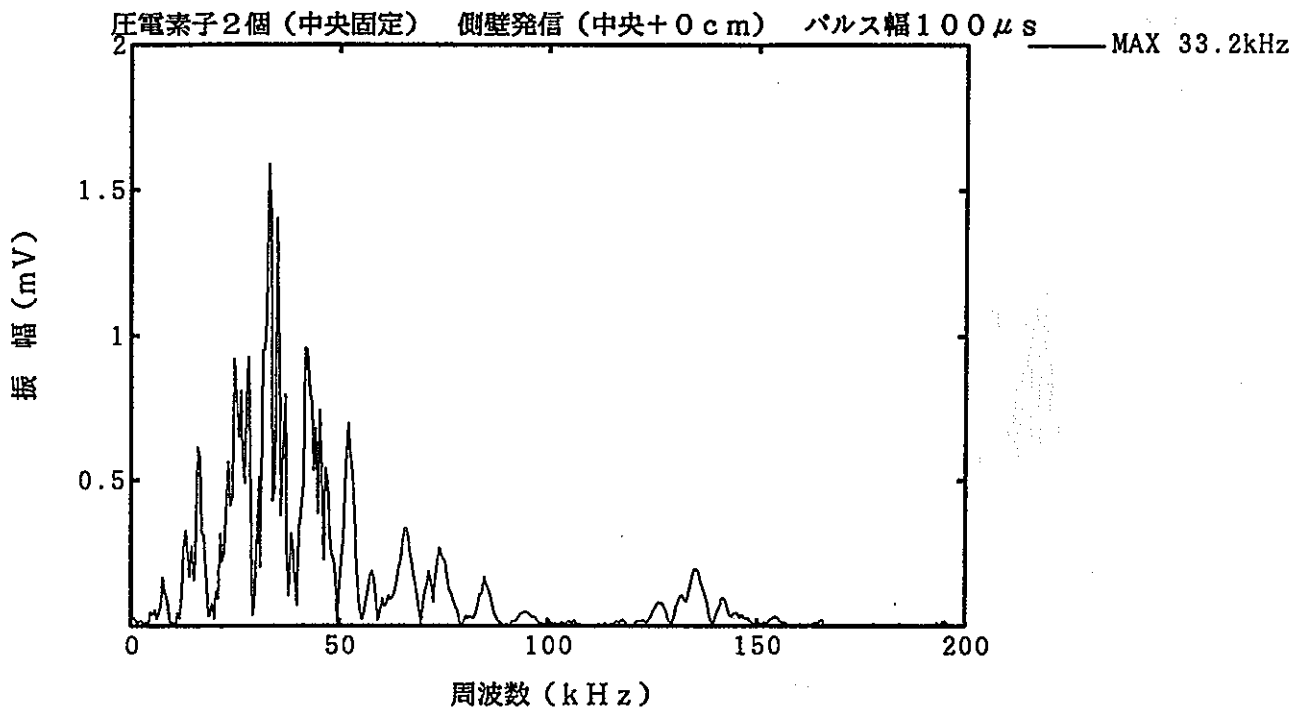


圧電素子1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 50V パルス幅 100 μ s MAX 33.7kHz

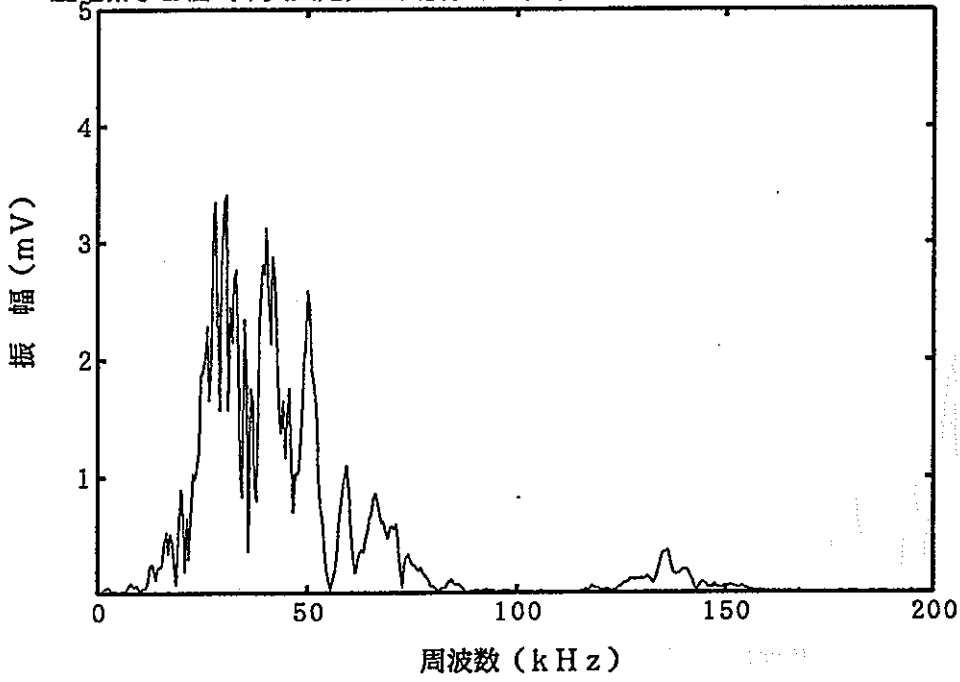




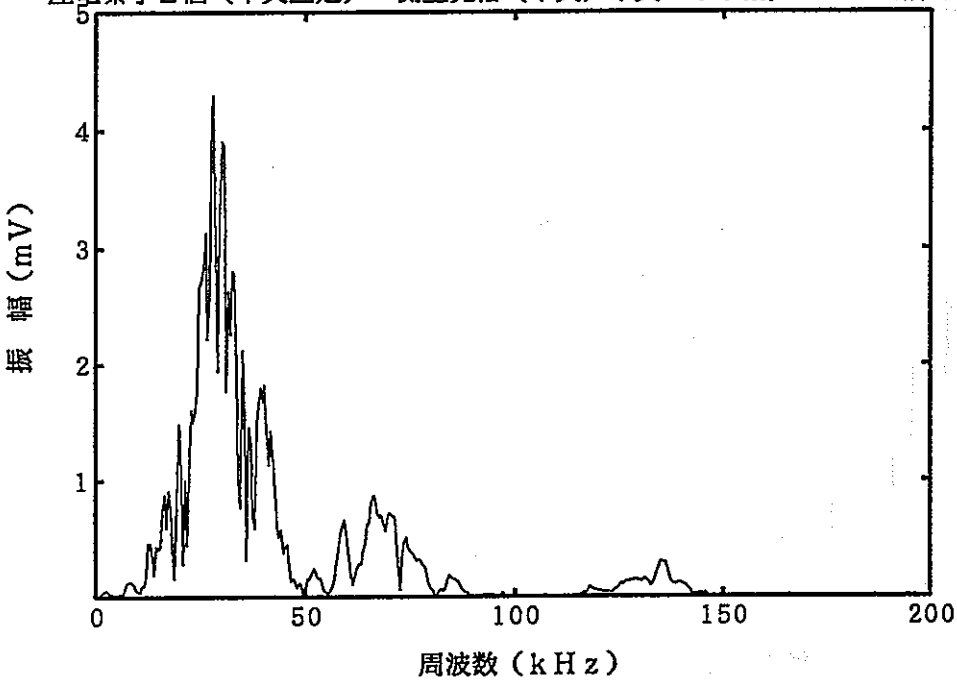


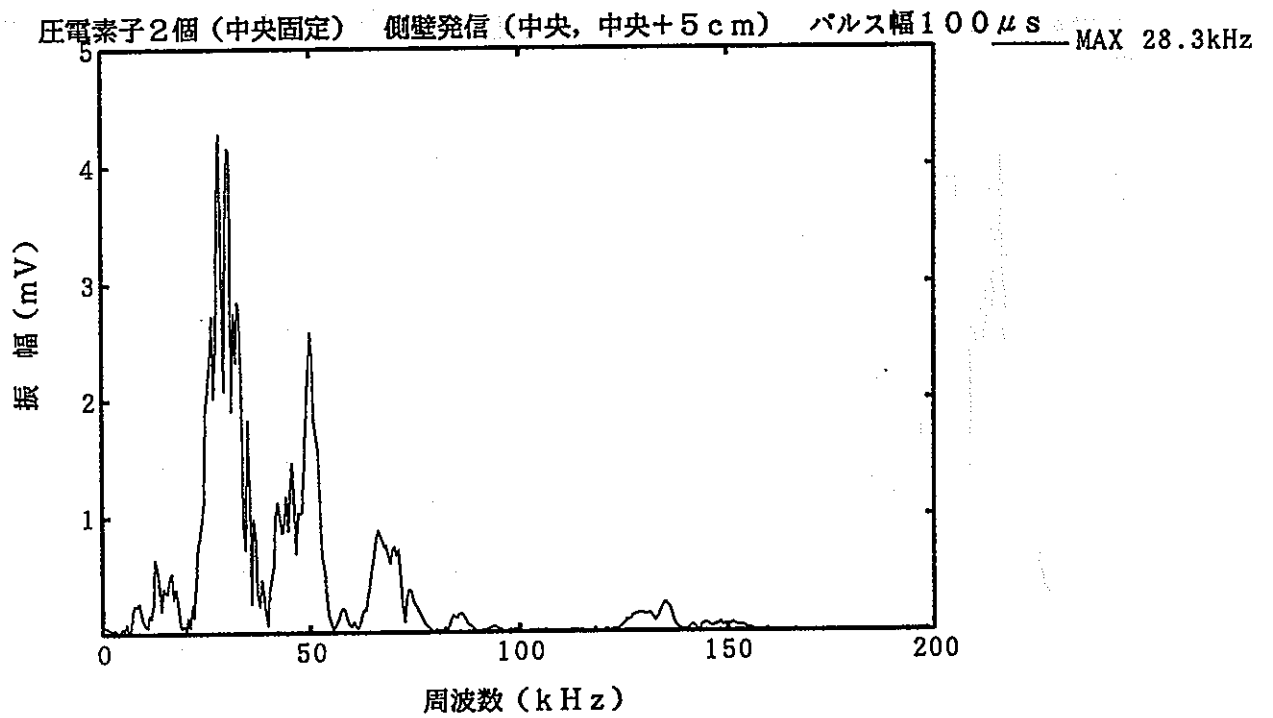
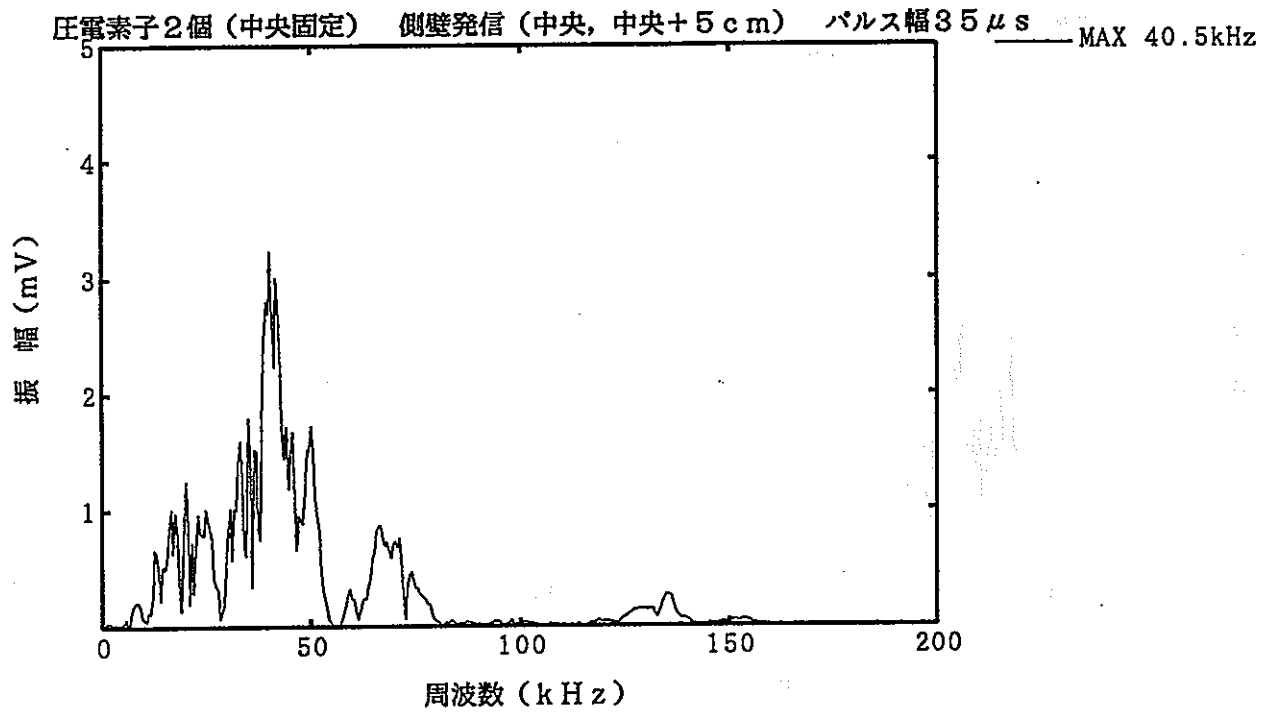


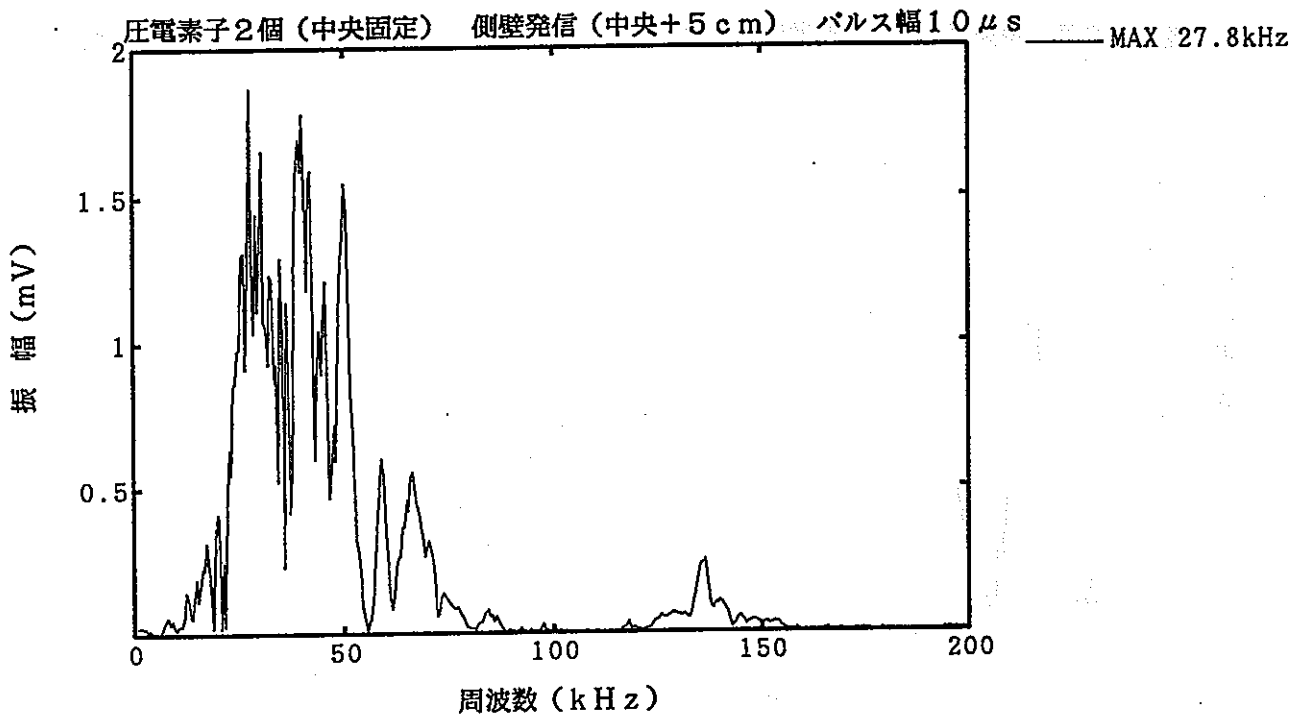
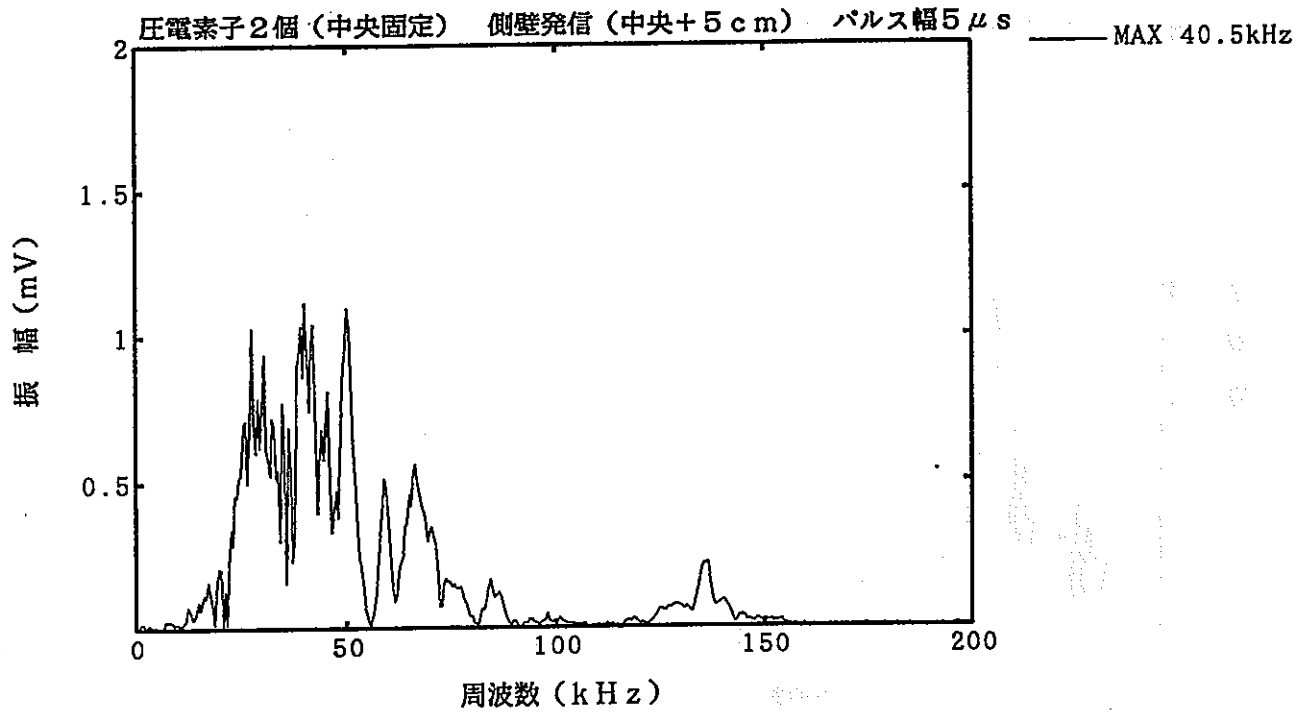
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央, 中央+5cm） パルス幅10 μ s MAX 30.8kHz

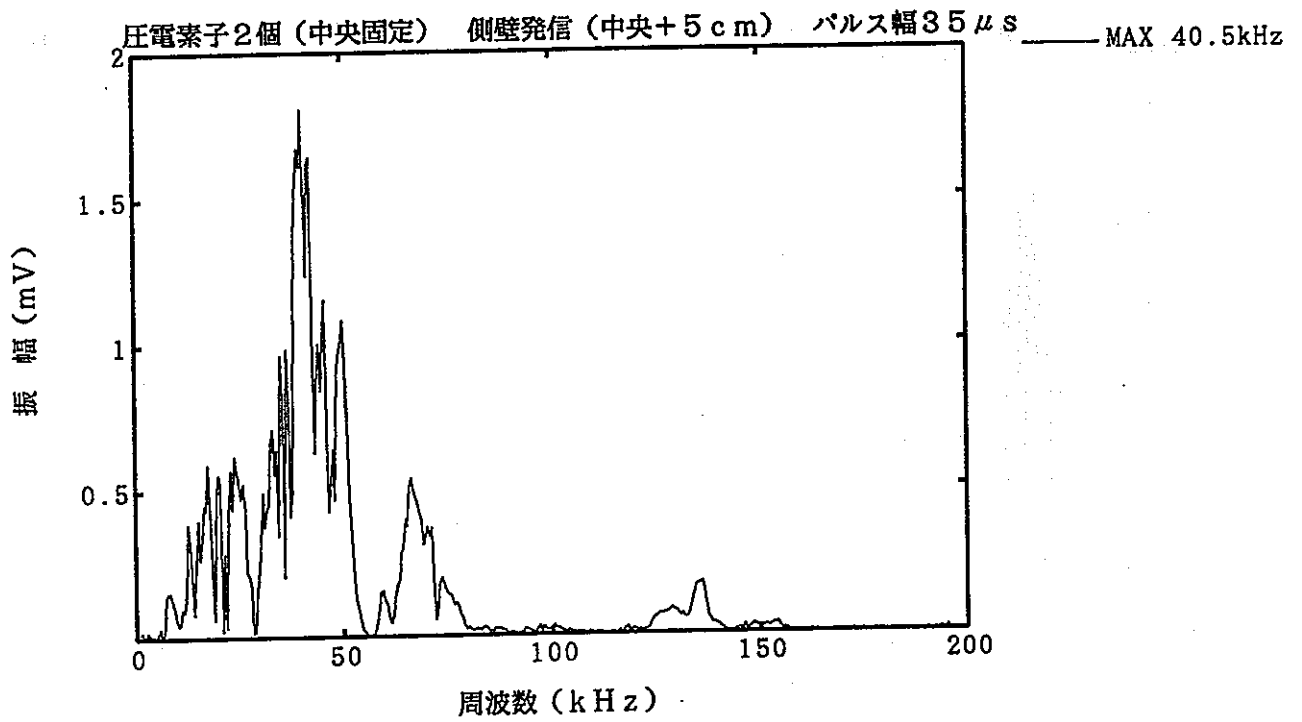
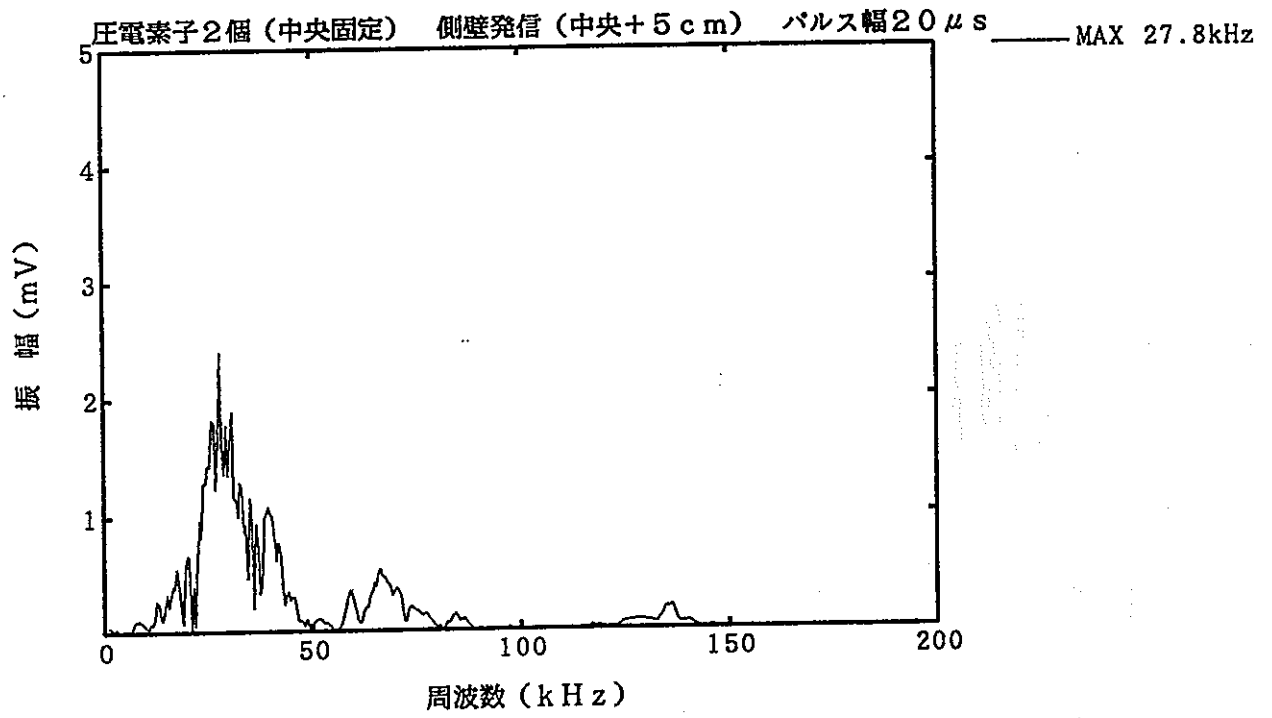


圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央, 中央+5cm） パルス幅20 μ s MAX 28.3kHz

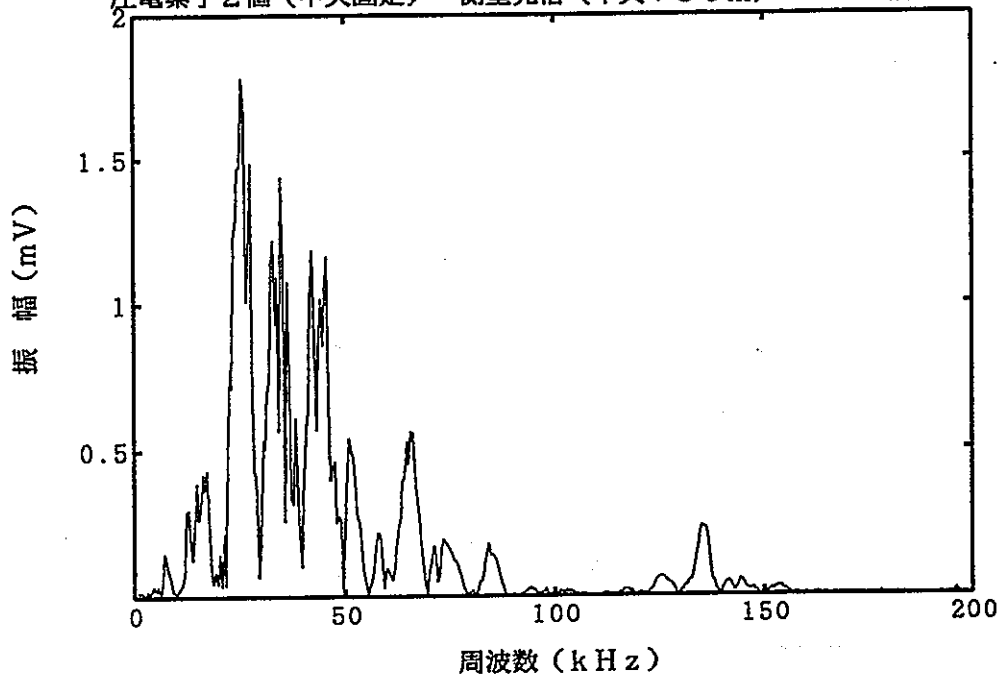




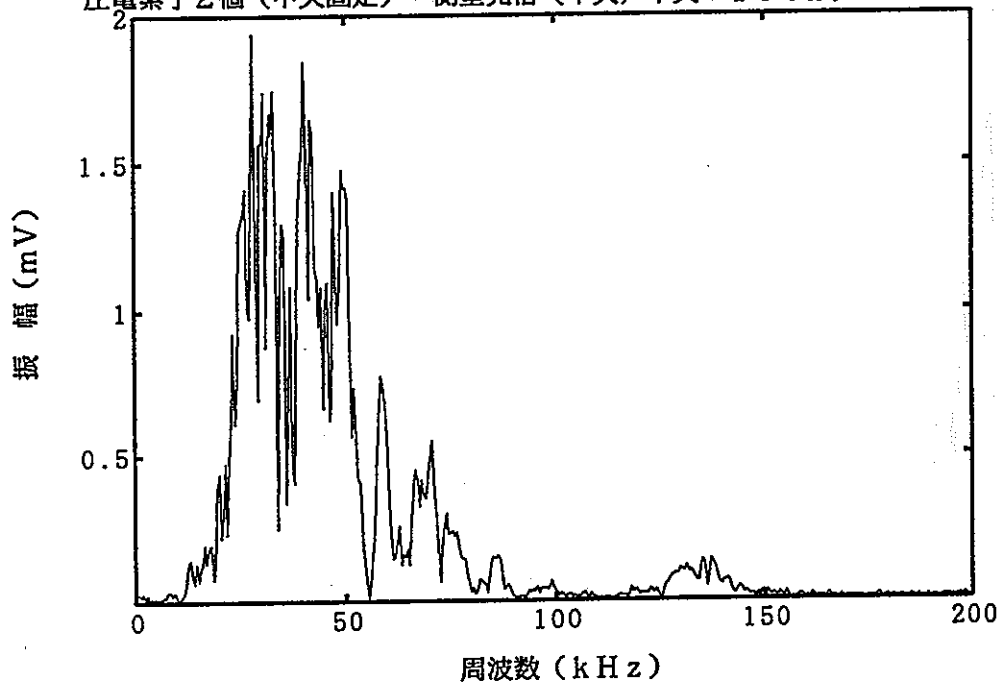




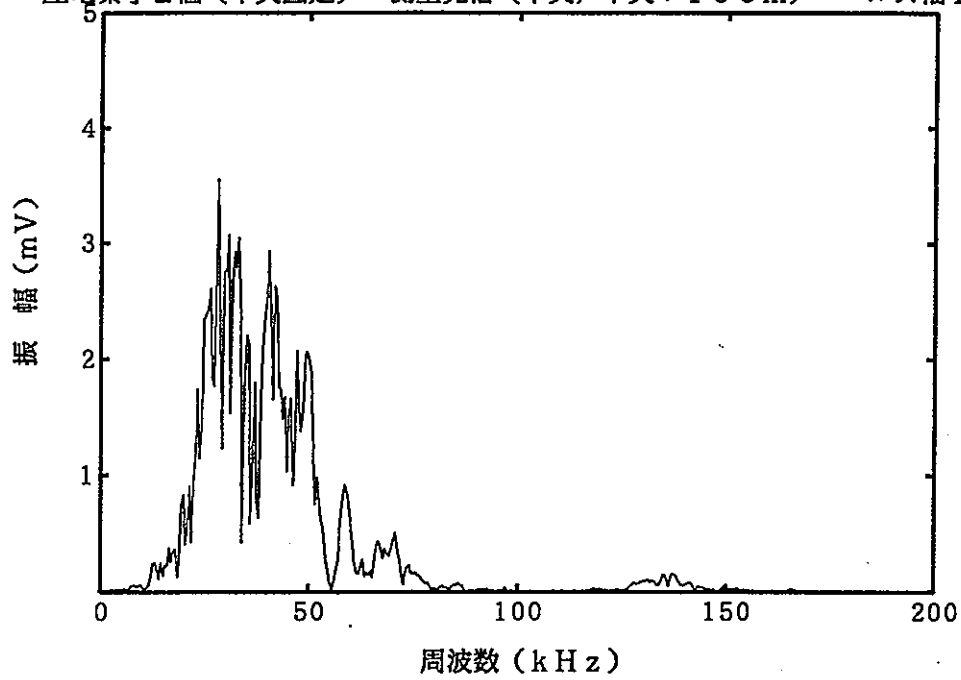
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央+5cm） パルス幅100 μ s MAX 25.9kHz



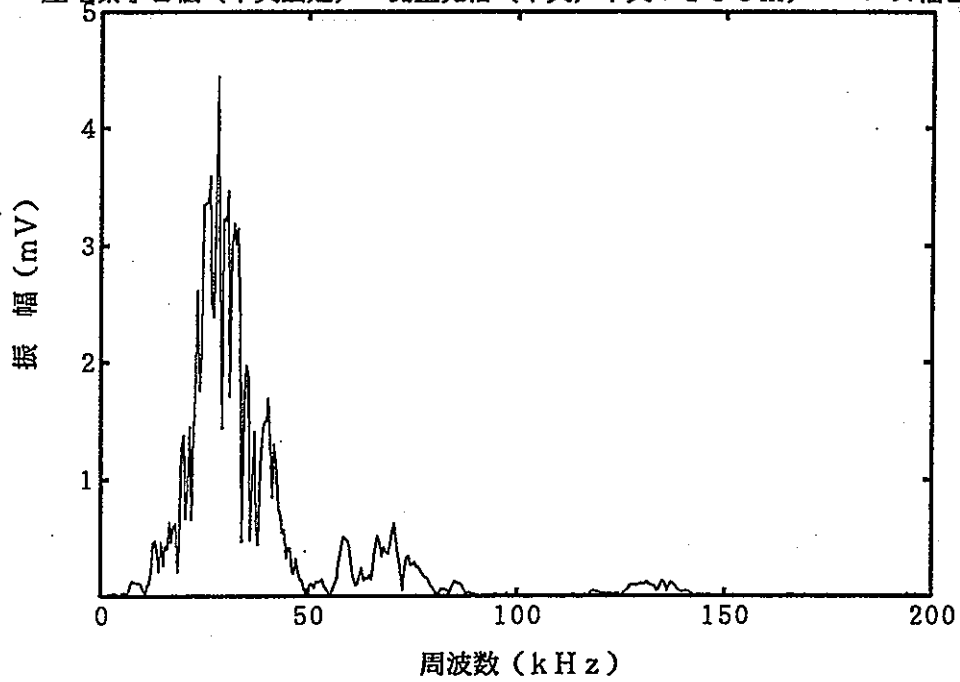
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央, 中央+10cm） パルス幅5 μ s MAX 28.3kHz



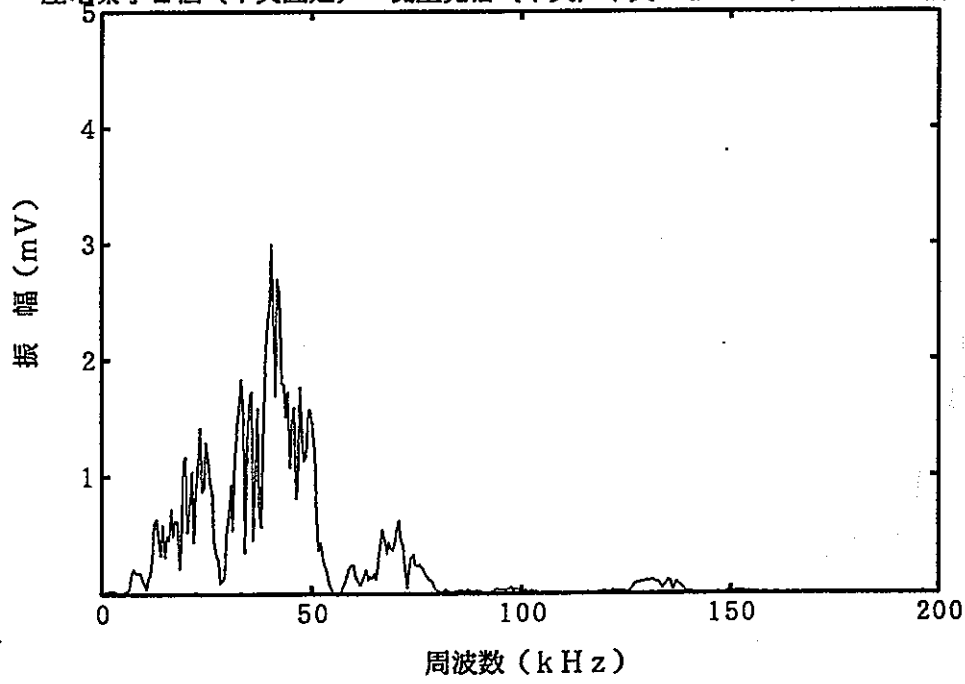
圧電素子2個(中央固定) 側壁発信(中央, 中央+10cm) パルス幅10 μ s MAX 28.3kHz



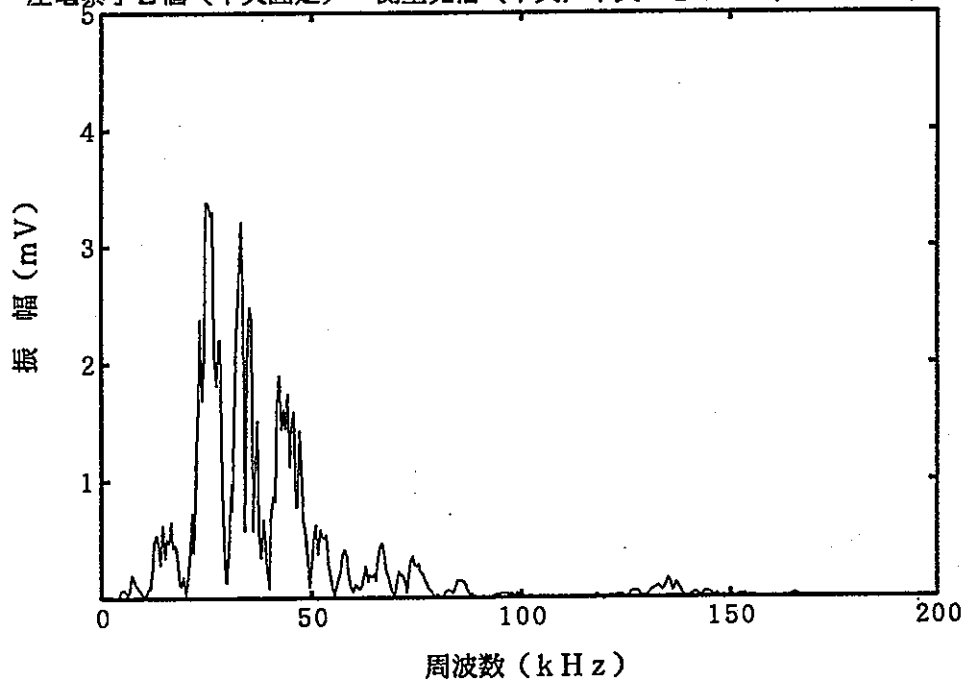
圧電素子2個(中央固定) 側壁発信(中央, 中央+10cm) パルス幅20 μ s MAX 28.3kHz

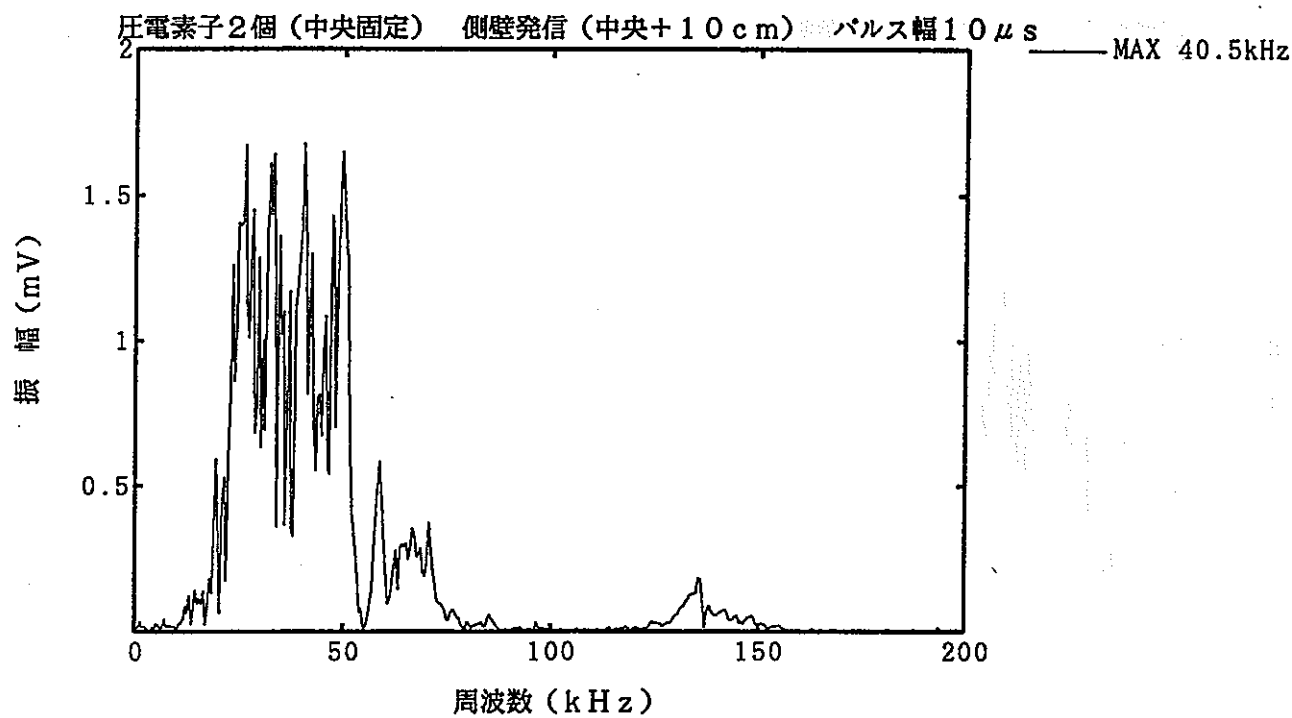
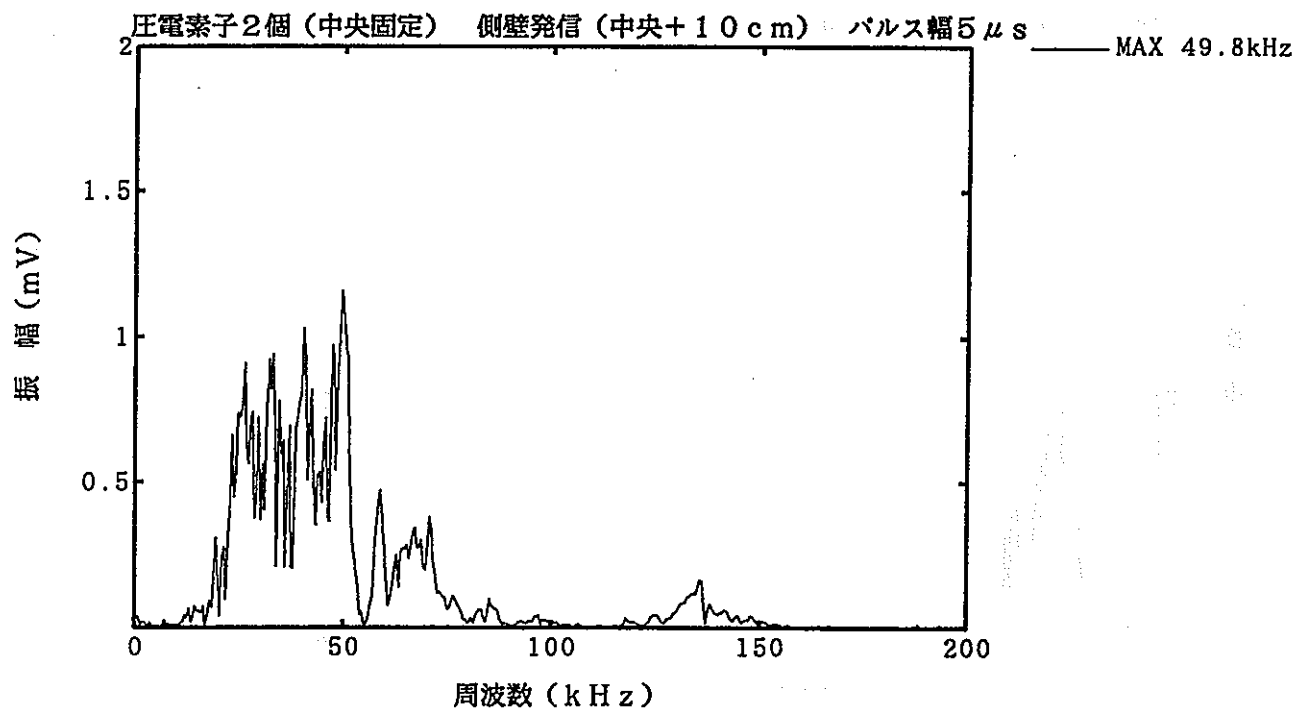


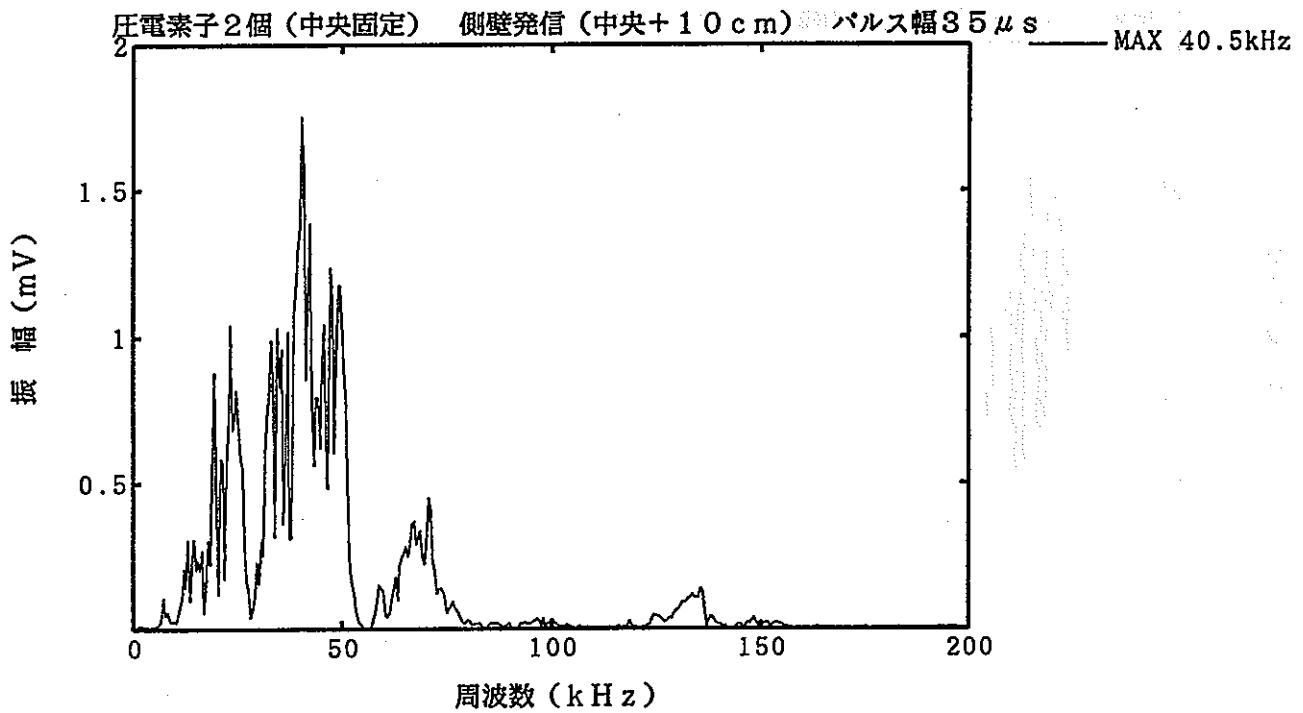
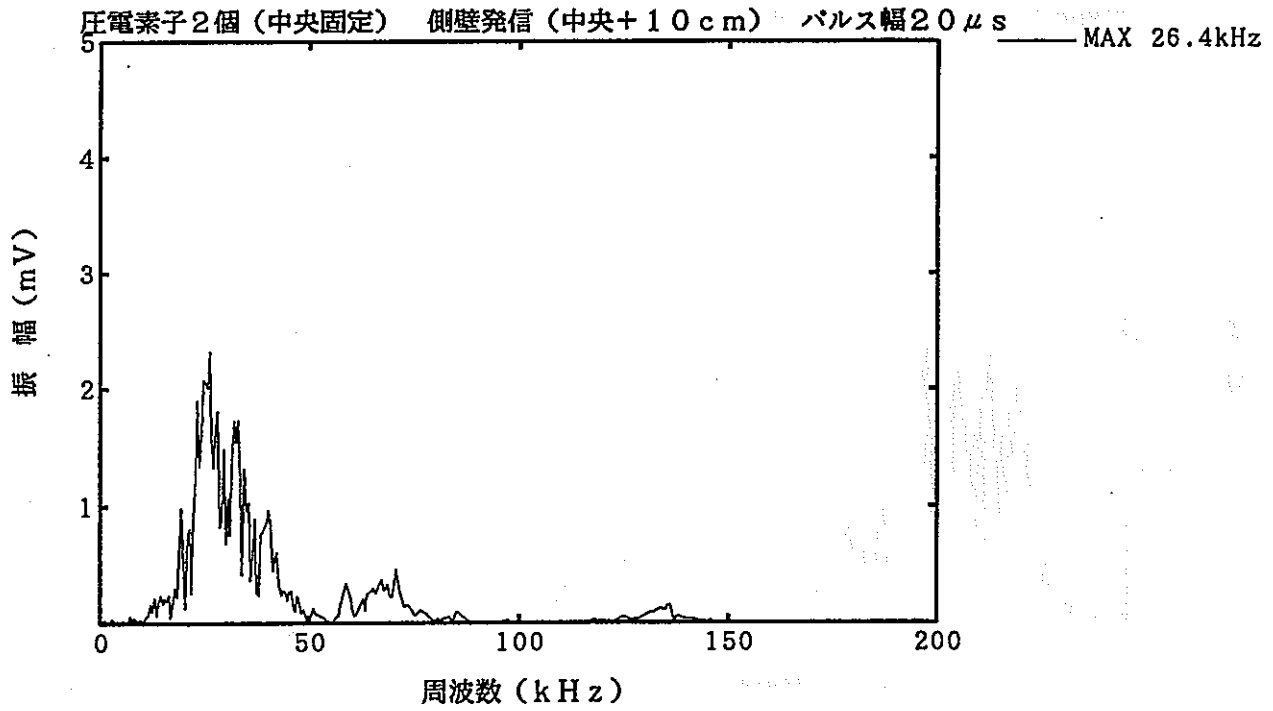
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央, 中央+10cm） パルス幅35 μ s MAX 40.5kHz

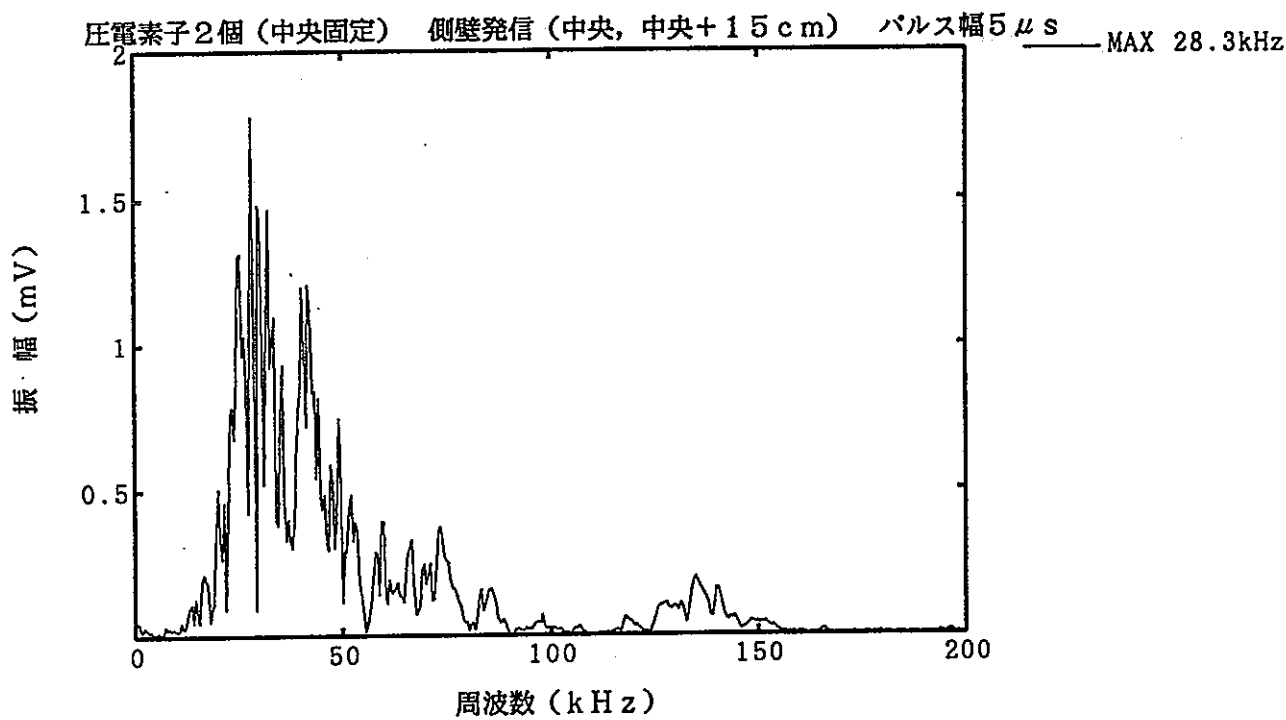
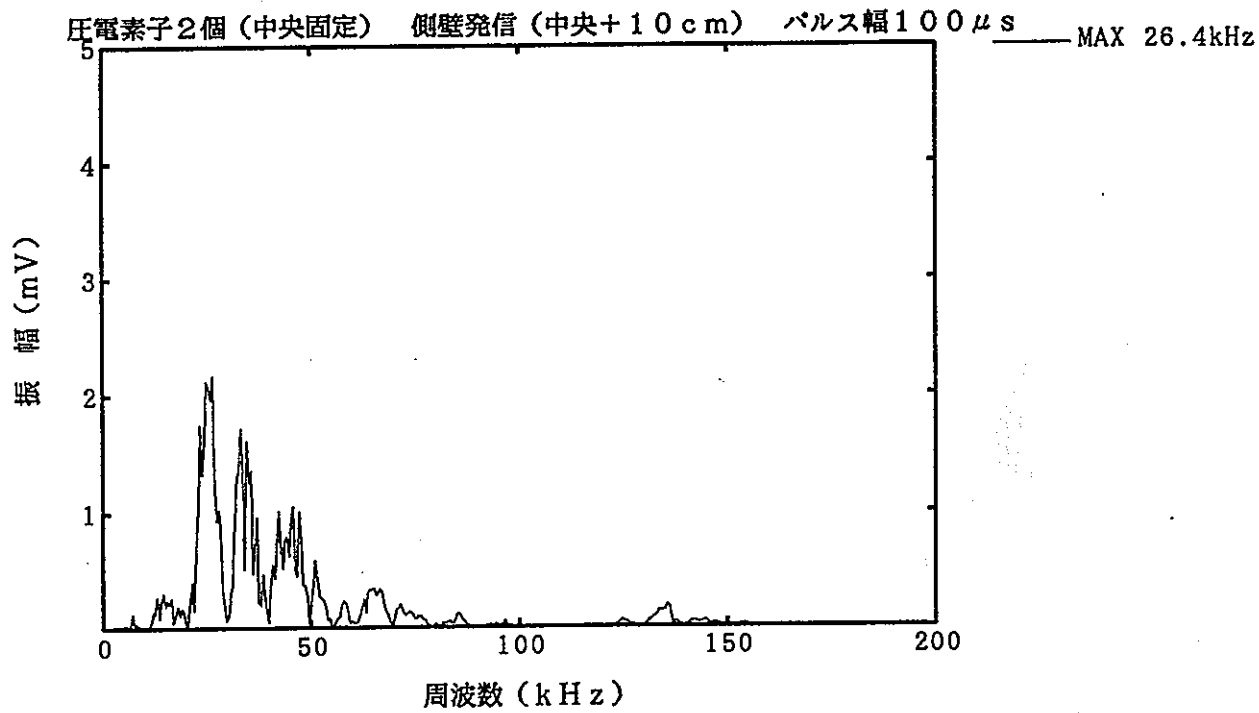


圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央, 中央+10cm） パルス幅100 μ s MAX 24.9kHz

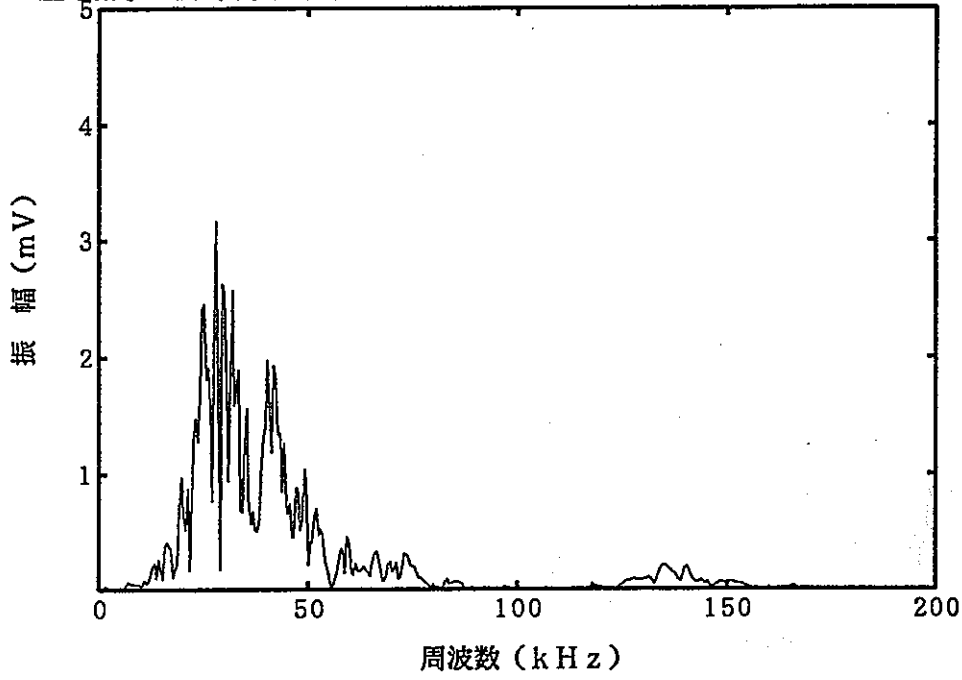




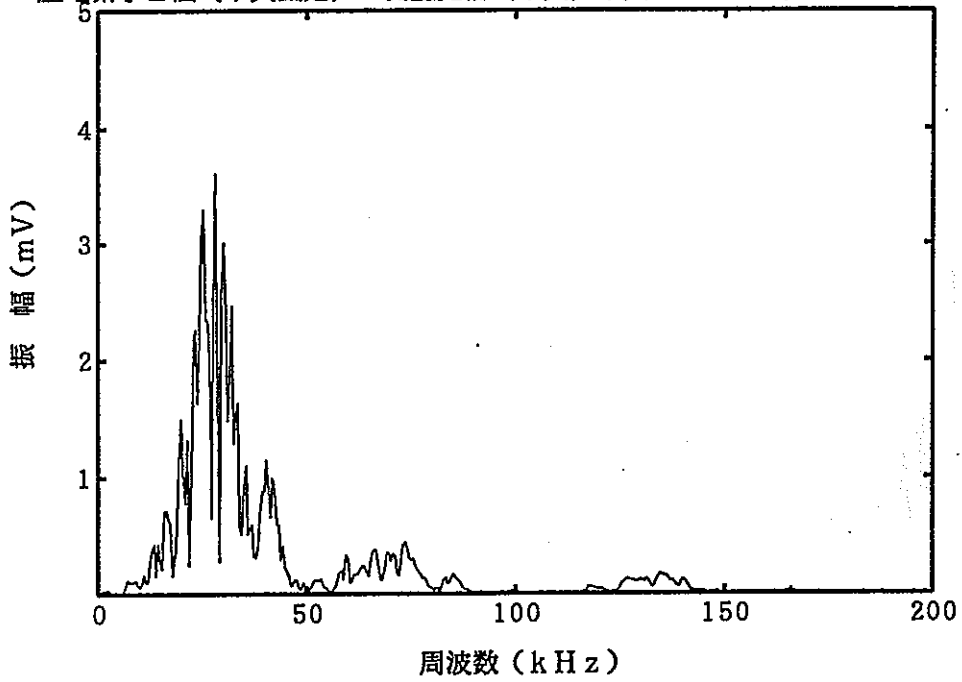


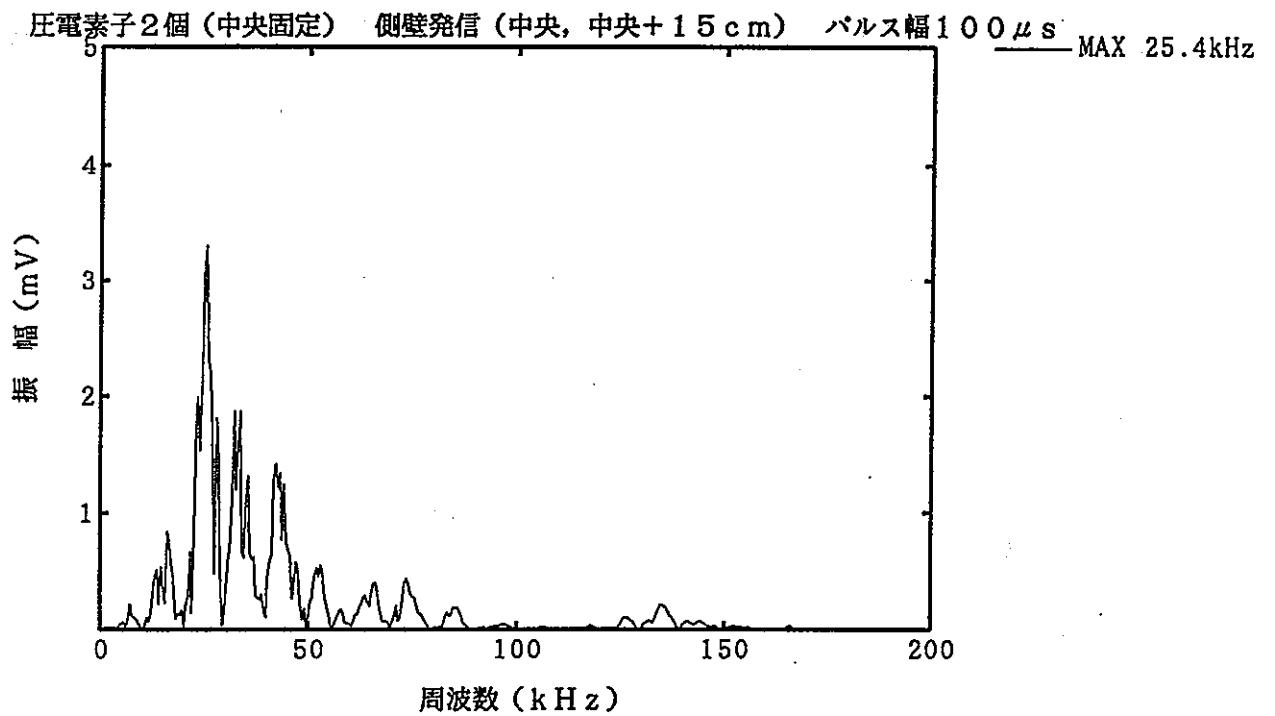
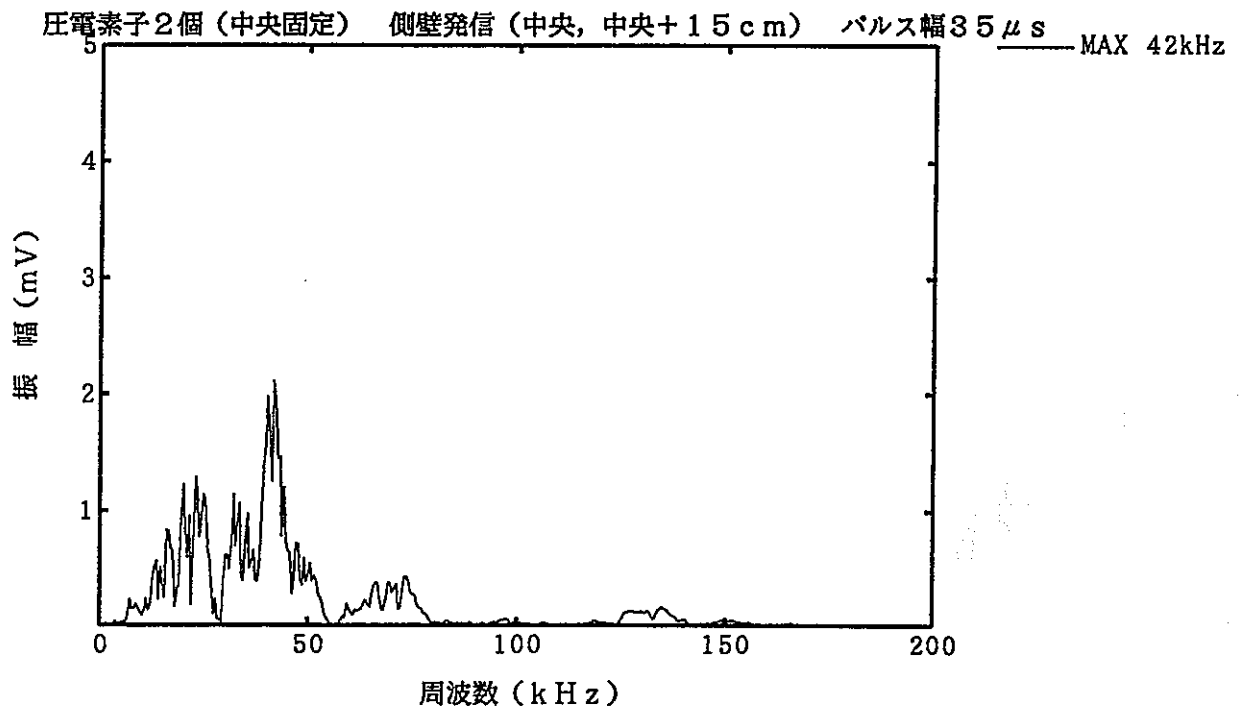


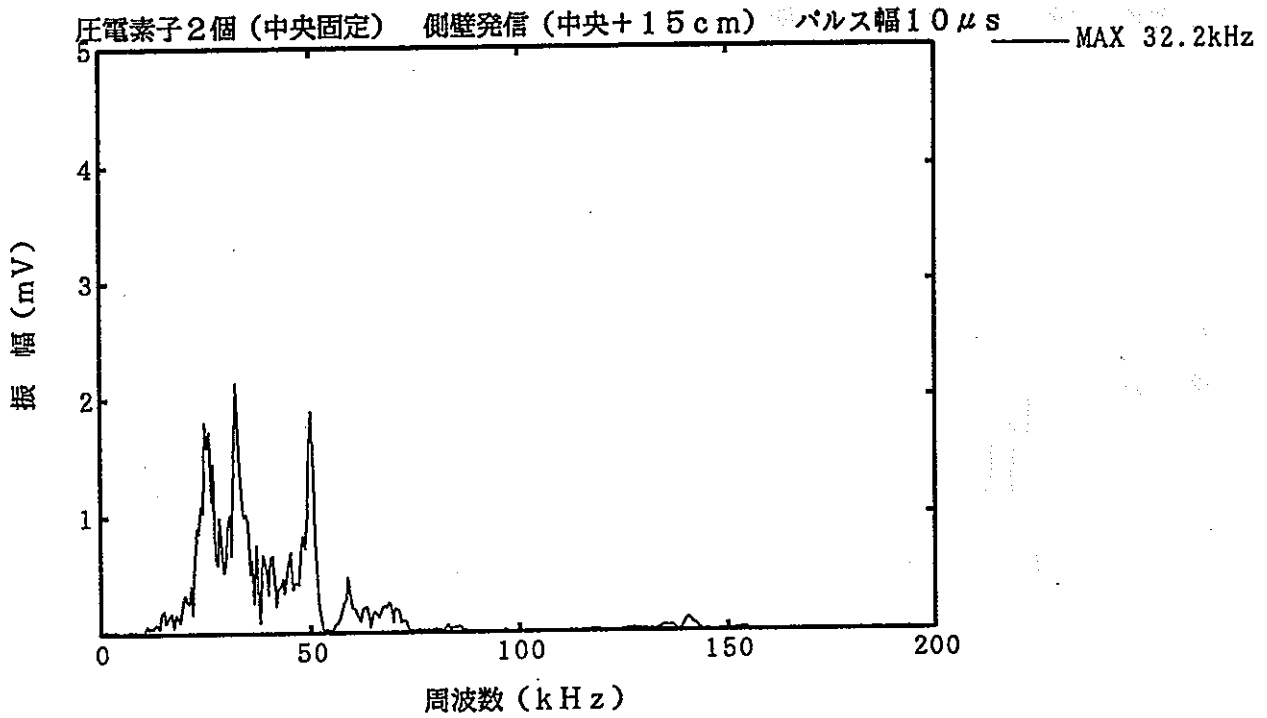
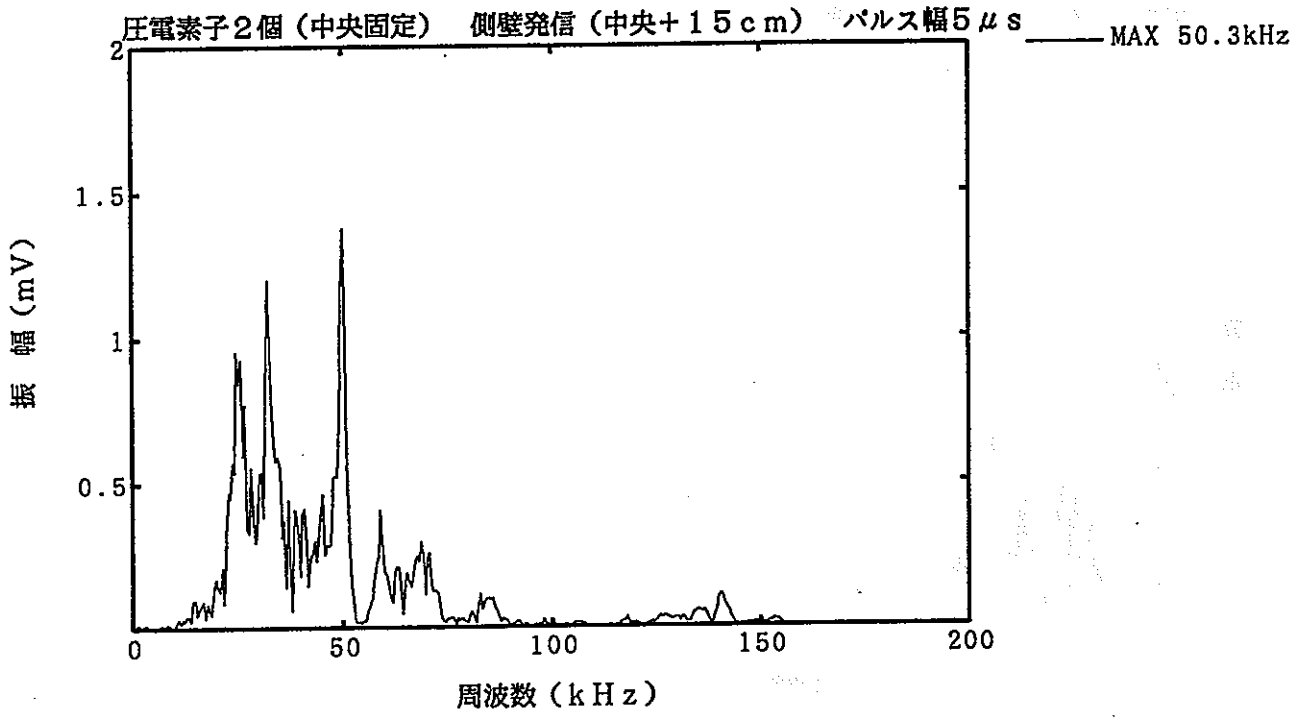
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央, 中央+15cm） パルス幅10 μ s MAX 28.3kHz



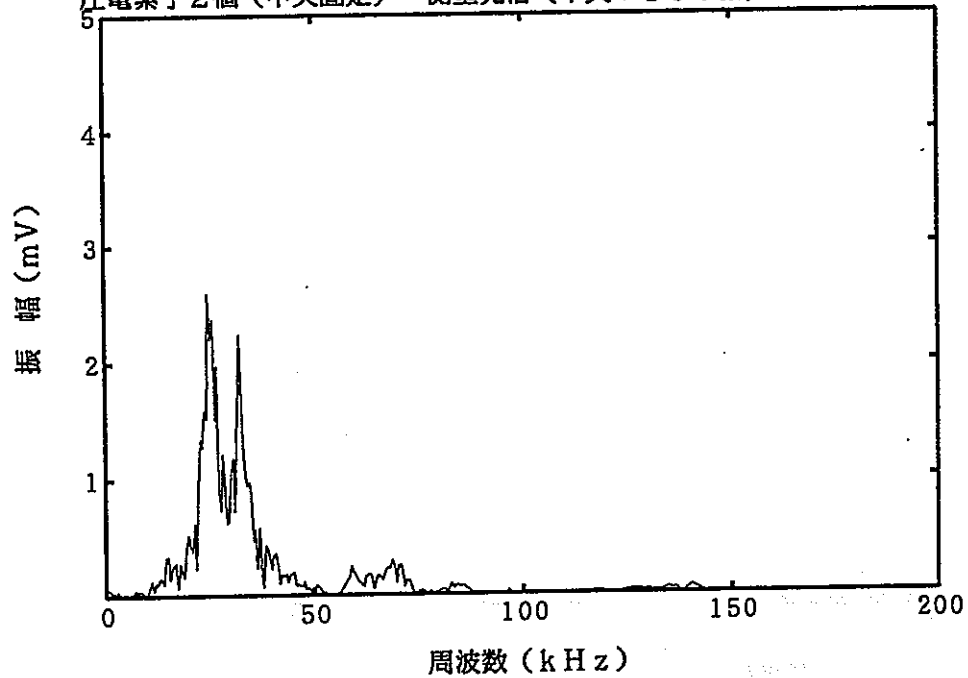
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央, 中央+15cm） パルス幅20 μ s MAX 28.3kHz



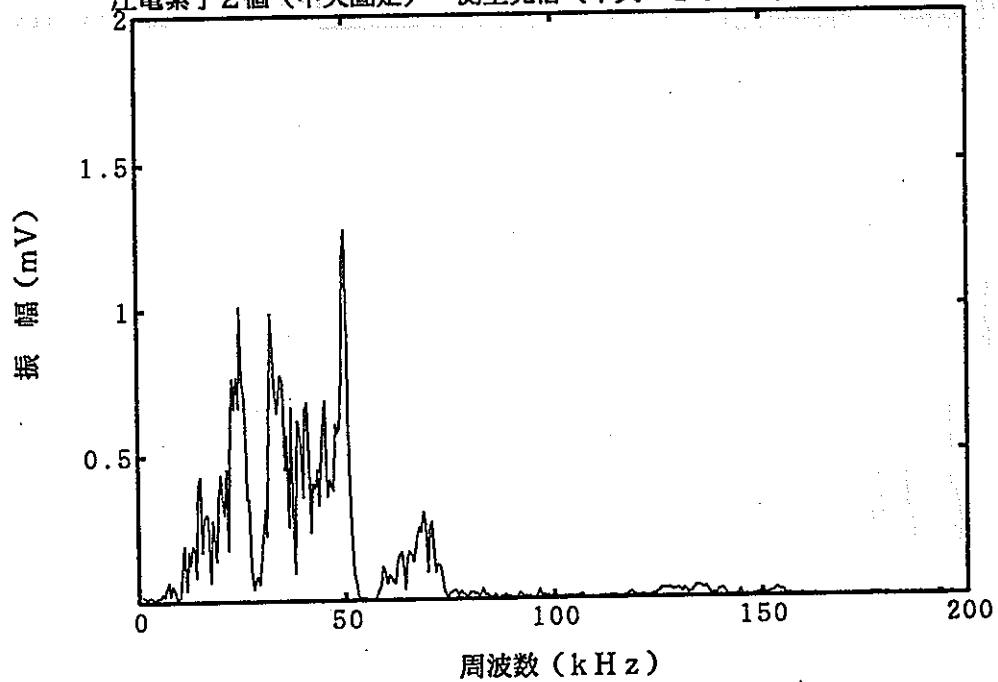




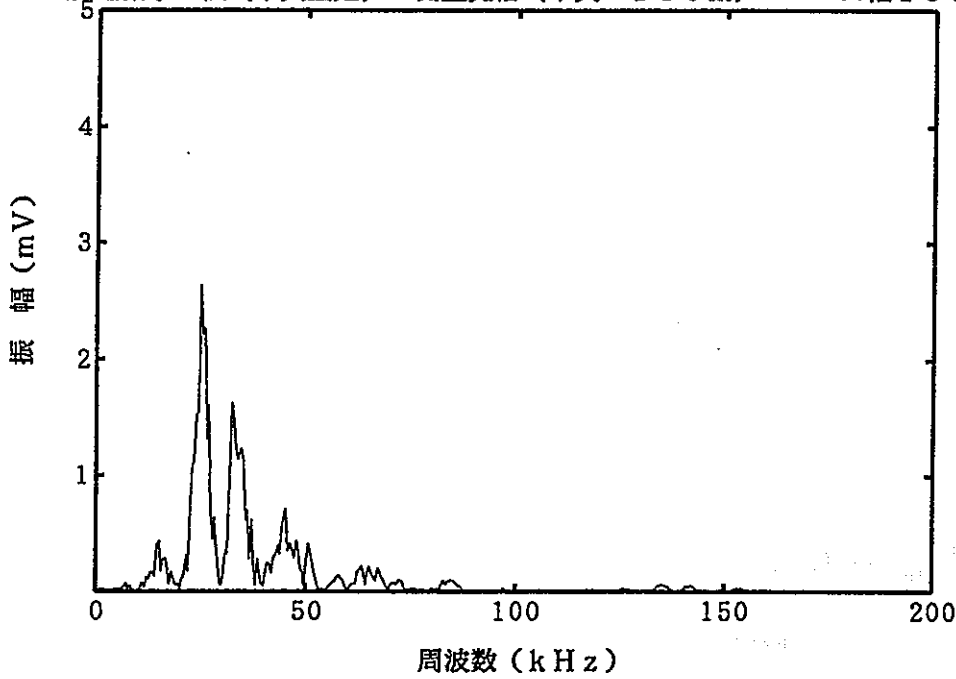
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央+15cm） パルス幅20 μ s MAX 24.9kHz



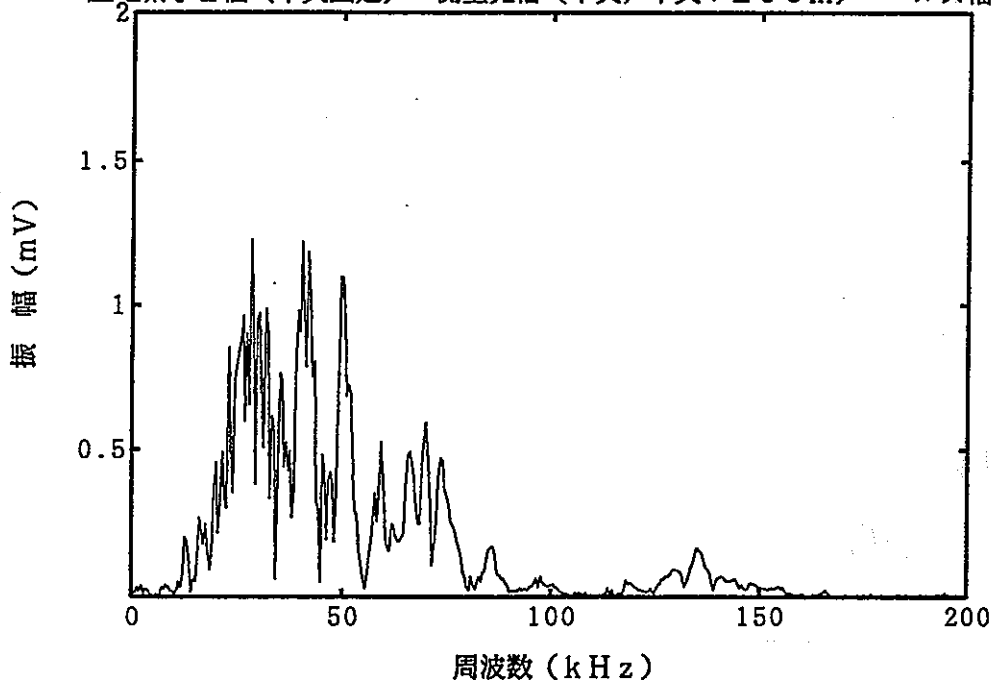
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央+15cm） パルス幅35 μ s MAX 50.3kHz



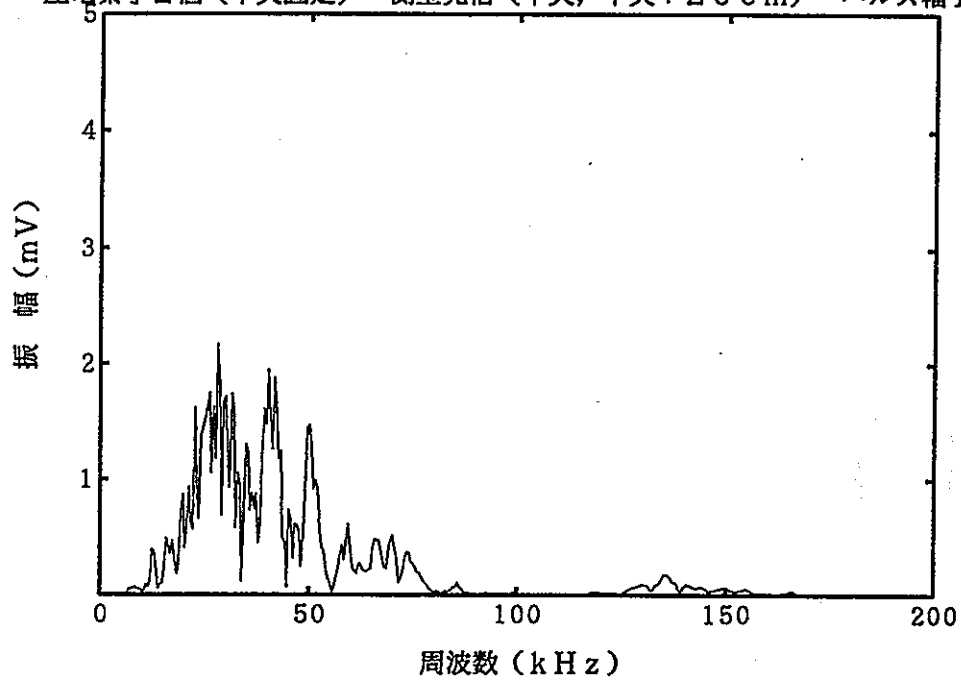
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央+15cm） パルス幅100 μ s MAX 24.9kHz



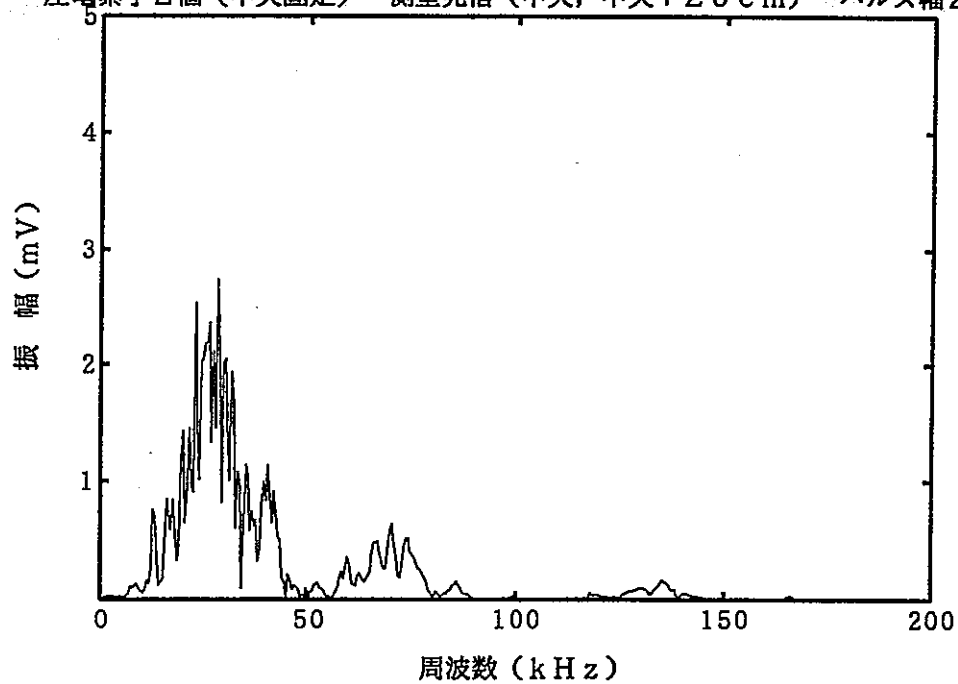
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央, 中央+20cm） パルス幅5 μ s MAX 28.3kHz



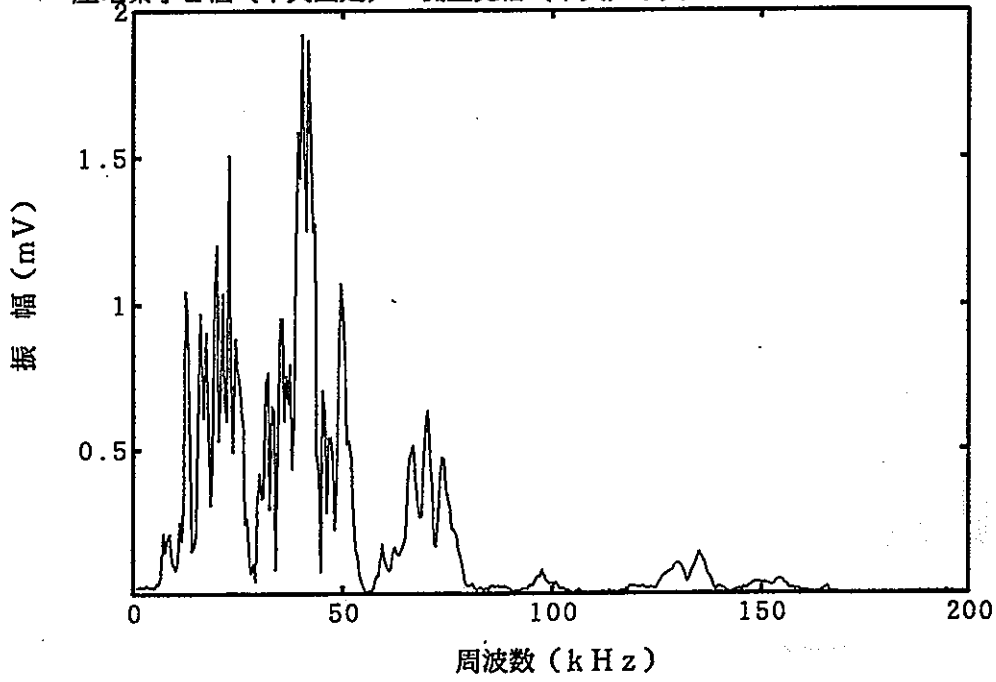
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央, 中央+20cm） パルス幅10 μ s MAX 28.3kHz



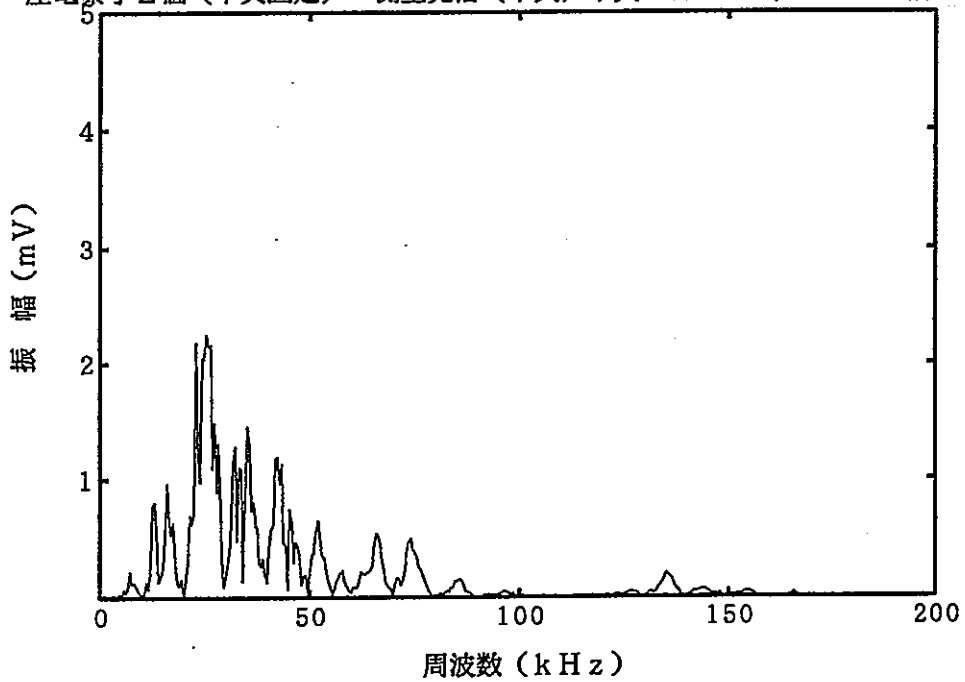
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央, 中央+20cm） パルス幅20 μ s MAX 28.3kHz

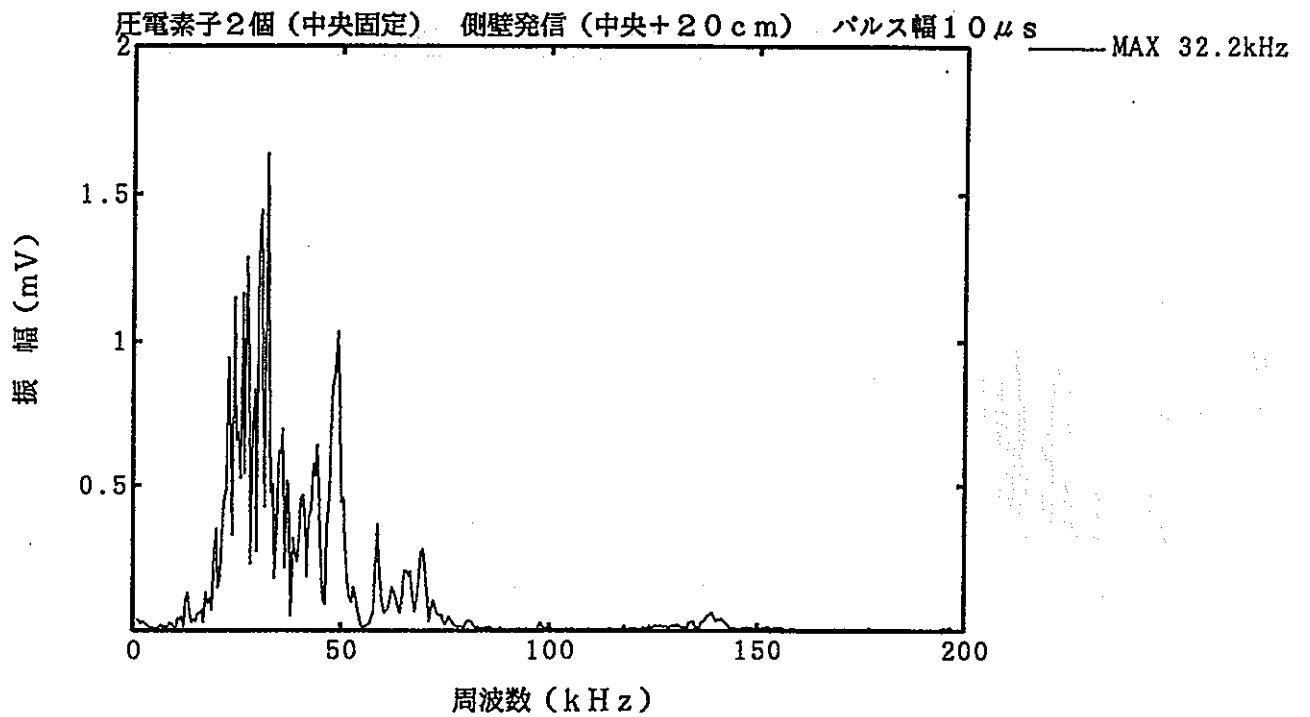
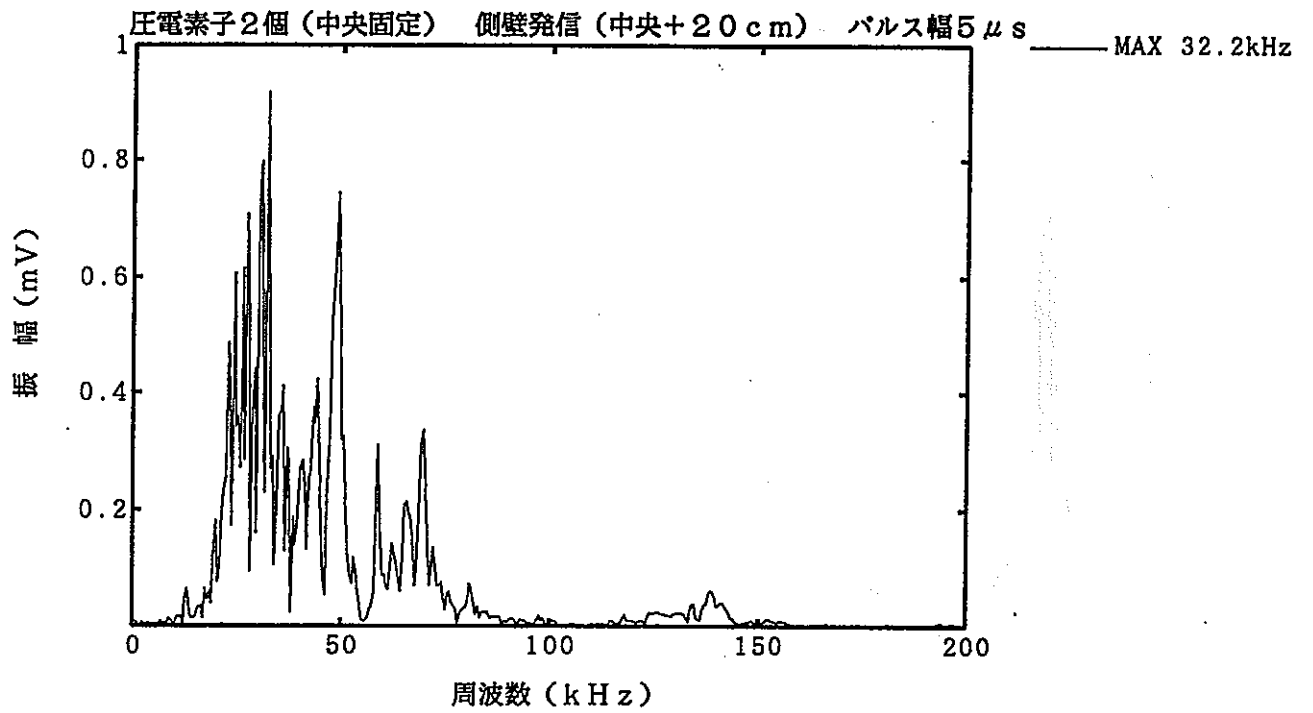


圧電素子2個(中央固定) 側壁発信(中央, 中央+20cm) パルス幅35 μ s MAX 40.5kHz

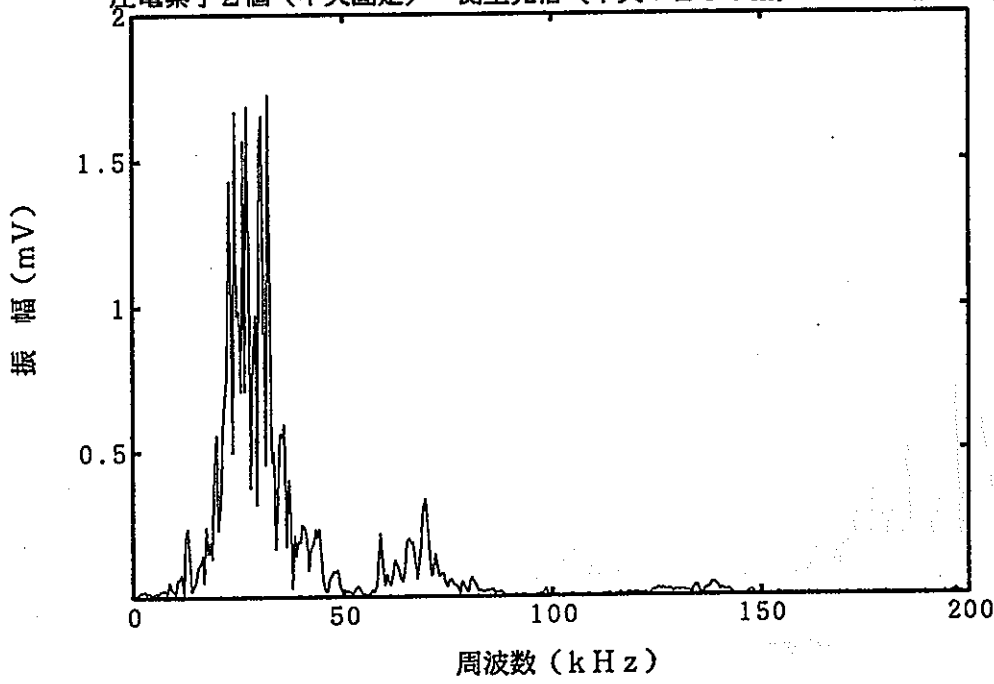


圧電素子2個(中央固定) 側壁発信(中央, 中央+20cm) パルス幅100 μ s MAX 25.4kHz

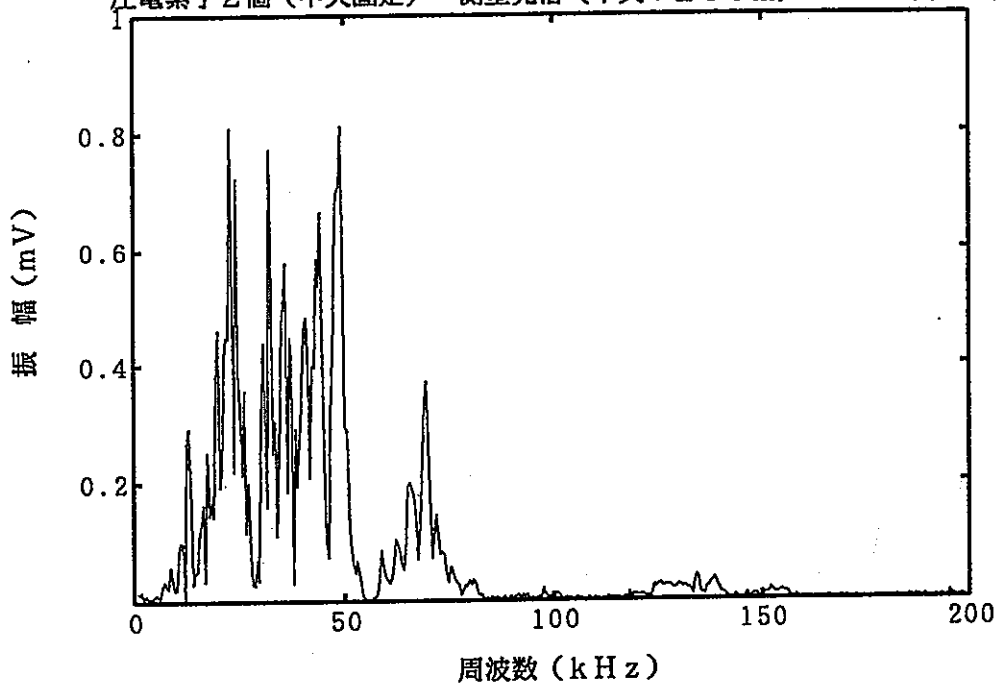




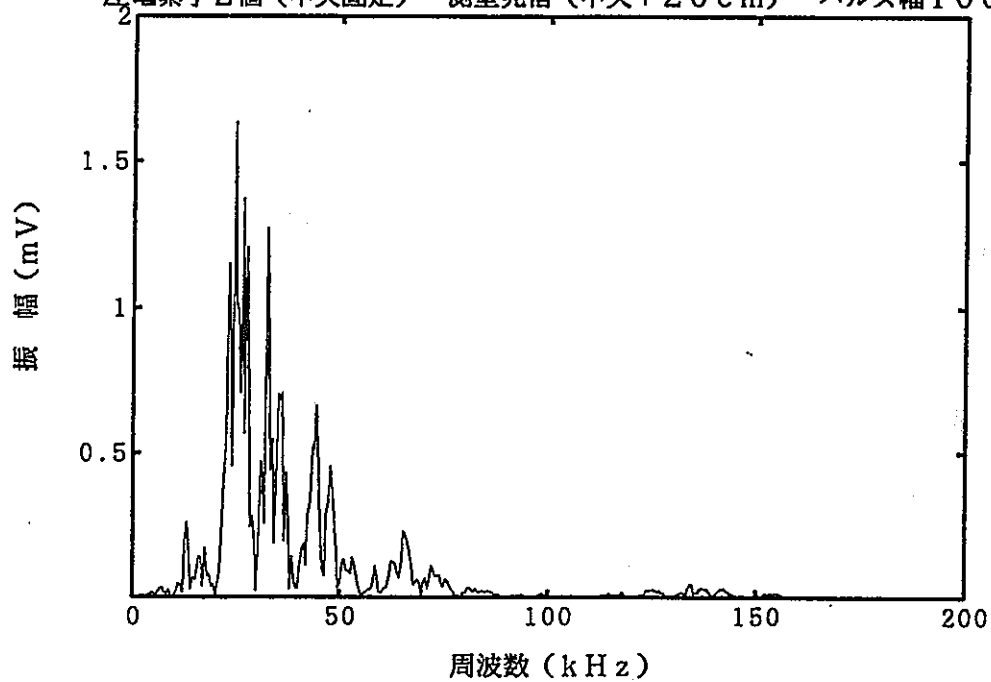
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央+20cm） パルス幅20 μ s MAX 32.2kHz

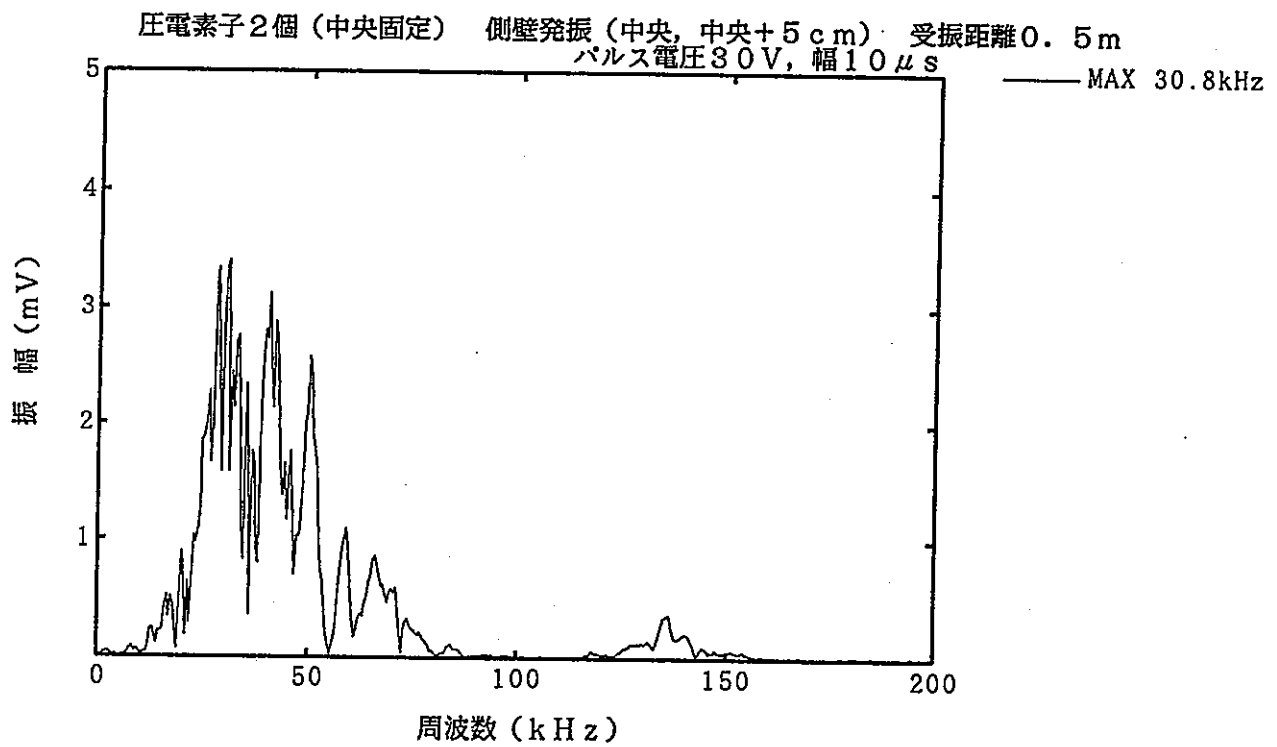
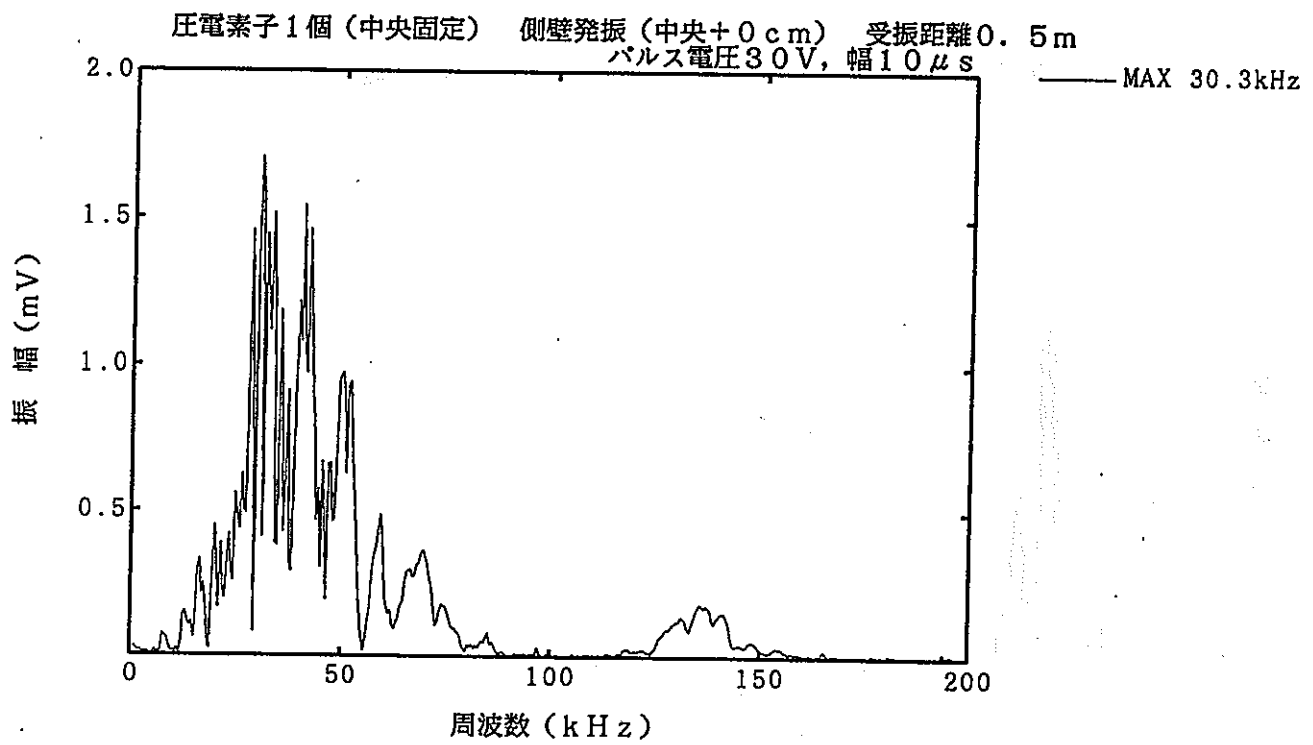


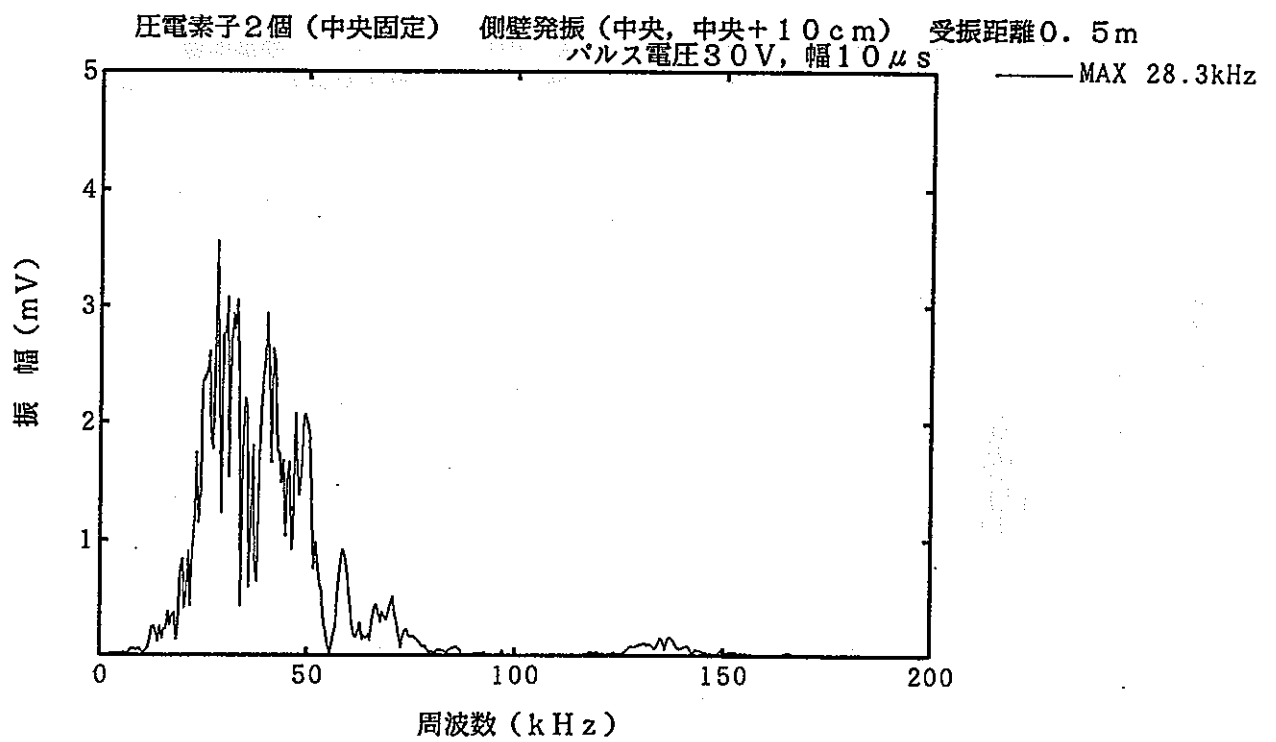
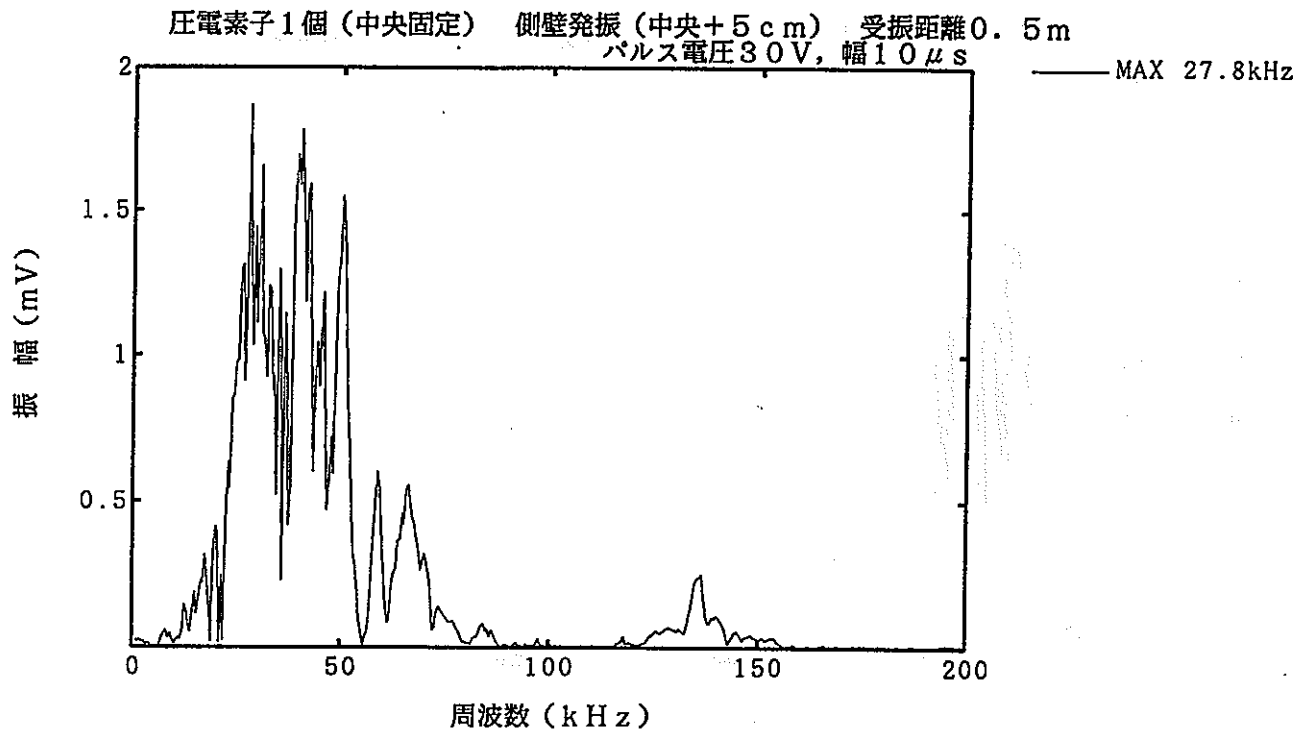
圧電素子2個（中央固定） 側壁発信（中央+20cm） パルス幅35 μ s MAX 49.3kHz

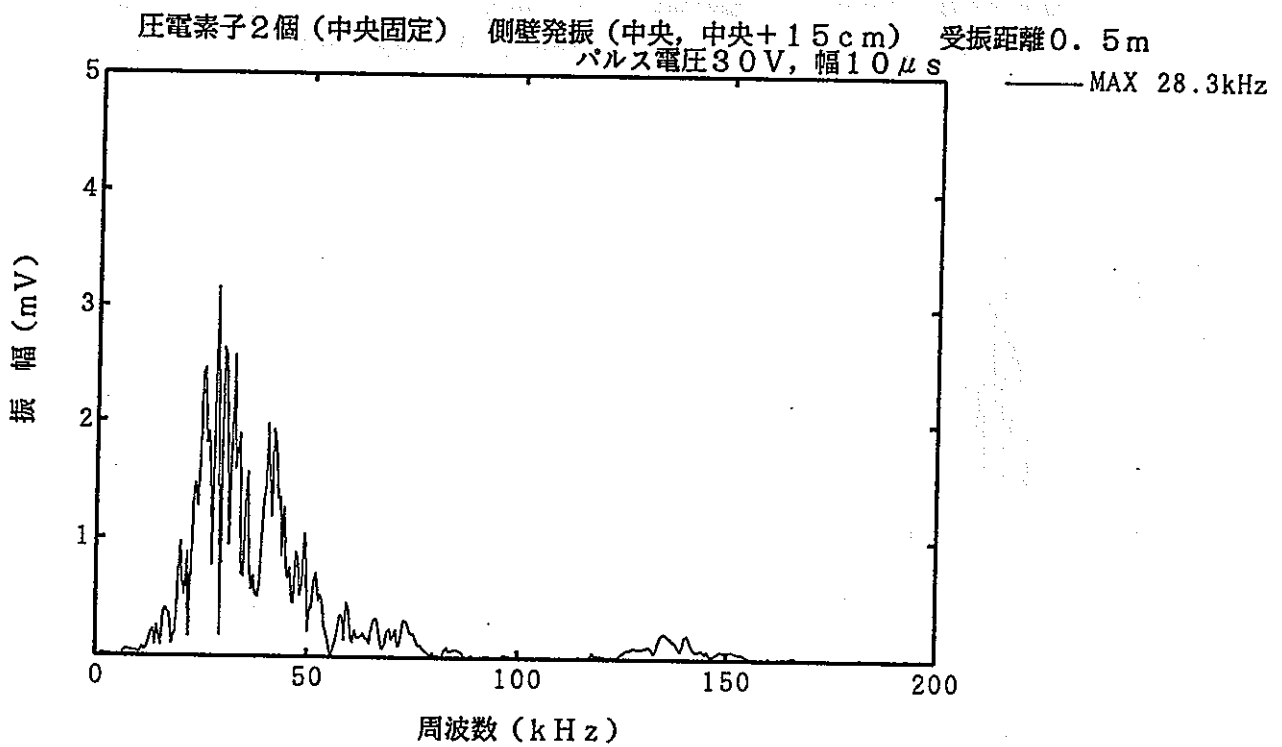
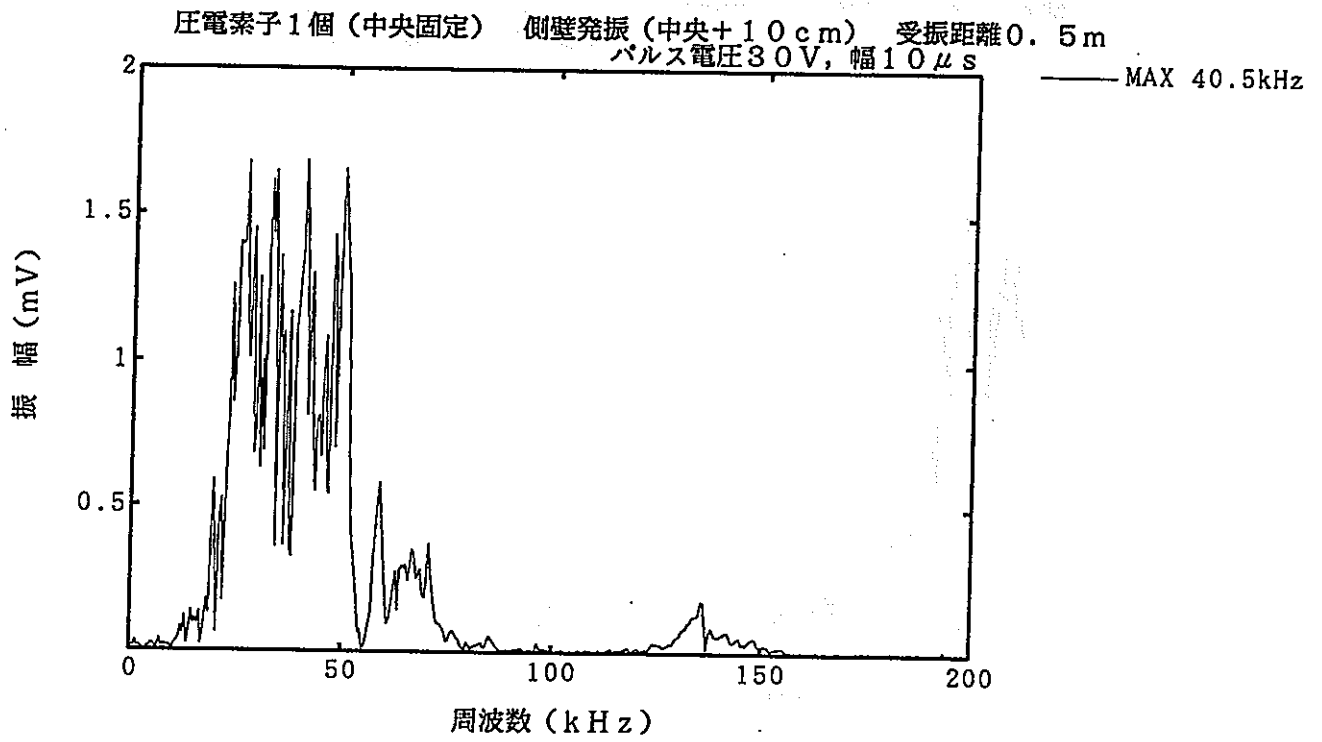


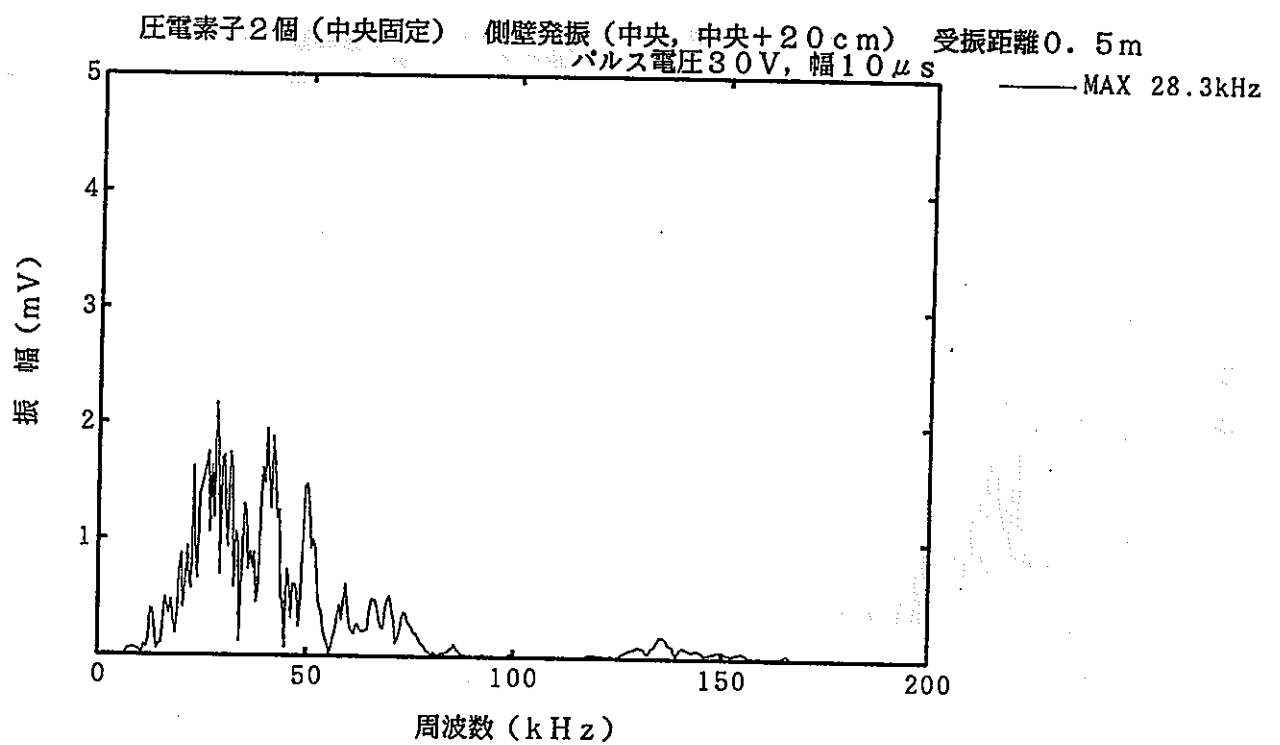
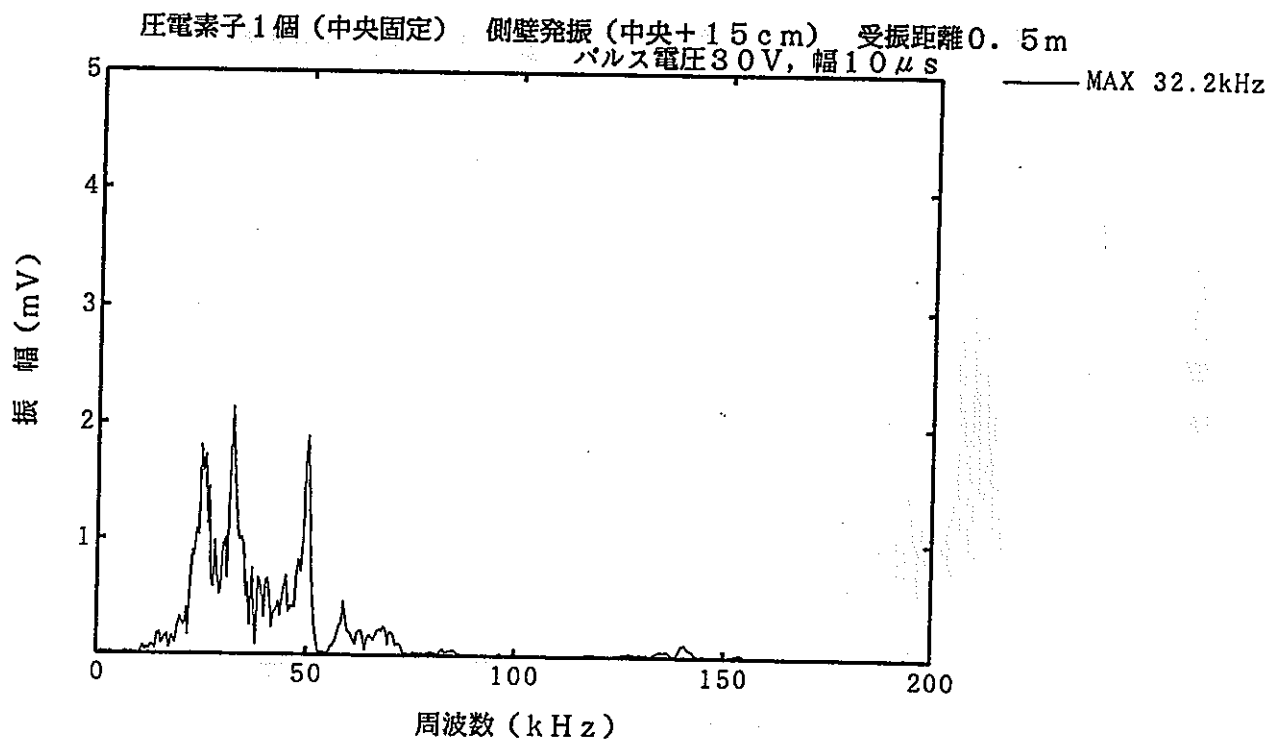
圧電素子2個(中央固定) 側壁発信(中央+20cm) パルス幅100 μ s MAX 24.4kHz



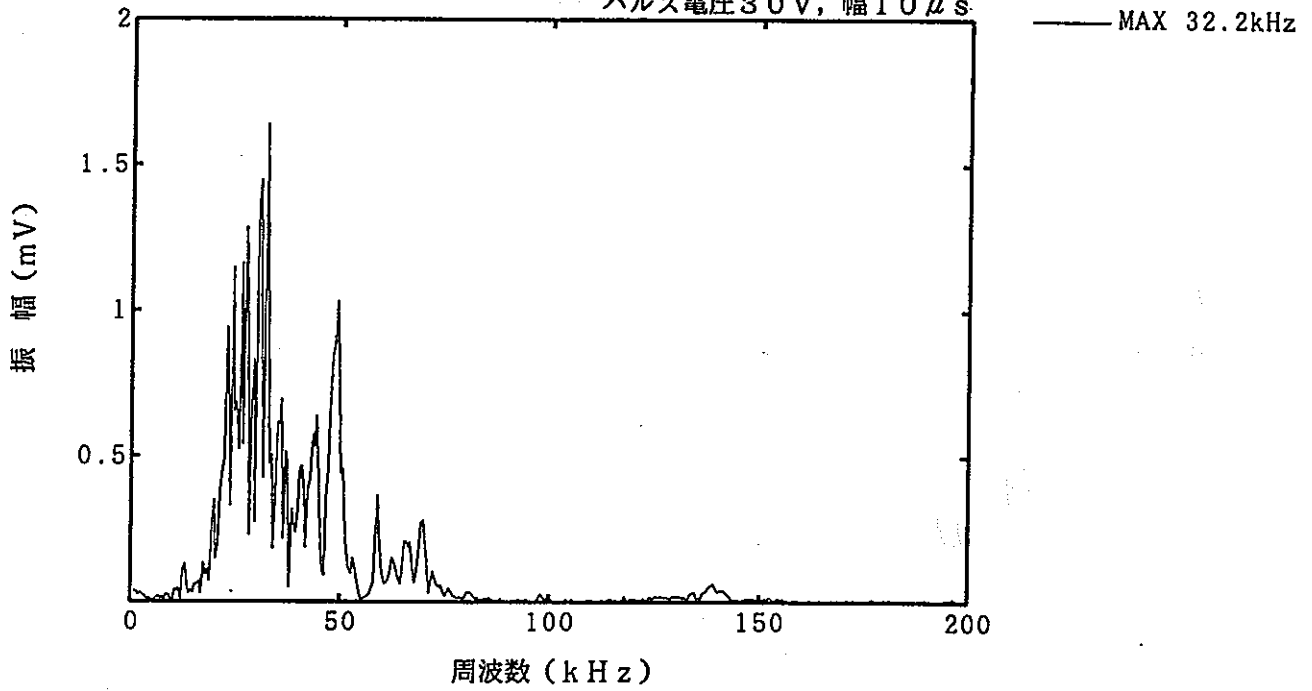




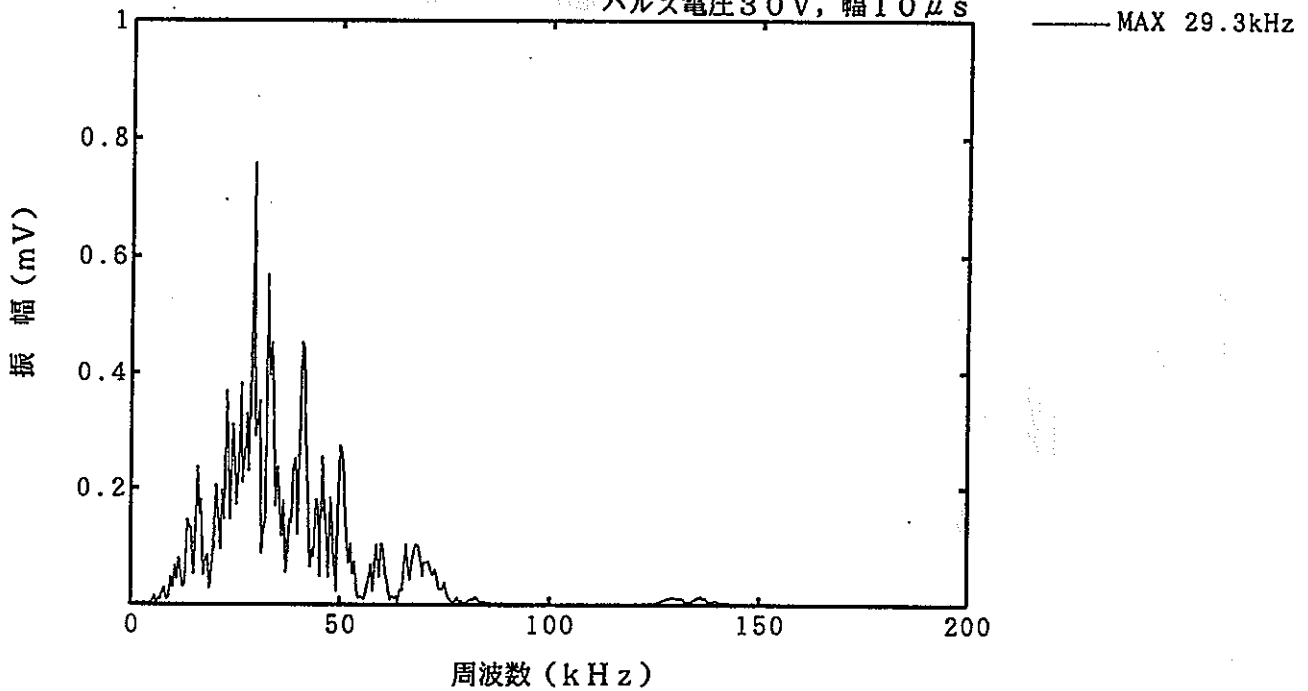




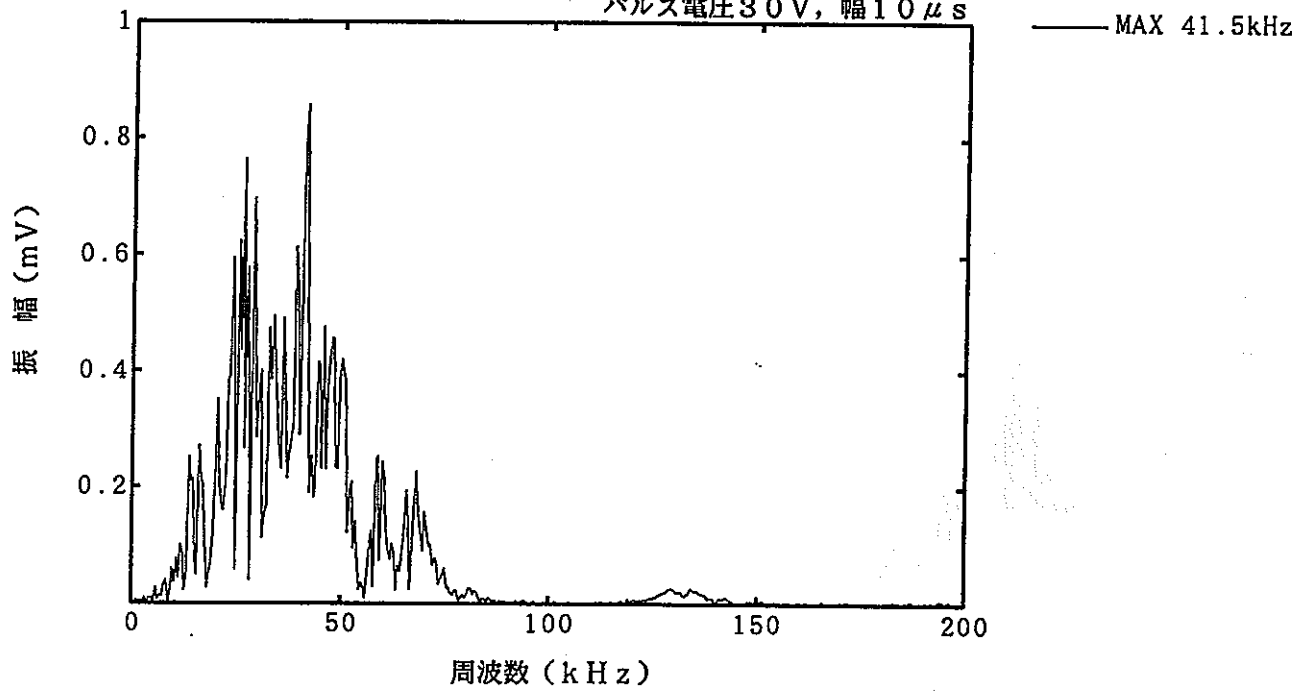
圧電素子1個（中央固定） 側壁発振（中央+20cm） 受振距離0.5m
パルス電圧30V, 幅10 μ s



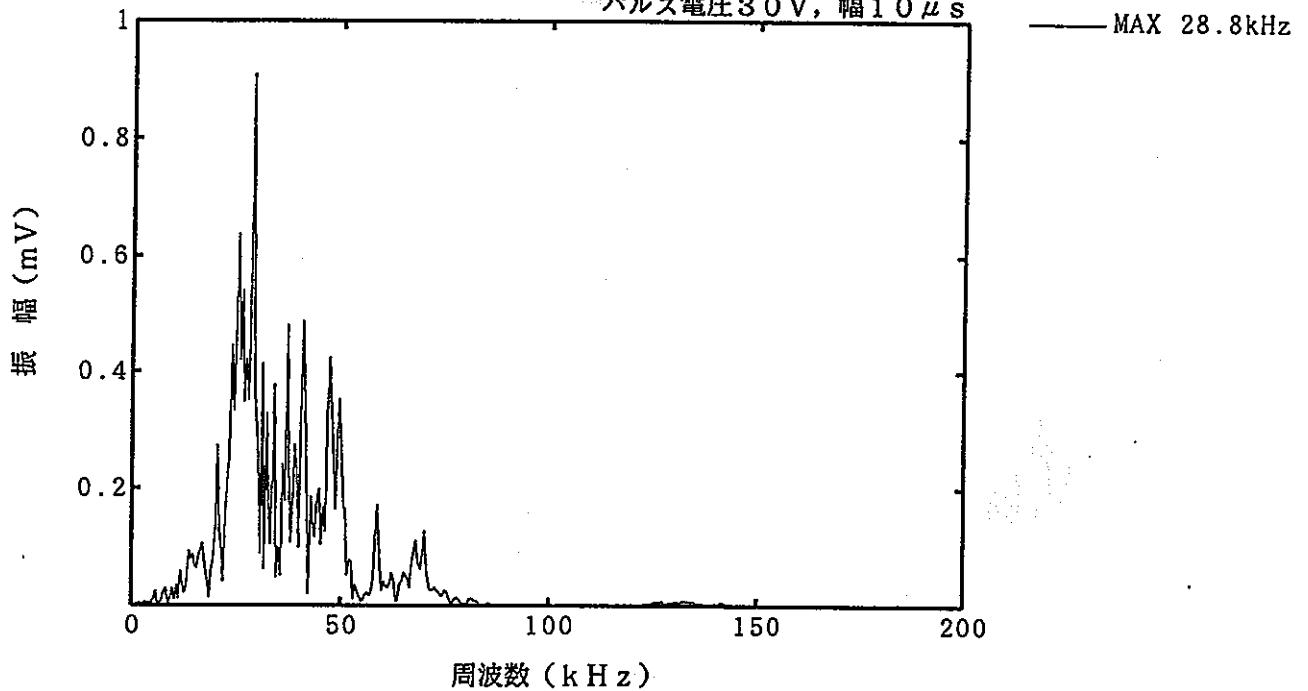
圧電素子1個（中央固定） 側壁発振（中央+0cm） 受振距離1m
パルス電圧30V, 幅10 μ s



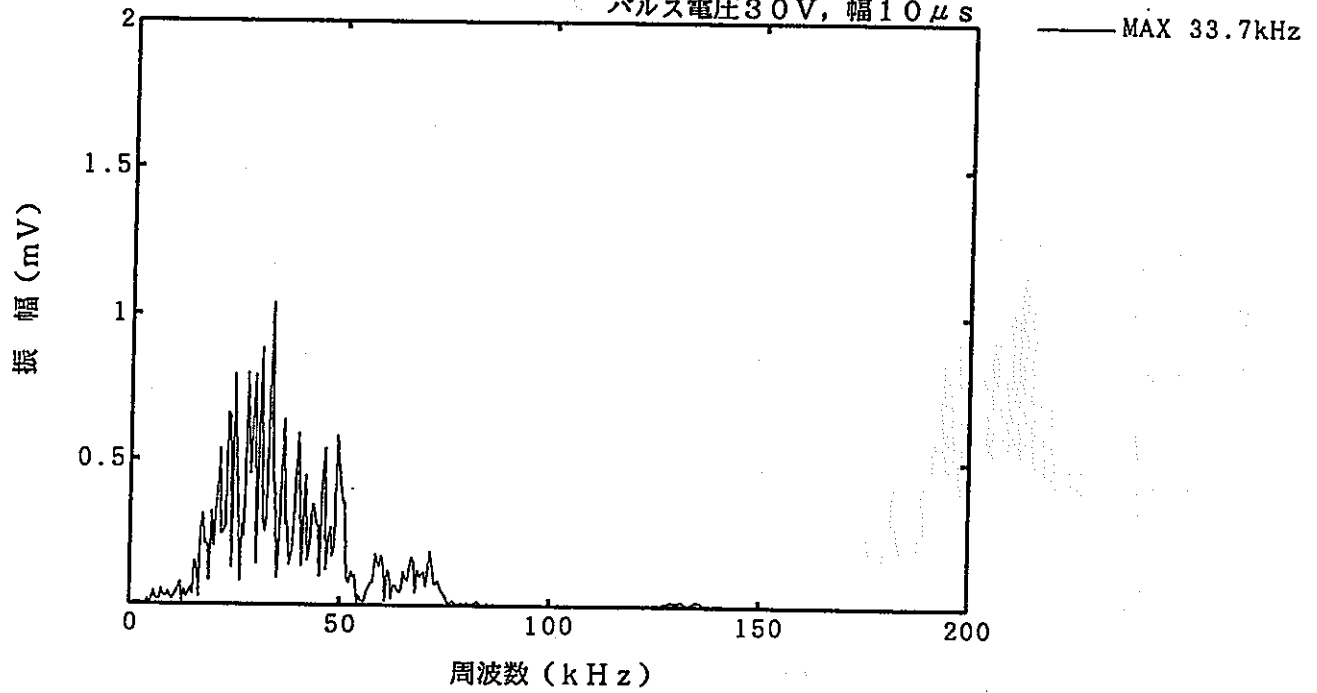
圧電素子2個（中央固定） 側壁発振（中央，中央+5cm） 受振距離1m
パルス電圧30V，幅10 μ s



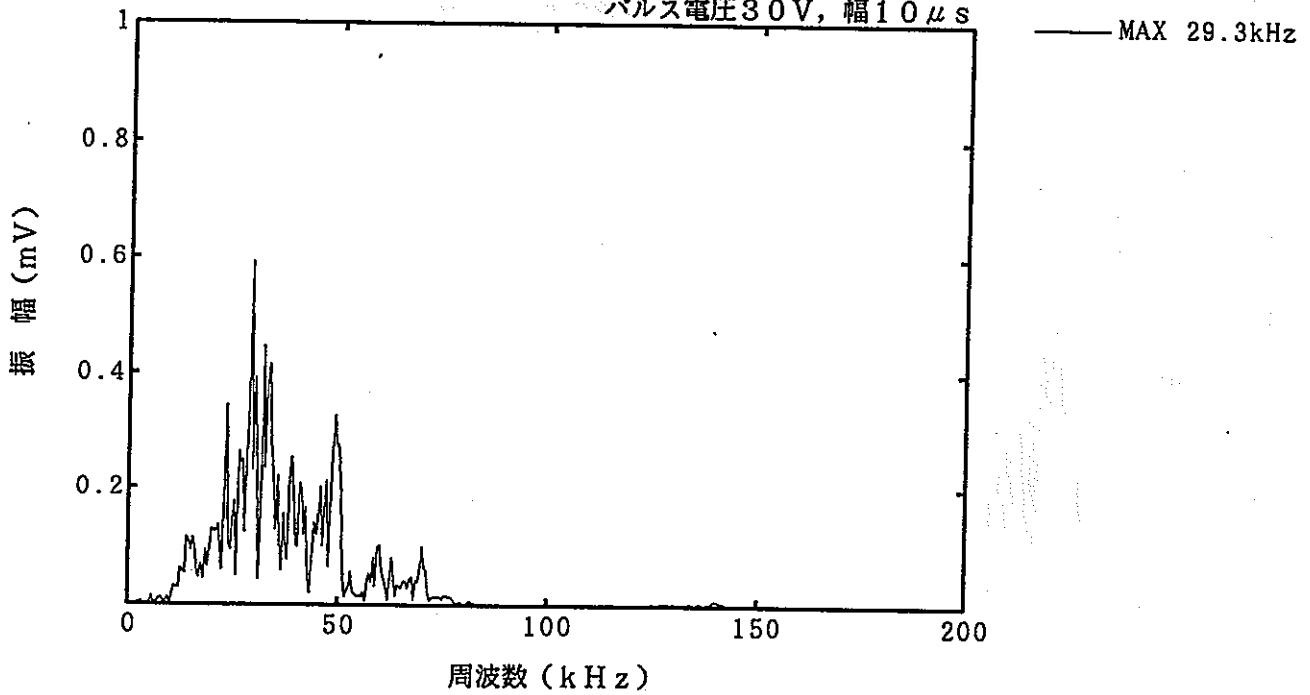
圧電素子1個（中央固定） 側壁発振（中央+5cm） 受振距離1m
パルス電圧30V，幅10 μ s

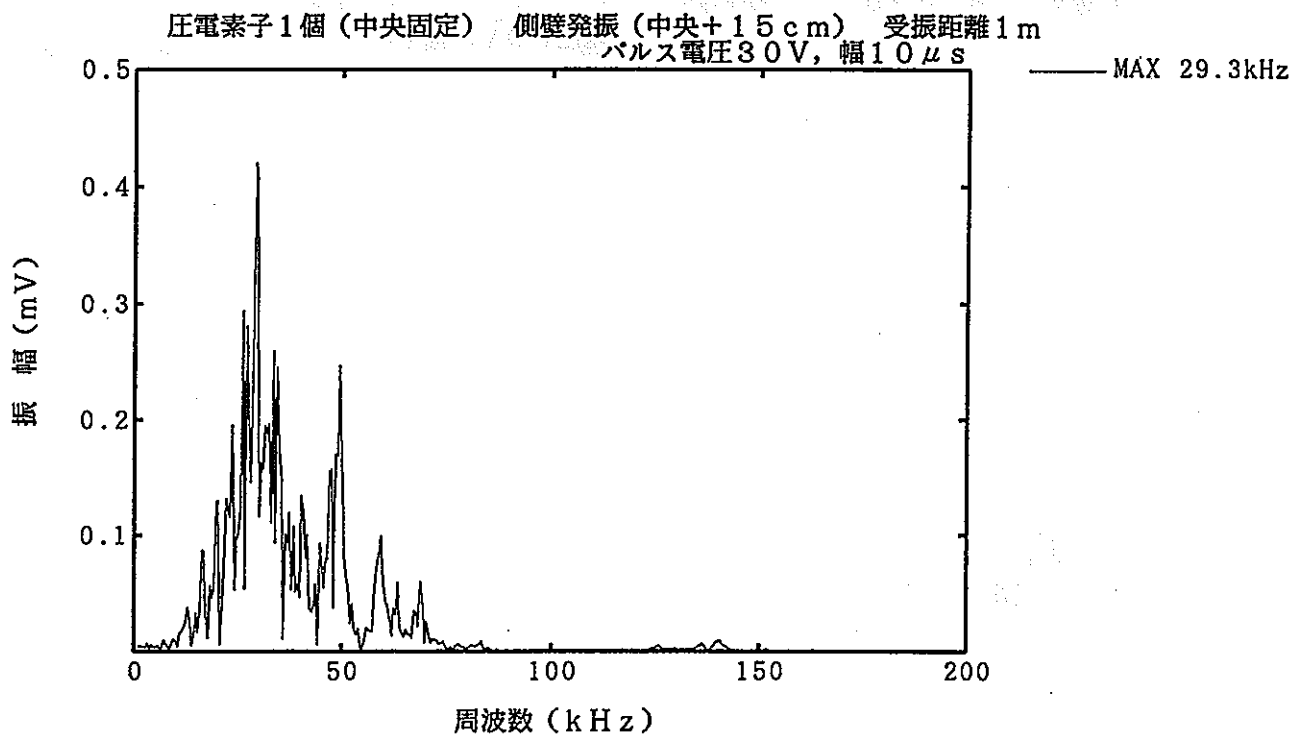
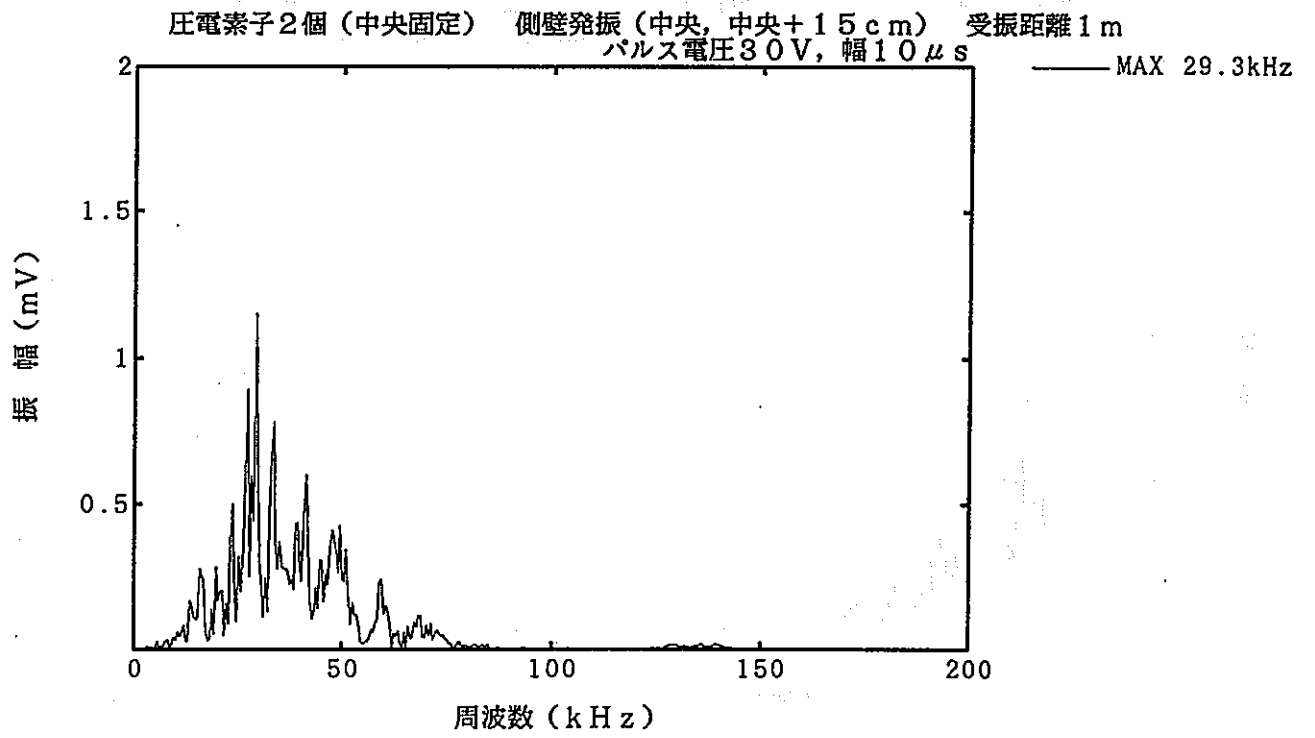


圧電素子2個(中央固定) 側壁発振(中央, 中央+10cm) 受振距離1m
パルス電圧30V, 幅10 μ s

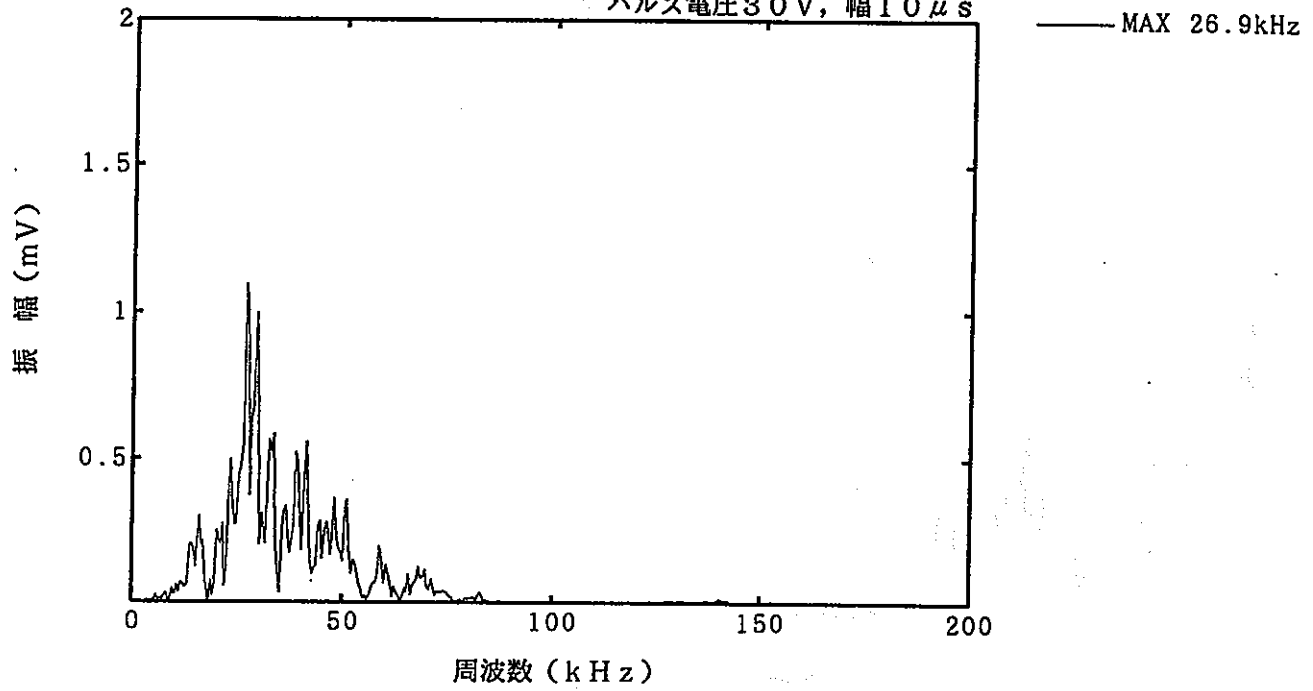


圧電素子1個(中央固定) 側壁発振(中央+10cm) 受振距離1m
パルス電圧30V, 幅10 μ s

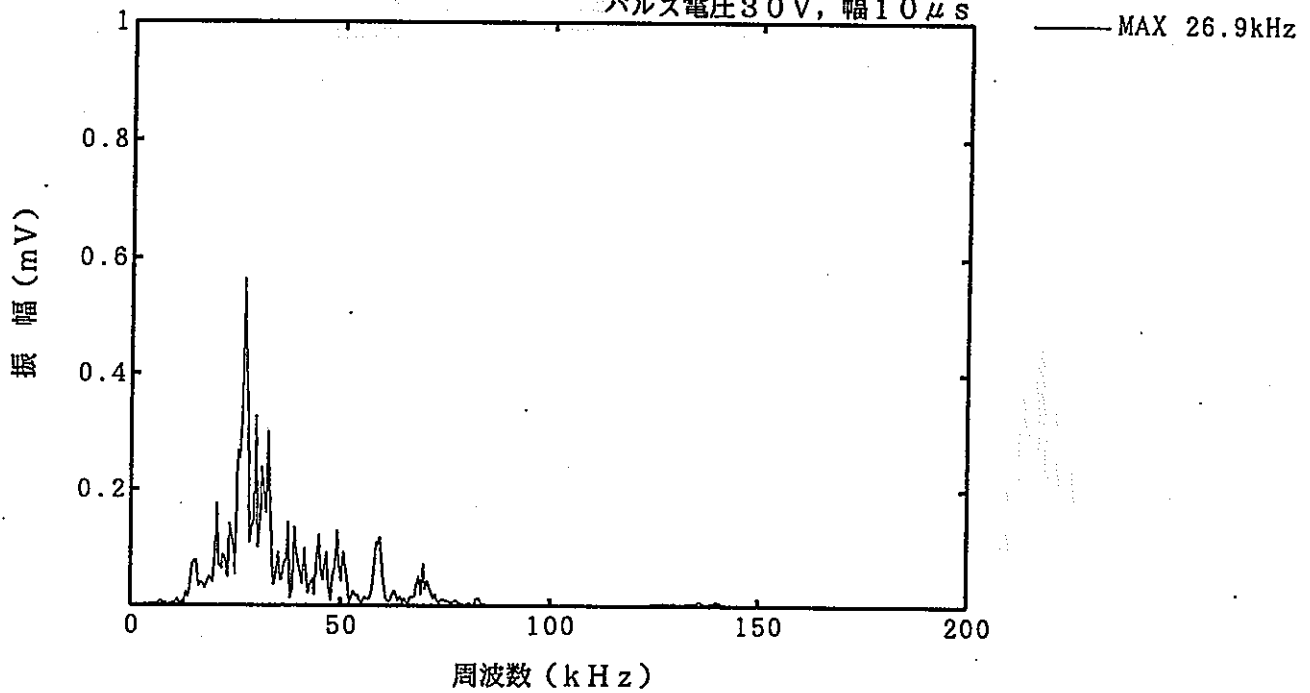


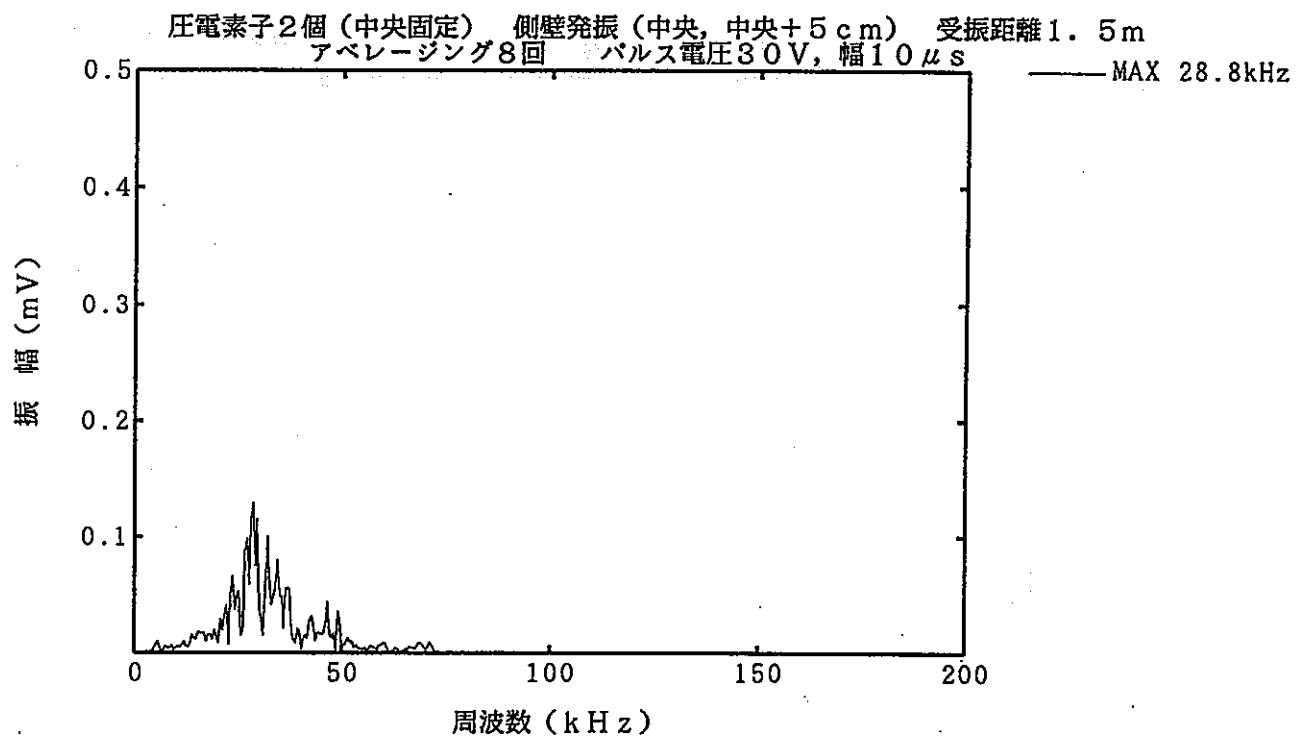
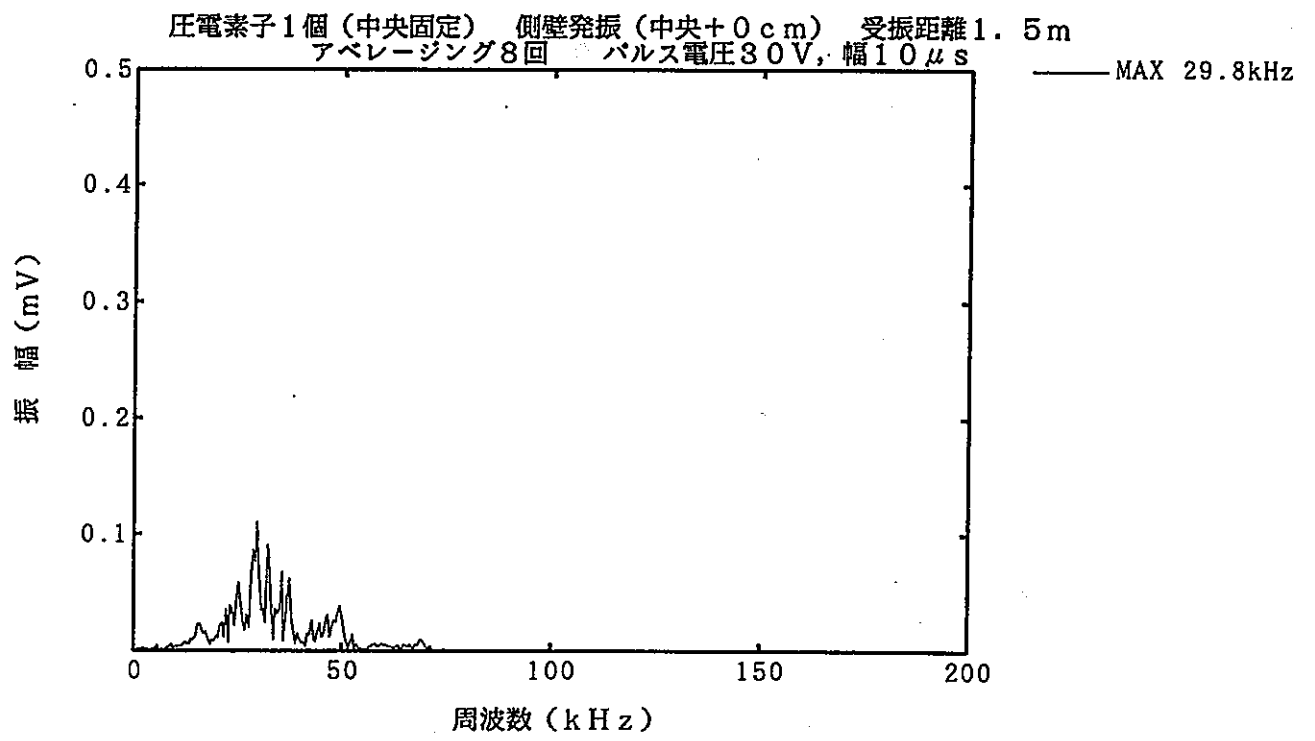


圧電素子2個（中央固定） 側壁発振（中央, 中央+20cm） 受振距離1m
パルス電圧30V, 幅10 μ s

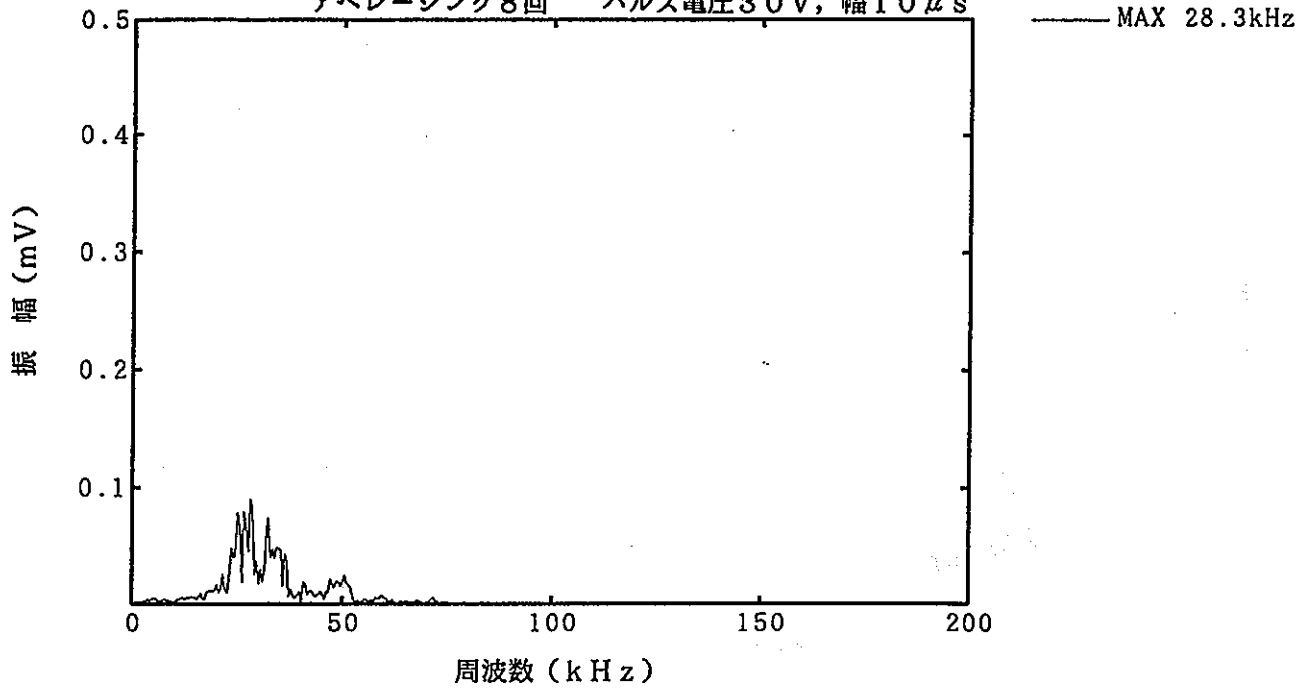


圧電素子1個（中央固定） 側壁発振（中央+20cm） 受振距離1m
パルス電圧30V, 幅10 μ s

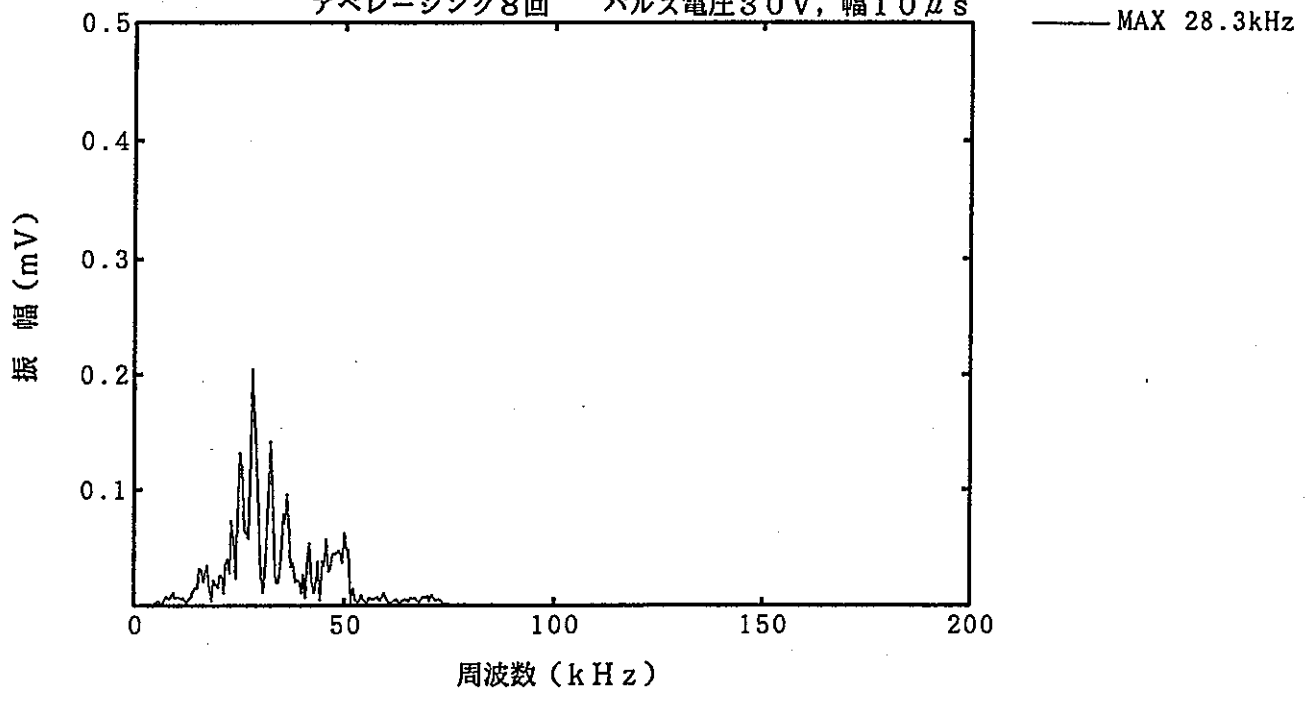


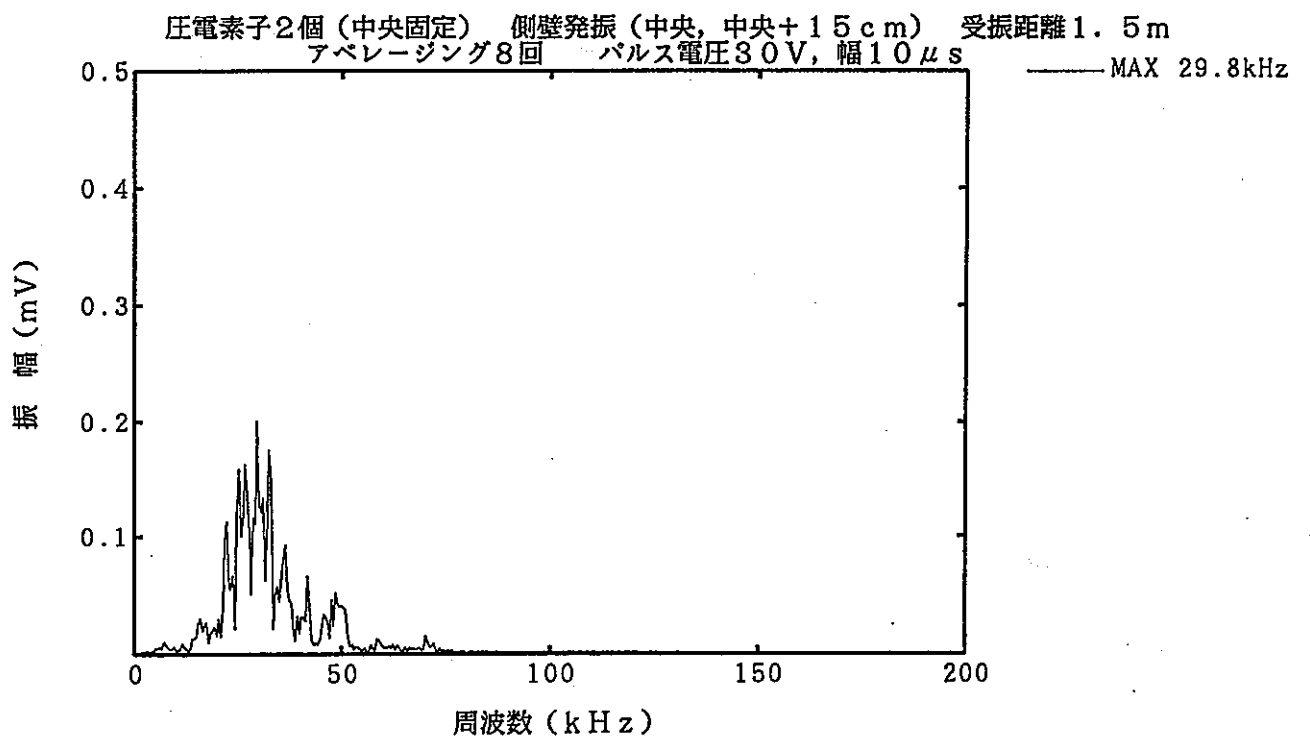
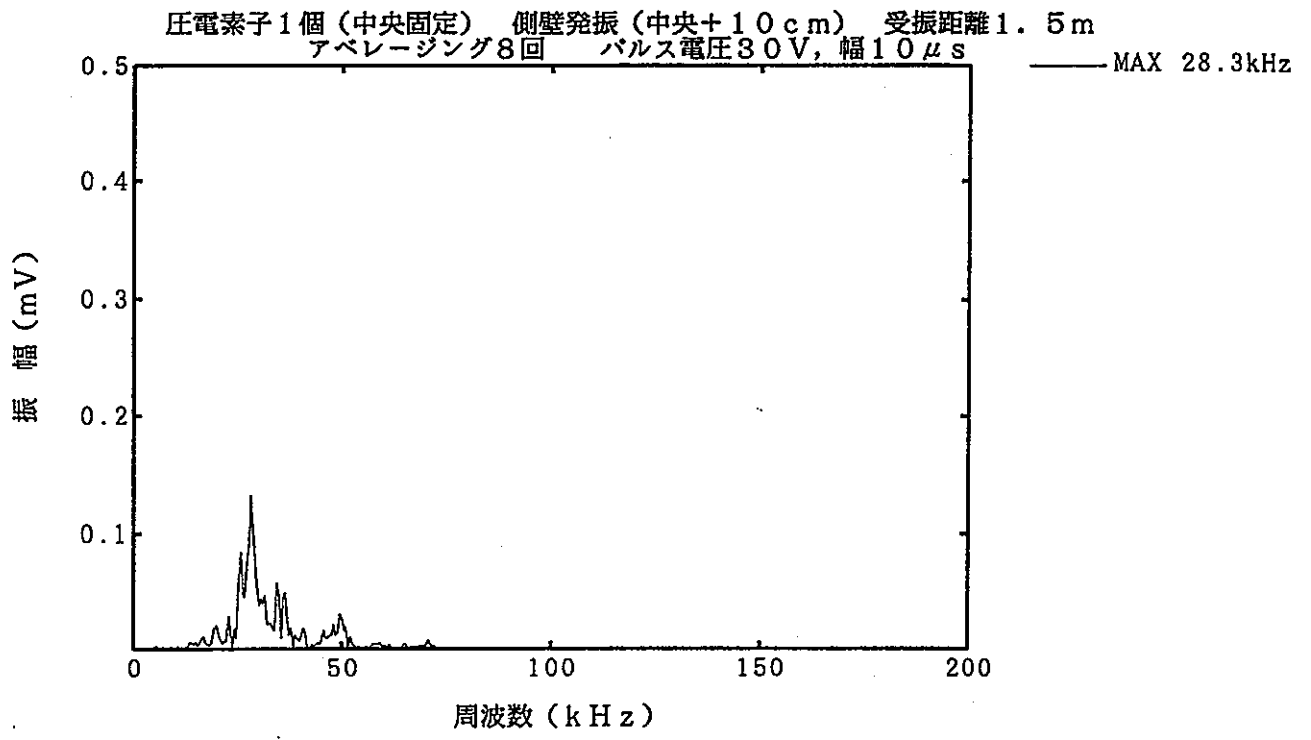


圧電素子1個(中央固定) 側壁発振(中央+5cm) 受振距離1.5m
アベレーシング8回 パルス電圧30V, 幅10 μ s

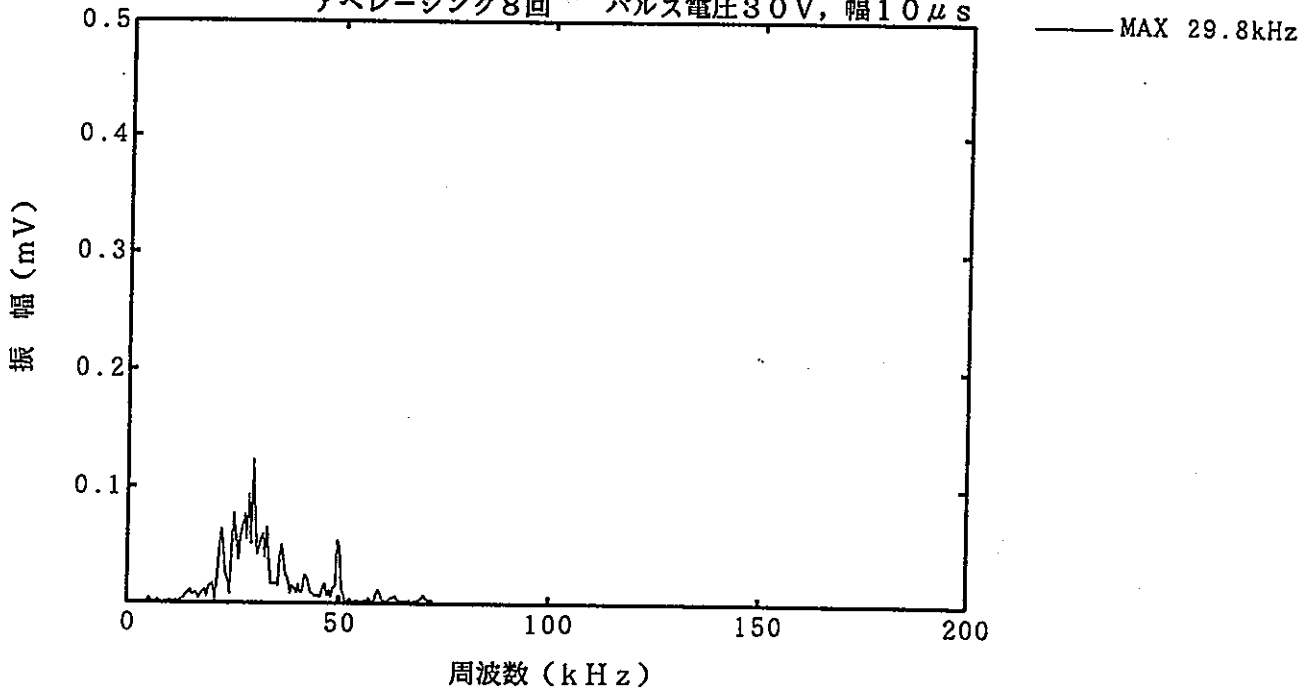


圧電素子2個(中央固定) 側壁発振(中央, 中央+10cm) 受振距離1.5m
アベレーシング8回 パルス電圧30V, 幅10 μ s

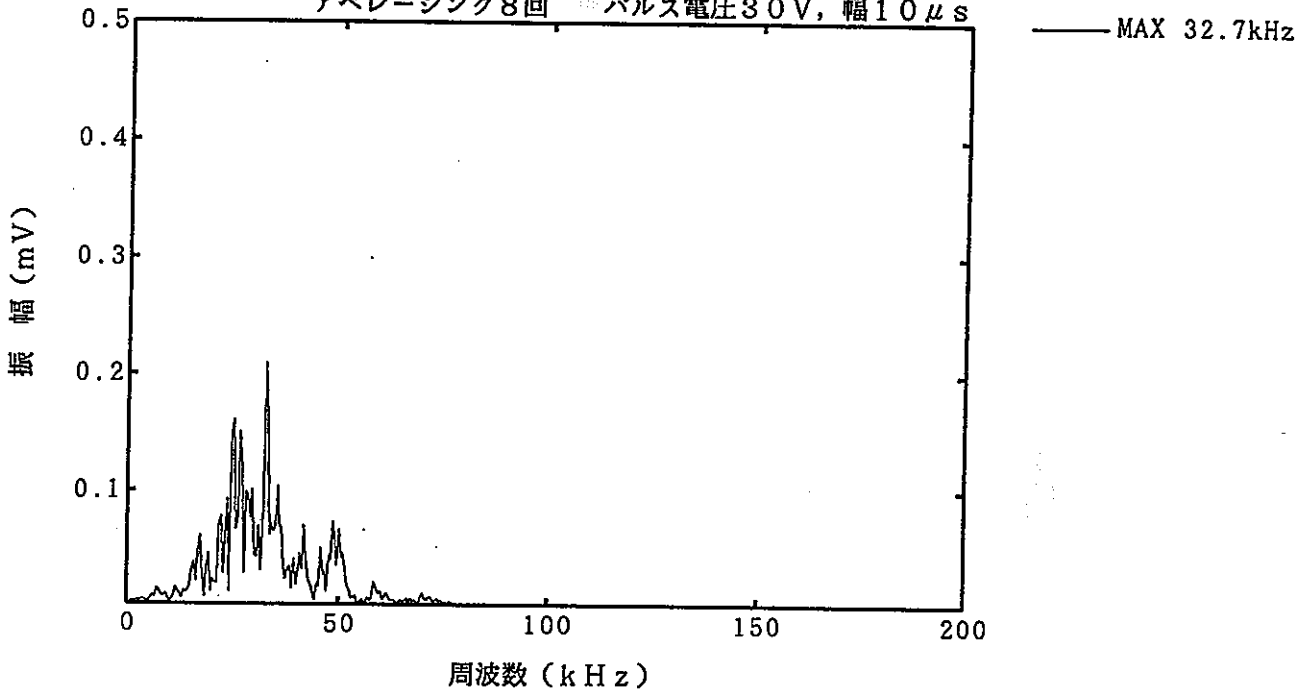




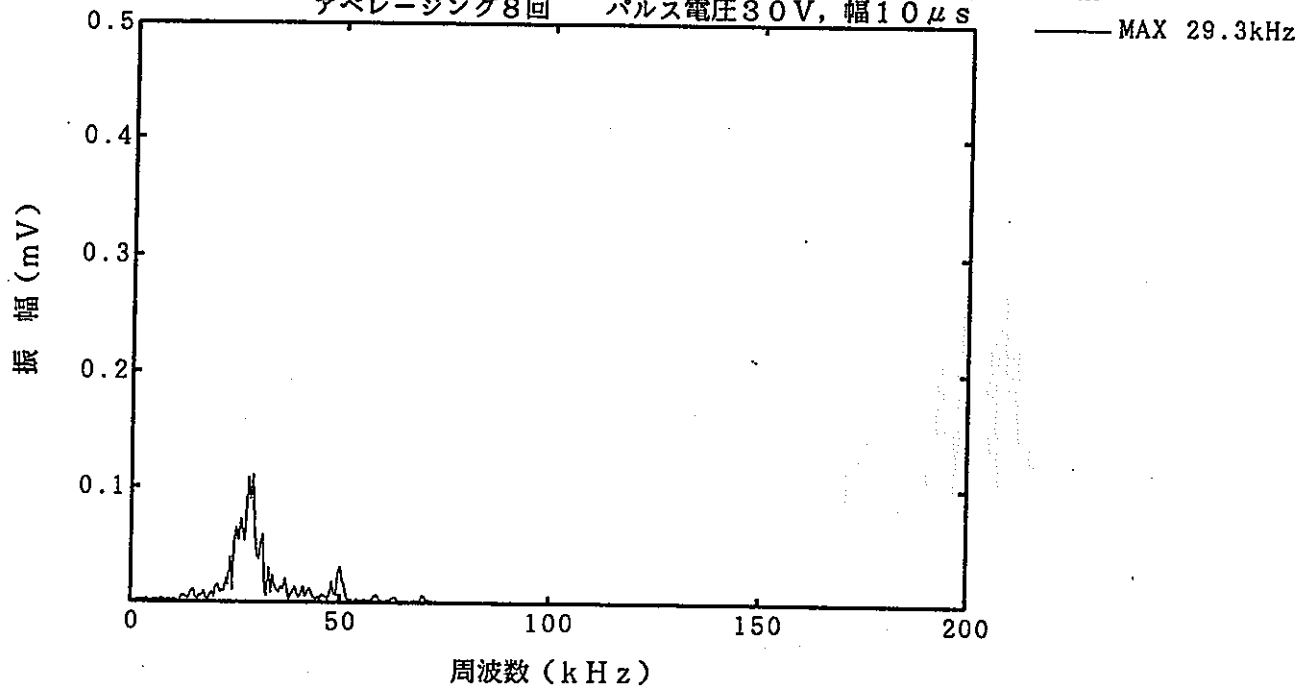
圧電素子1個(中央固定) 側壁発振(中央+15cm) 受振距離1.5m
アベレーシング8回 パルス電圧30V, 幅10 μ s

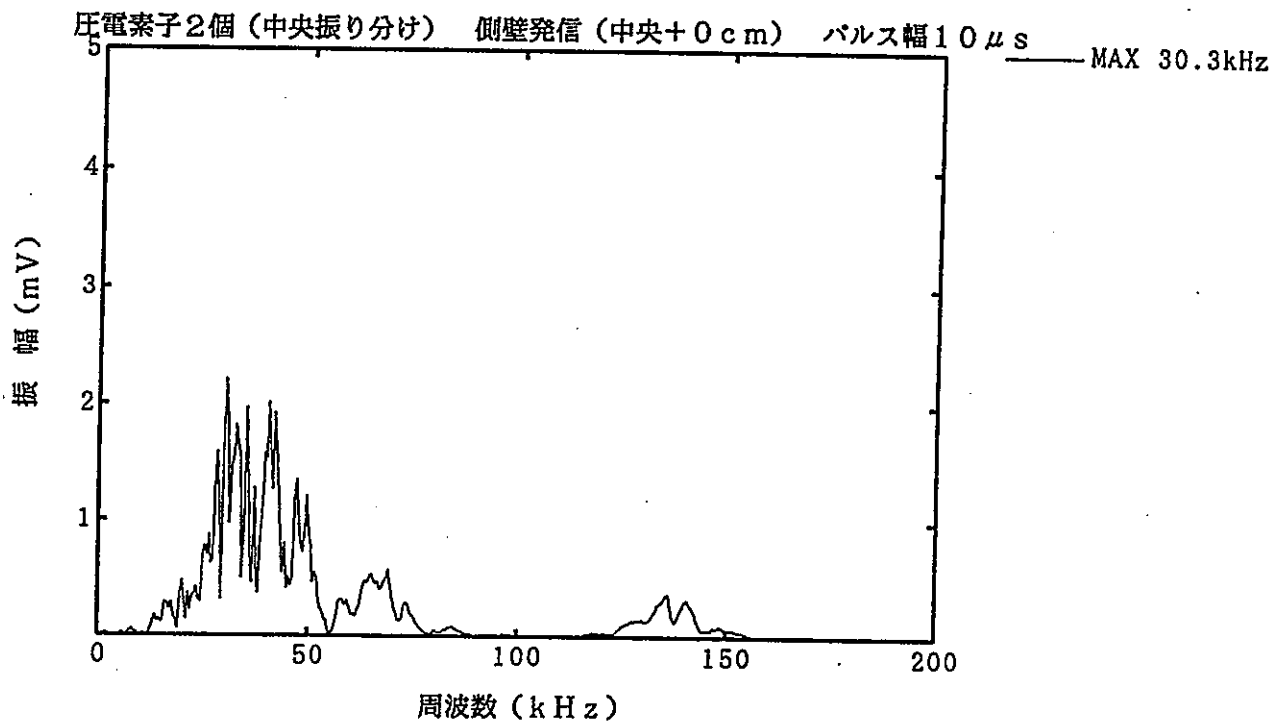
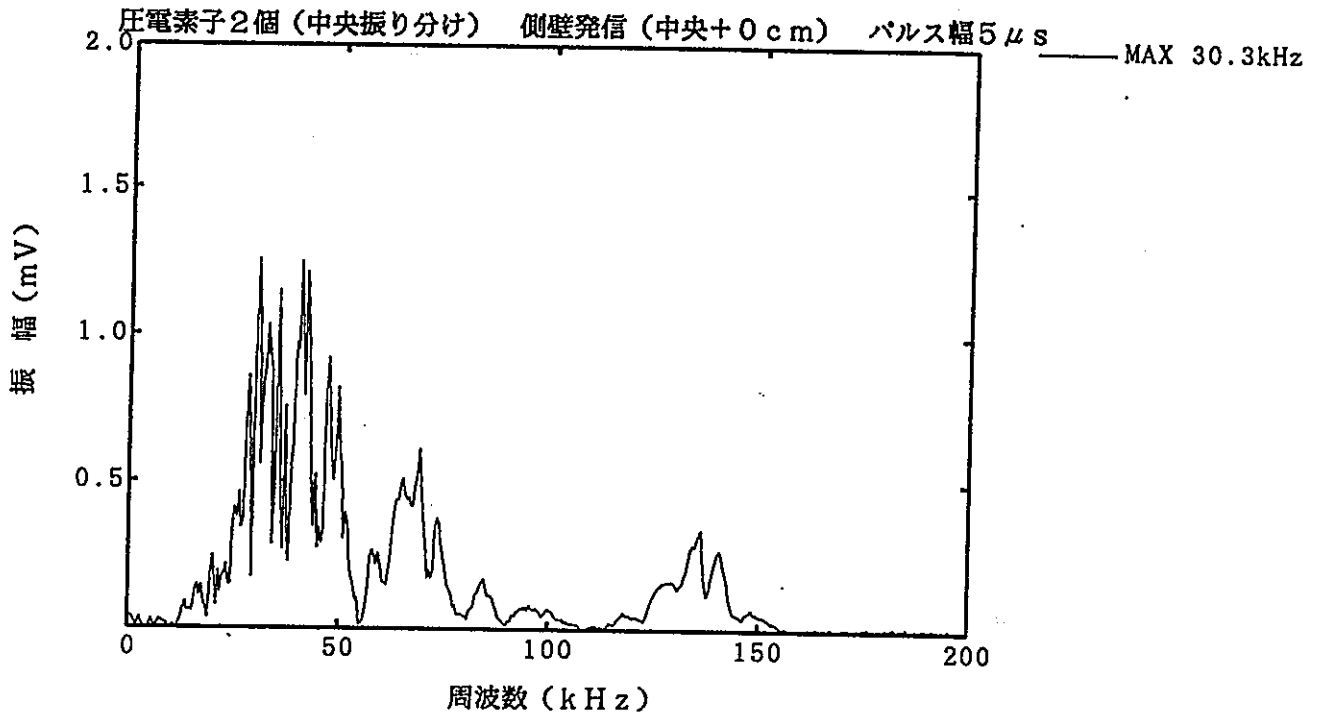


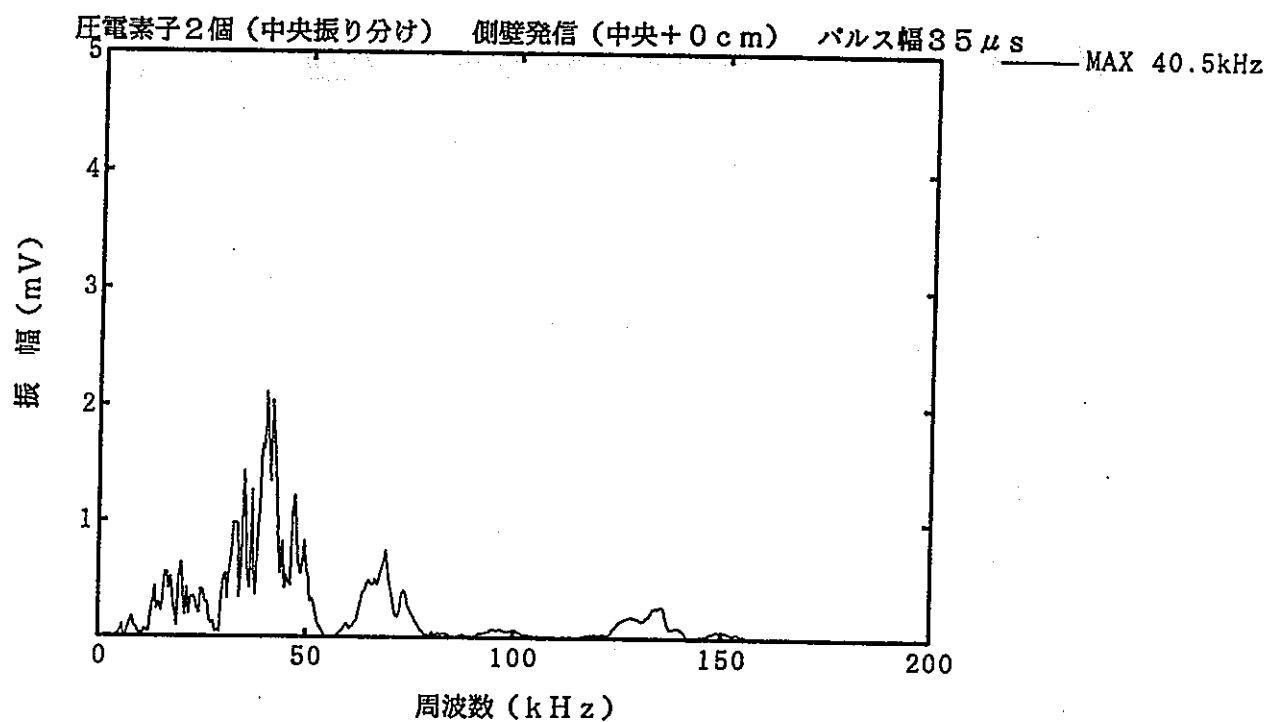
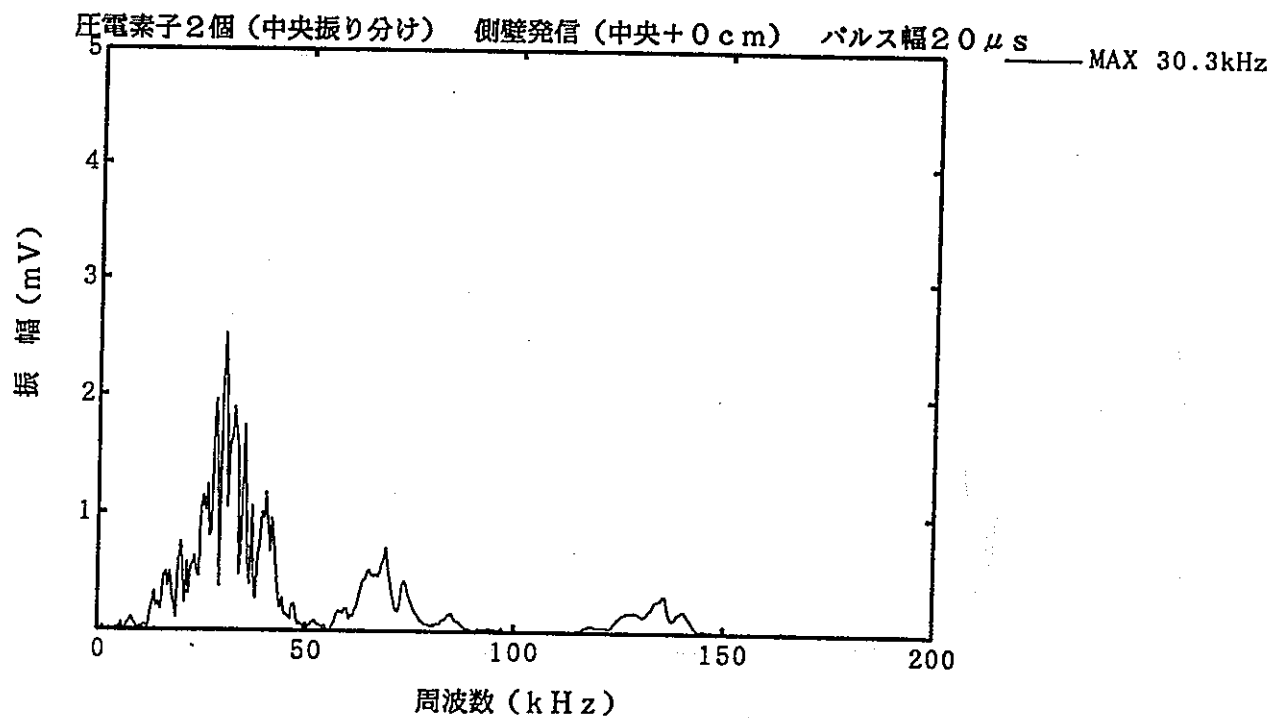
圧電素子2個(中央固定) 側壁発振(中央, 中央+20cm) 受振距離1.5m
アベレーシング8回 パルス電圧30V, 幅10 μ s



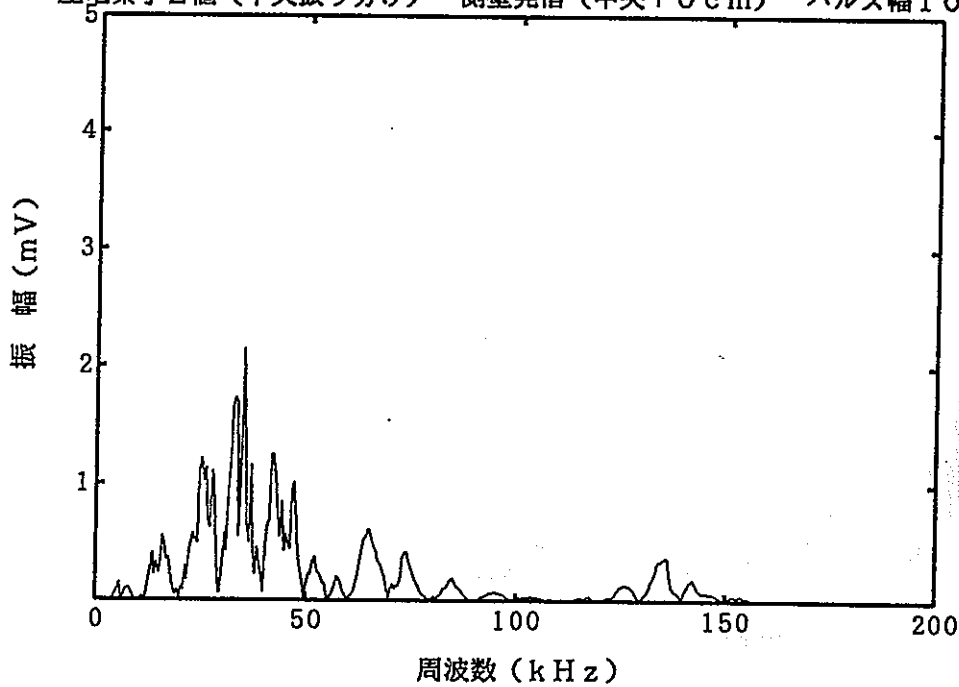
圧電素子1個(中央固定) 側壁発振(中央+20cm) 受振距離1.5m
アベレージング8回 パルス電圧30V, 幅10 μ s



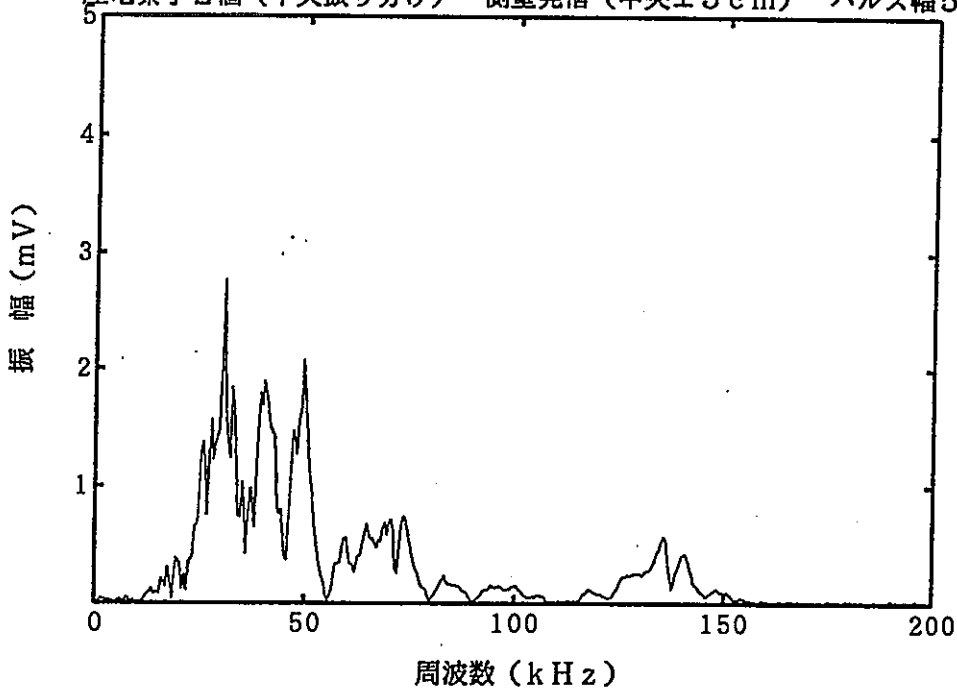


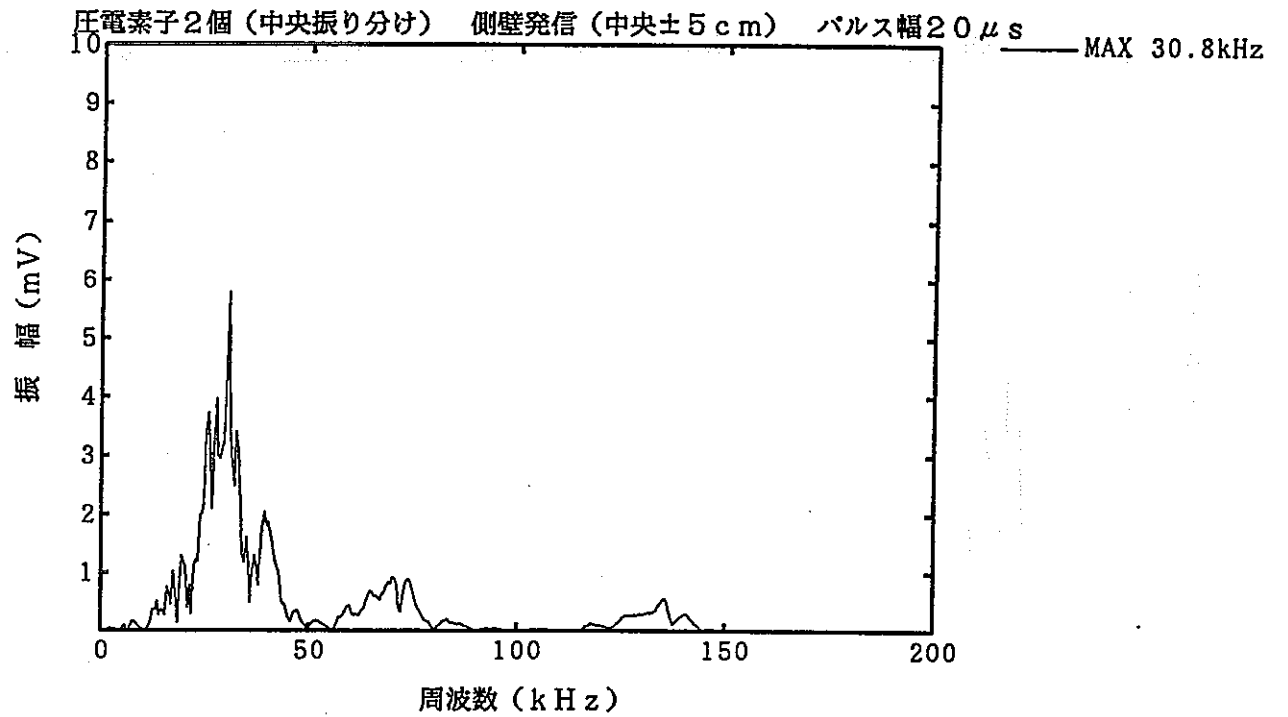
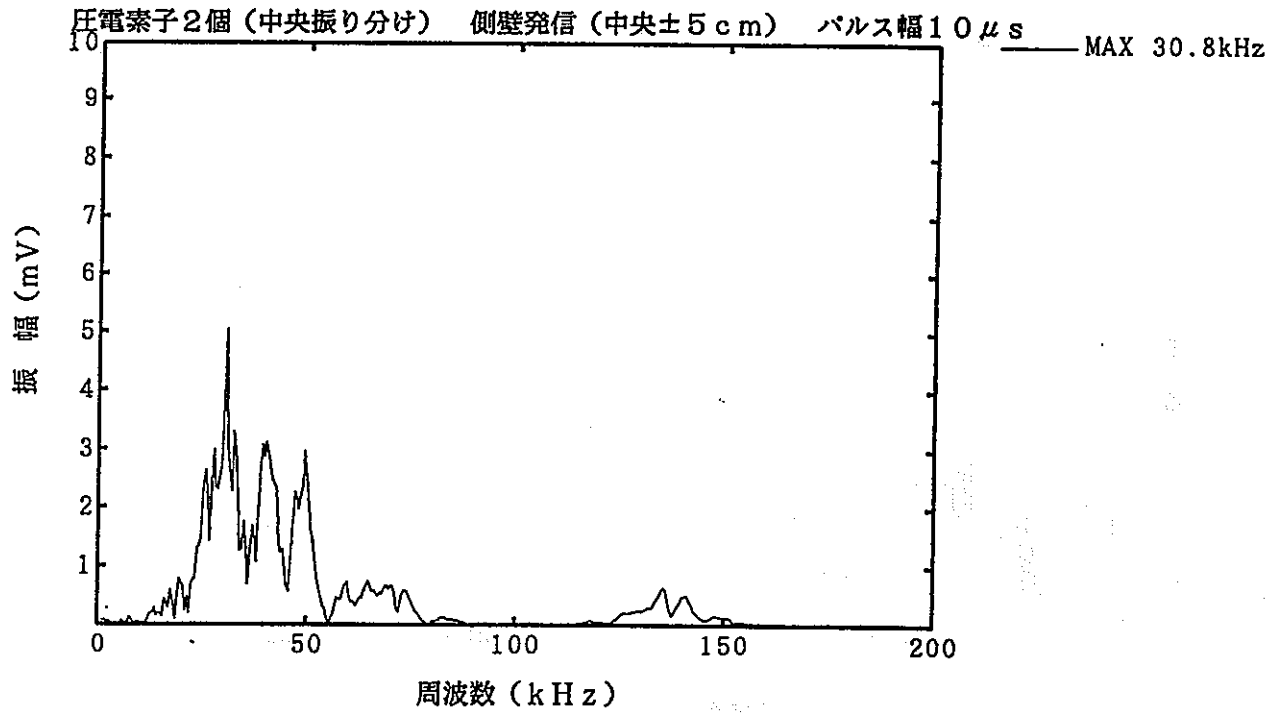


圧電素子2個 (中央振り分け) 側壁発信 (中央+0 cm) パルス幅100 μ s MAX 35.2kHz

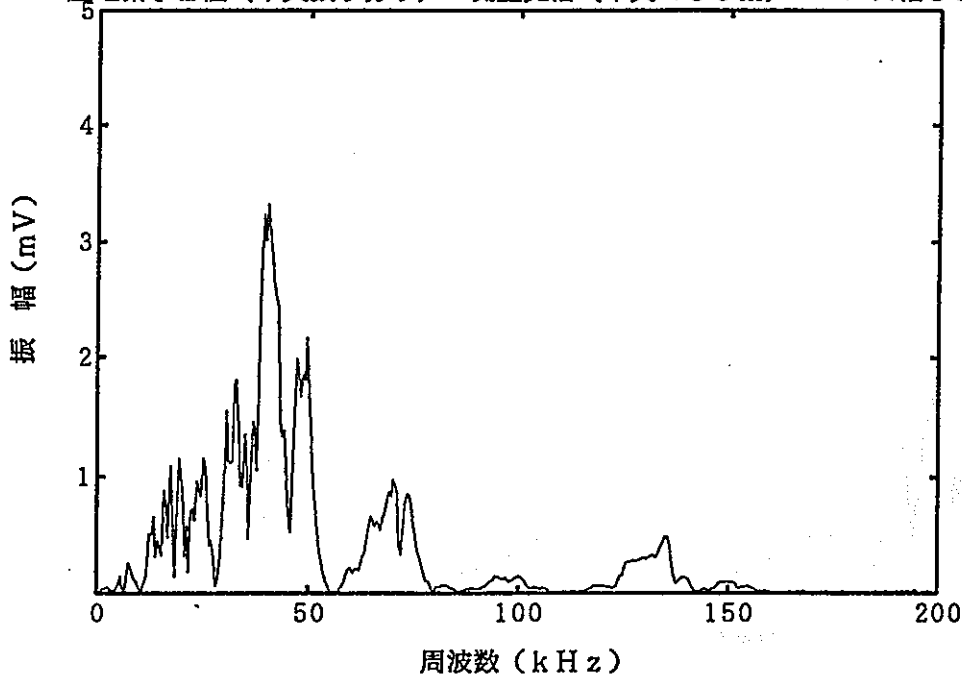


圧電素子2個 (中央振り分け) 側壁発信 (中央±5 cm) パルス幅5 μ s MAX 30.8kHz

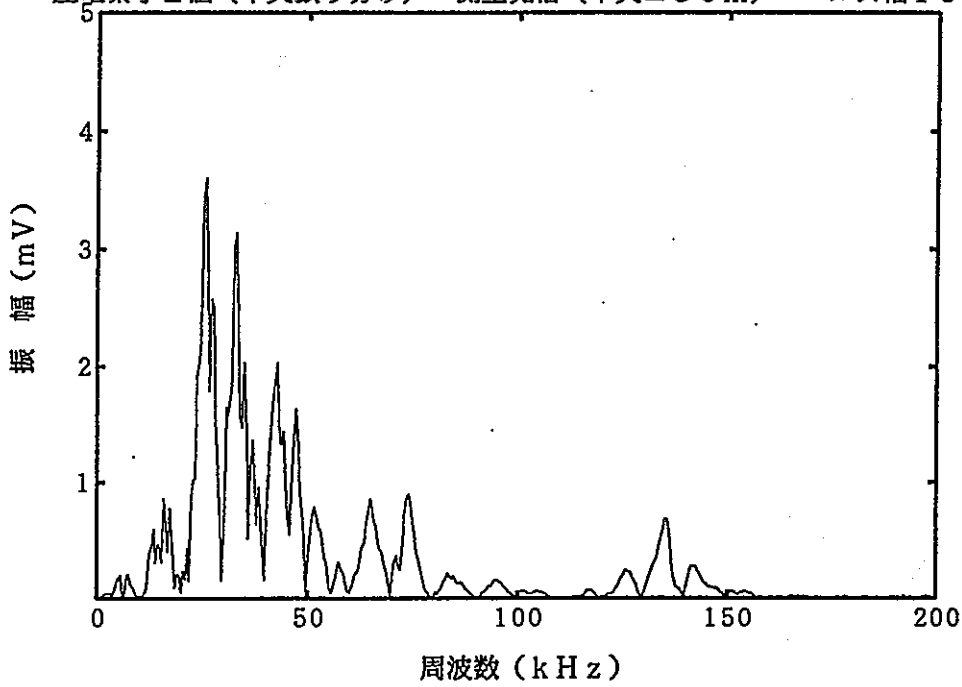


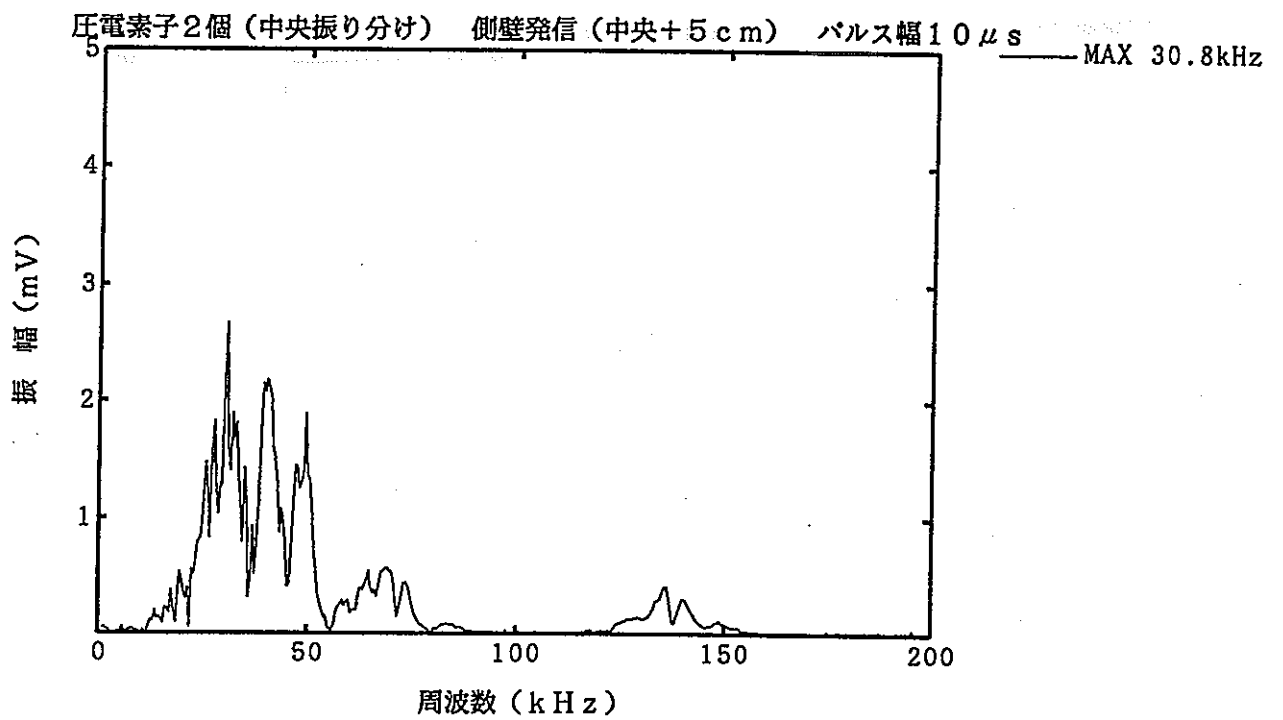
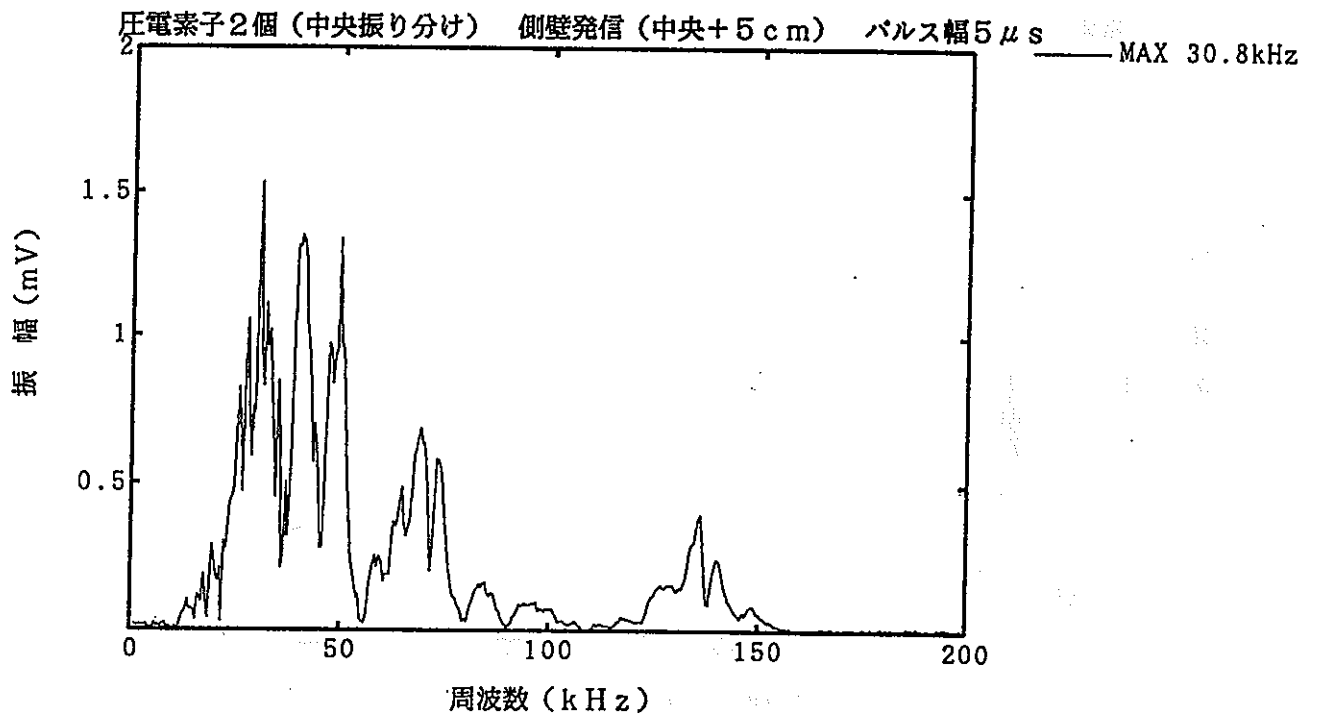


圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央±5cm） パルス幅35 μ s MAX 40.5kHz

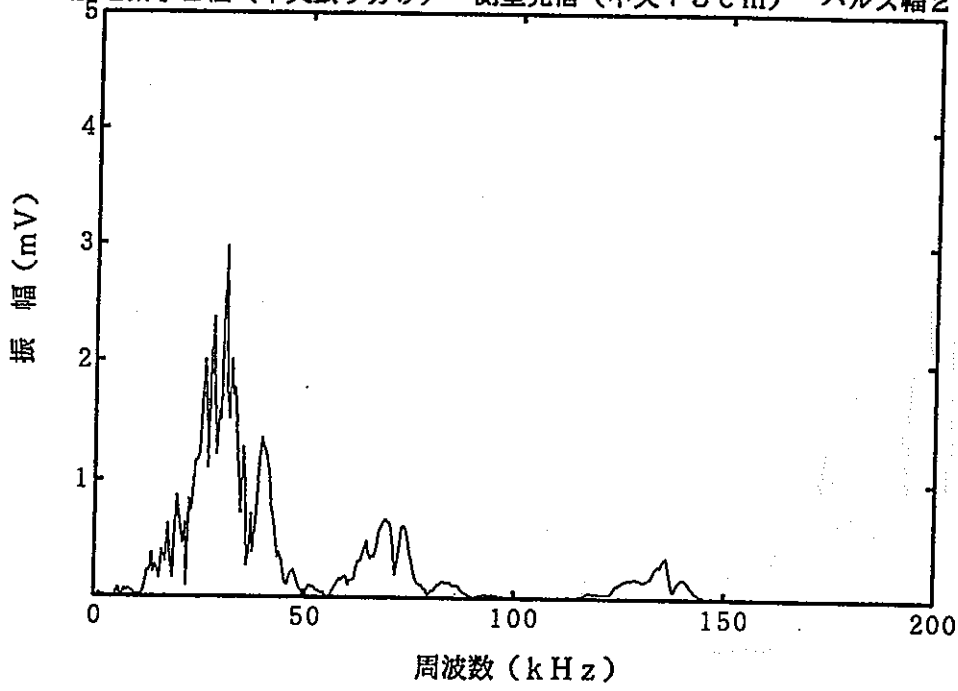


圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央±5cm） パルス幅100 μ s MAX 25.9kHz

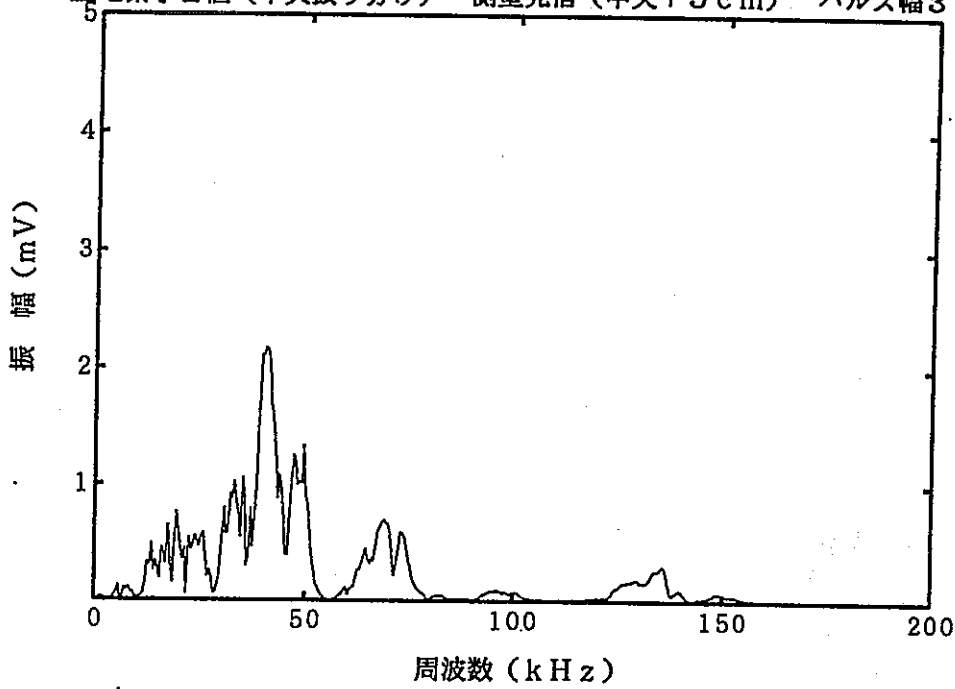


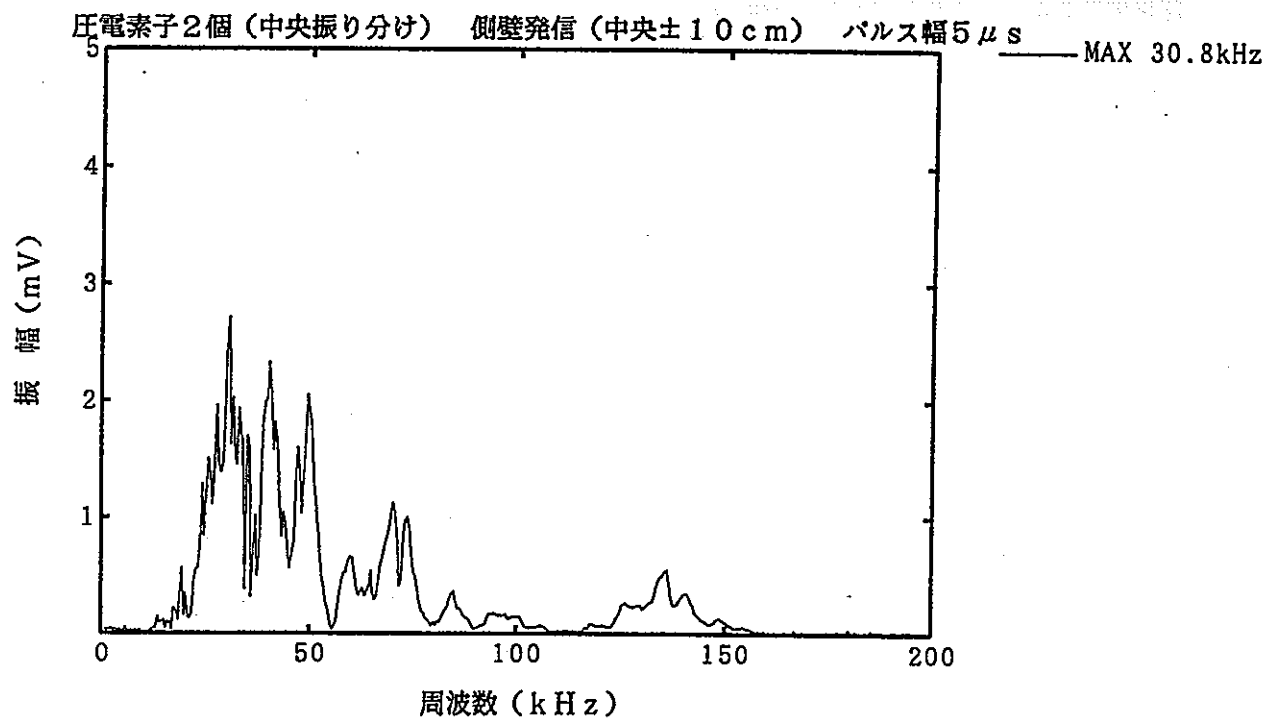
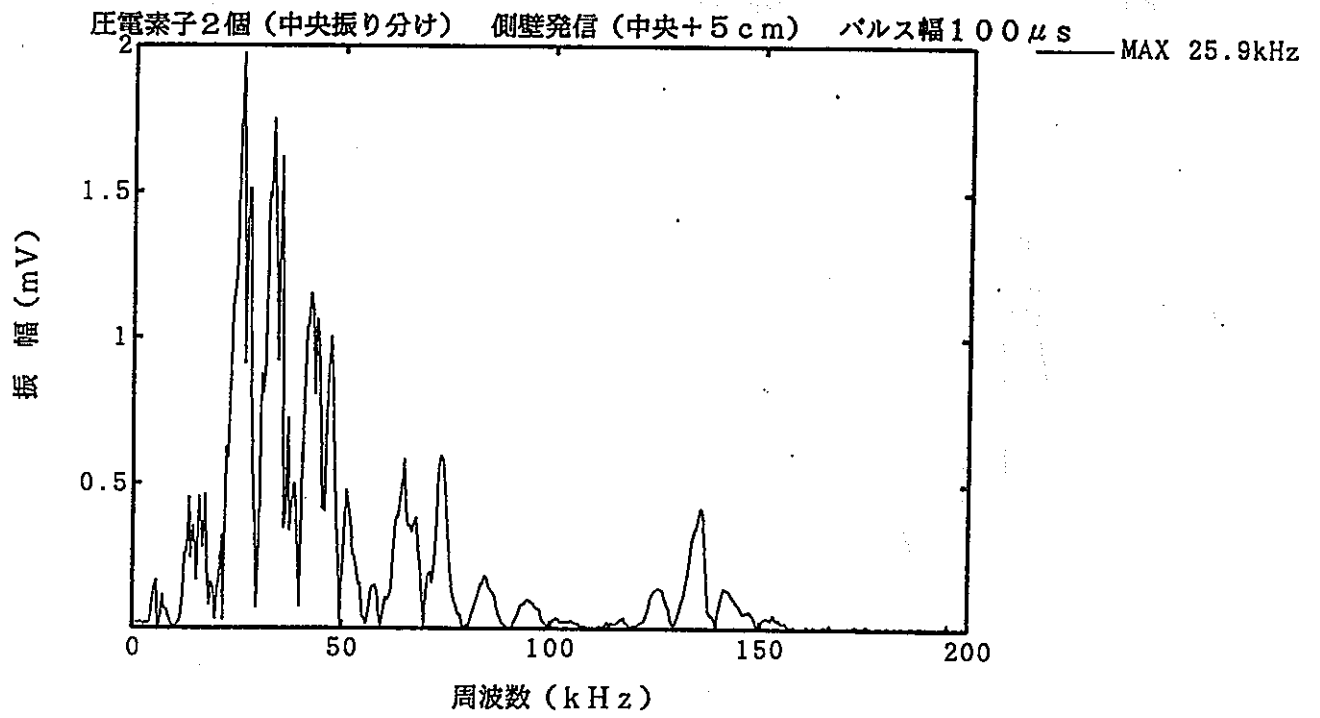


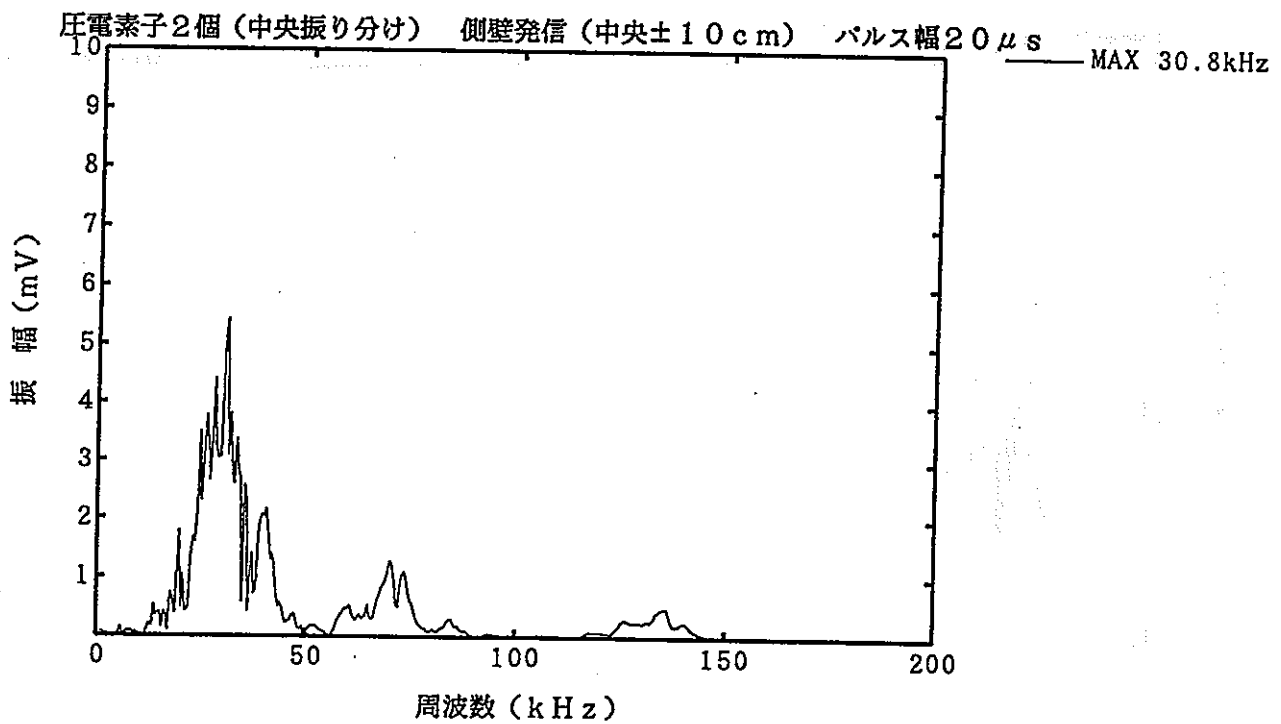
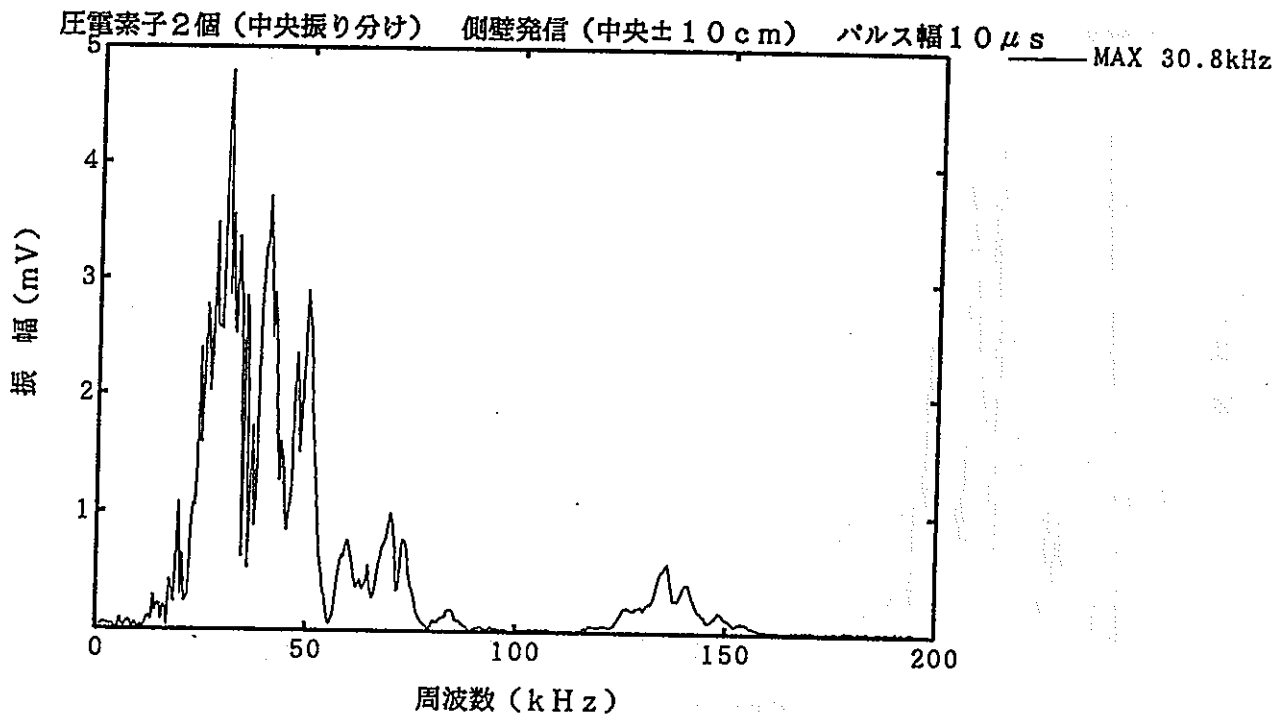
圧電素子2個 (中央振り分け) 側壁発信 (中央+5 cm) パルス幅20 μ s MAX 30.8kHz

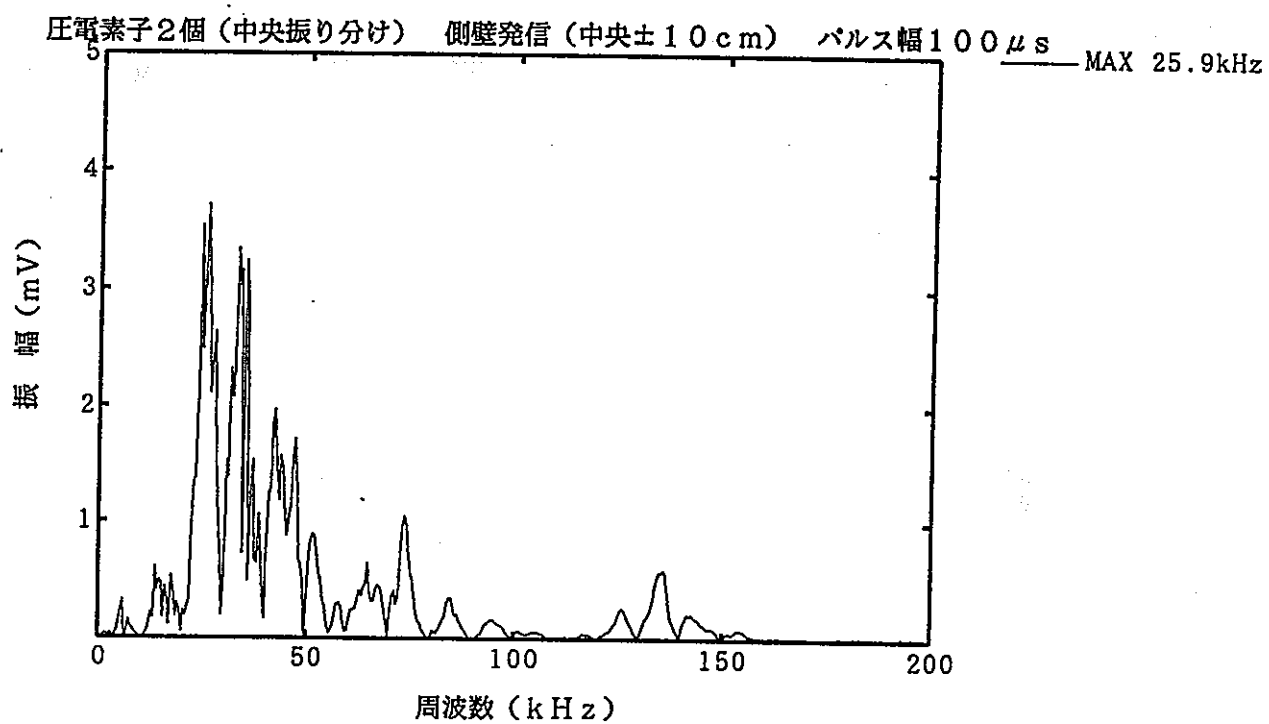
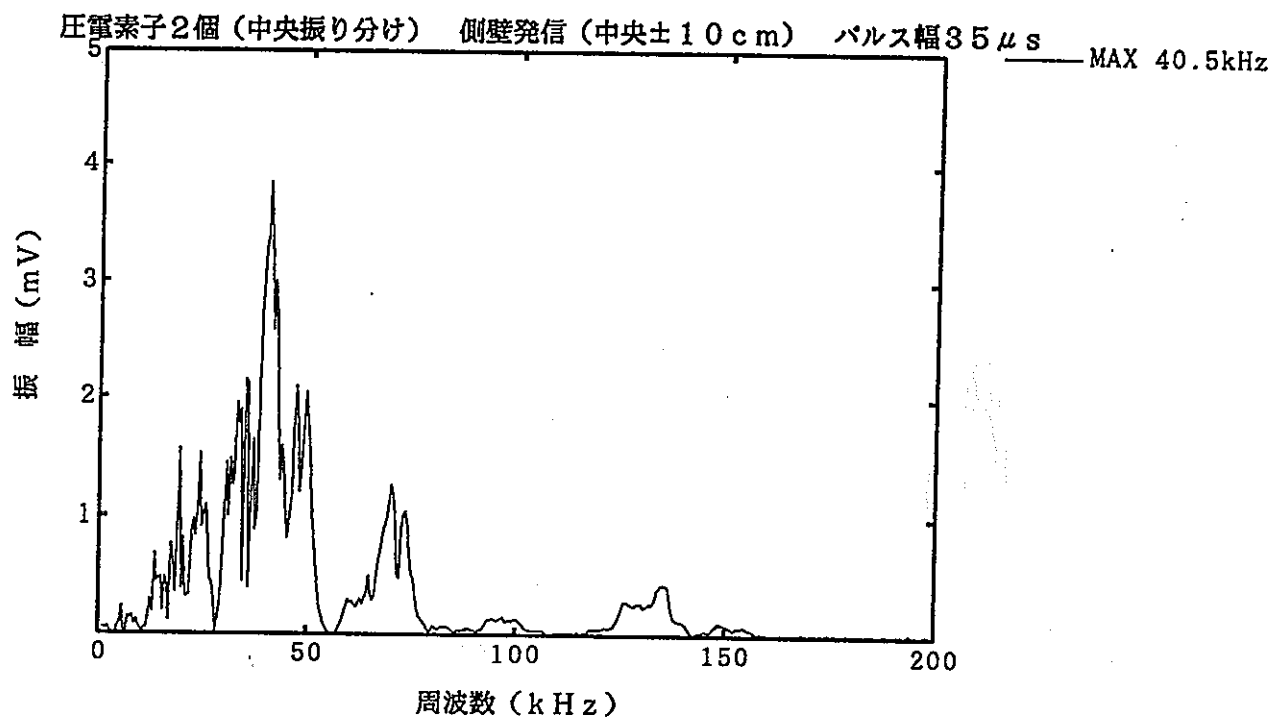


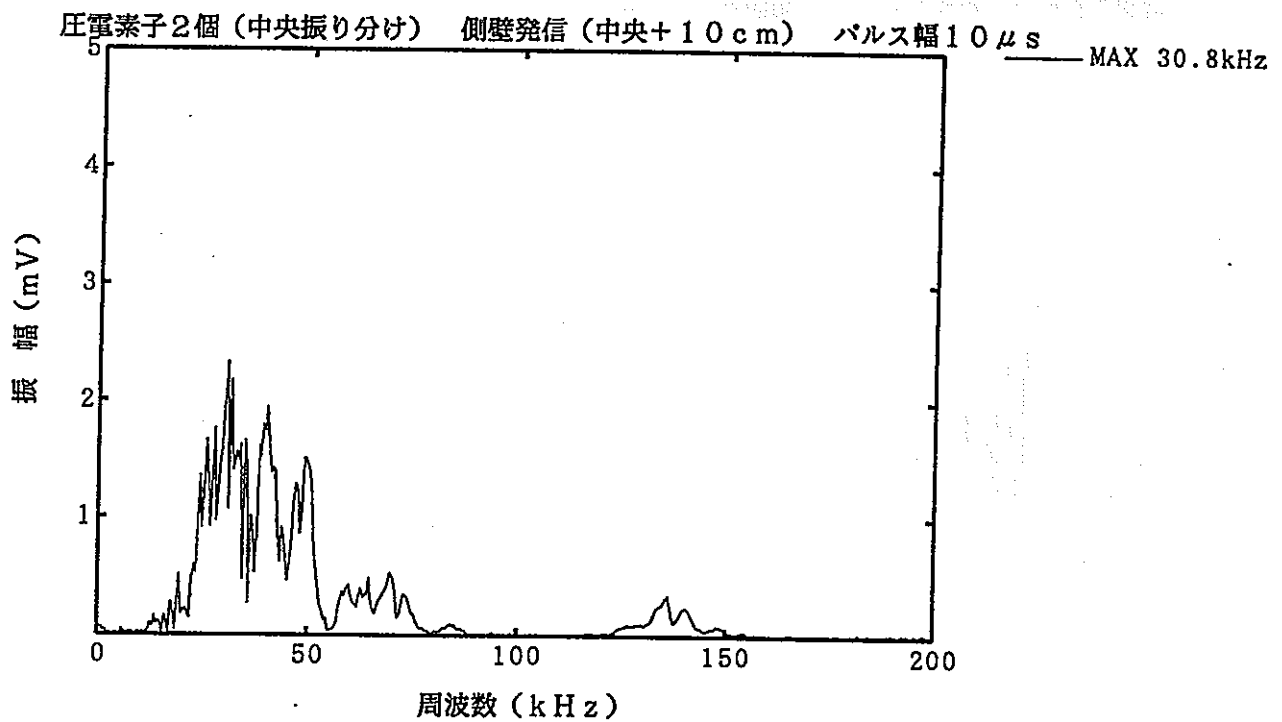
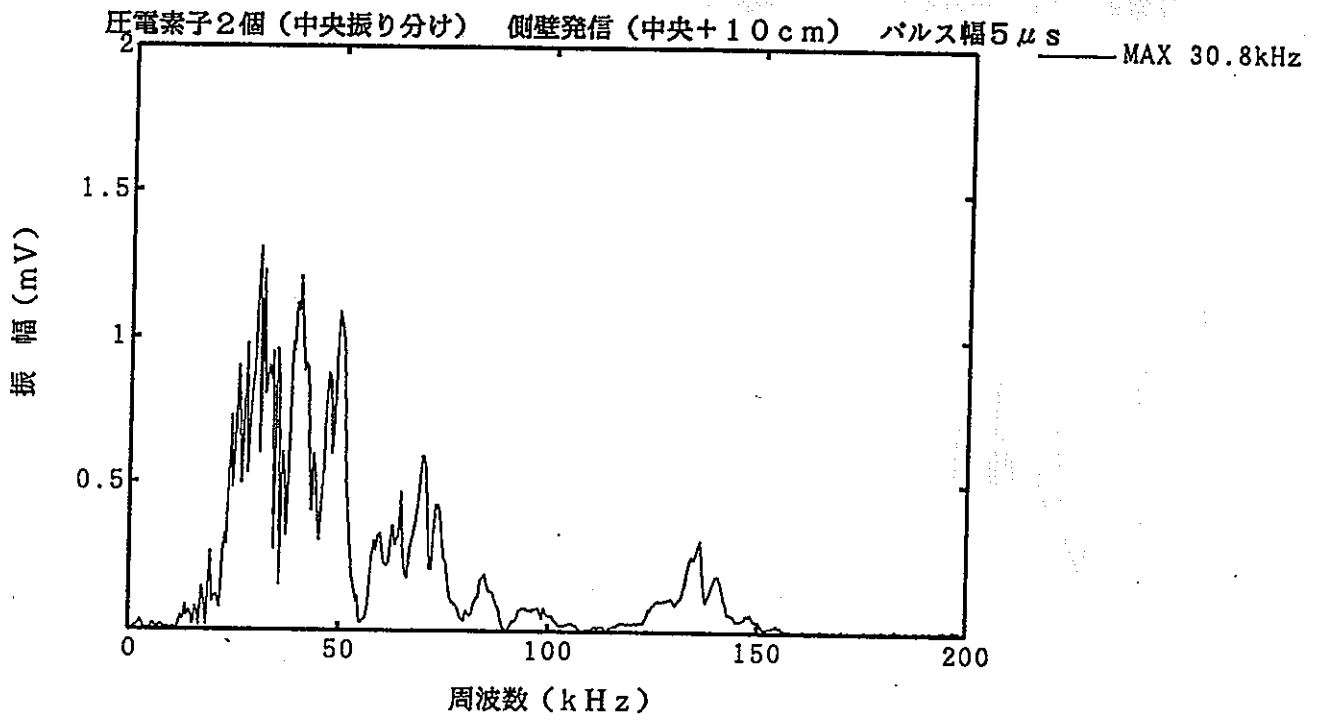
圧電素子2個 (中央振り分け) 側壁発信 (中央+5 cm) パルス幅35 μ s MAX 40.5kHz



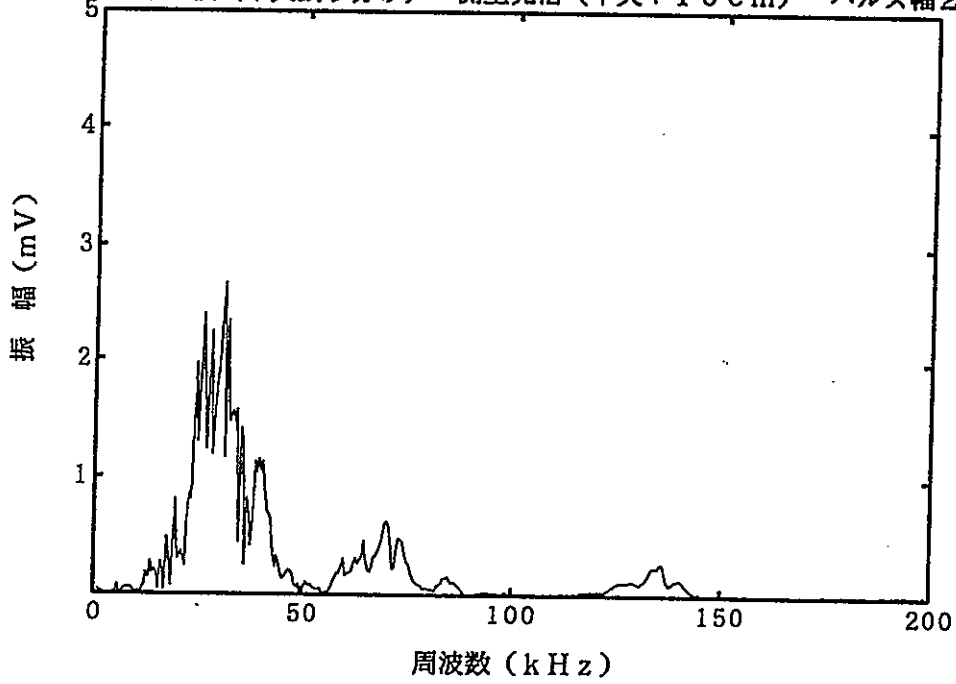




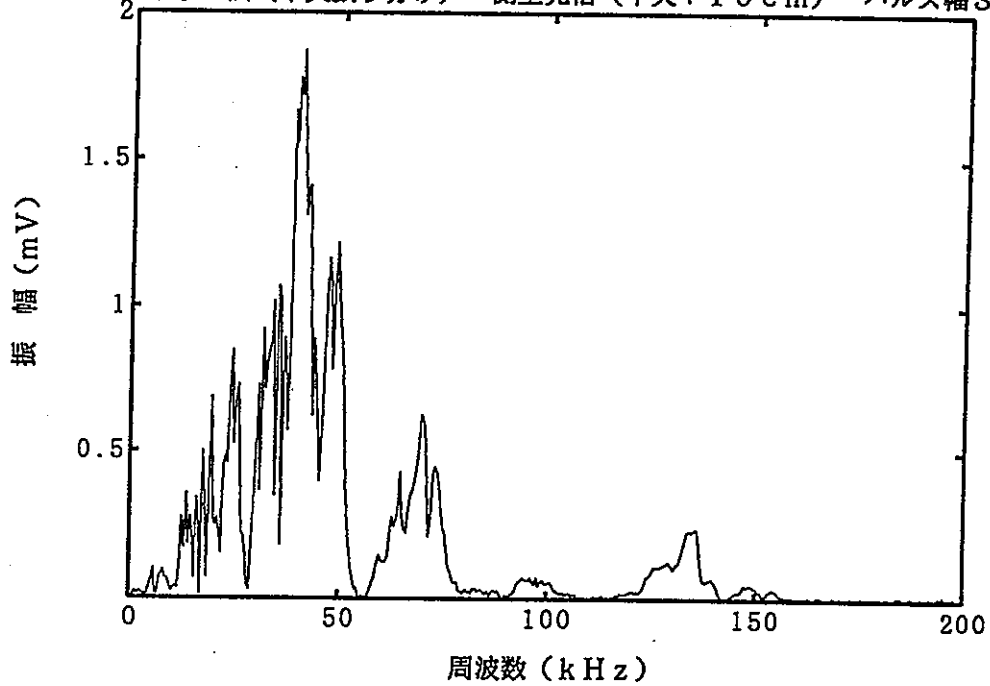




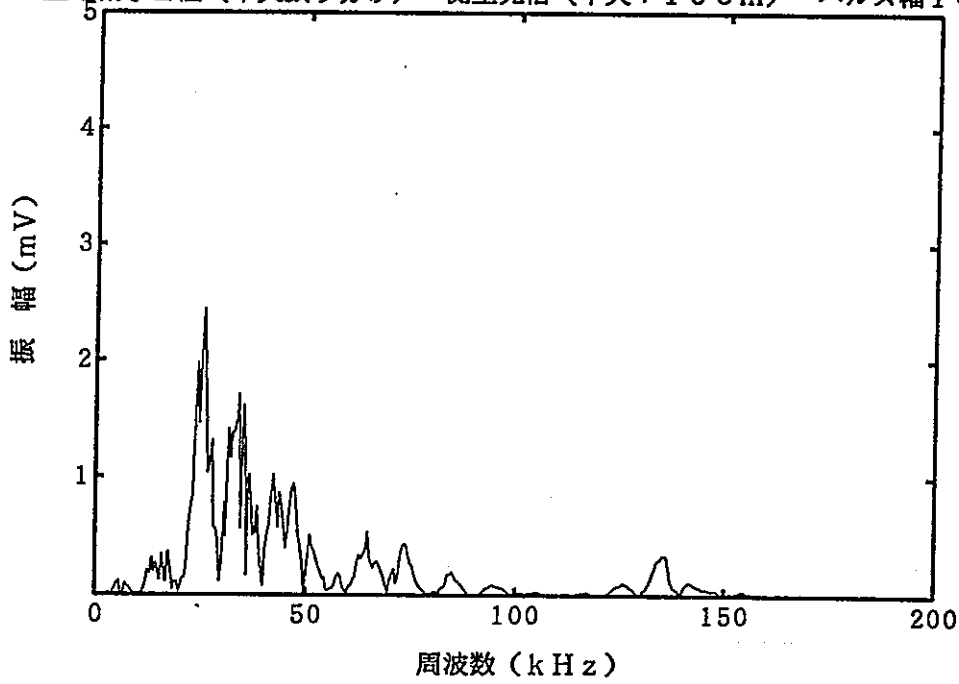
圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央+10cm） パルス幅20 μ s MAX 30.8kHz



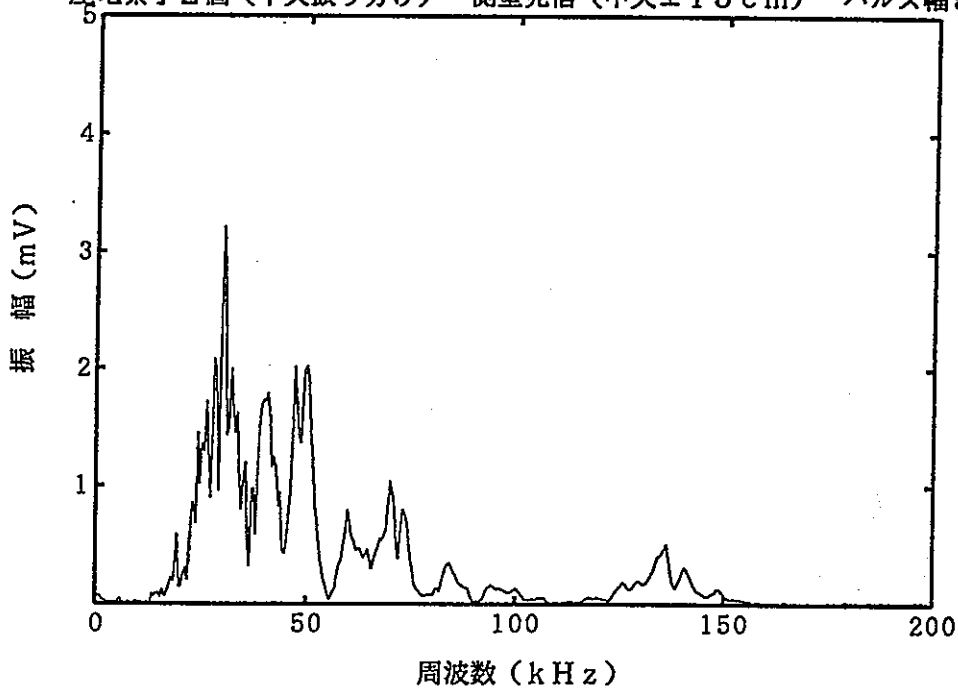
圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央+10cm） パルス幅35 μ s MAX 40.5kHz

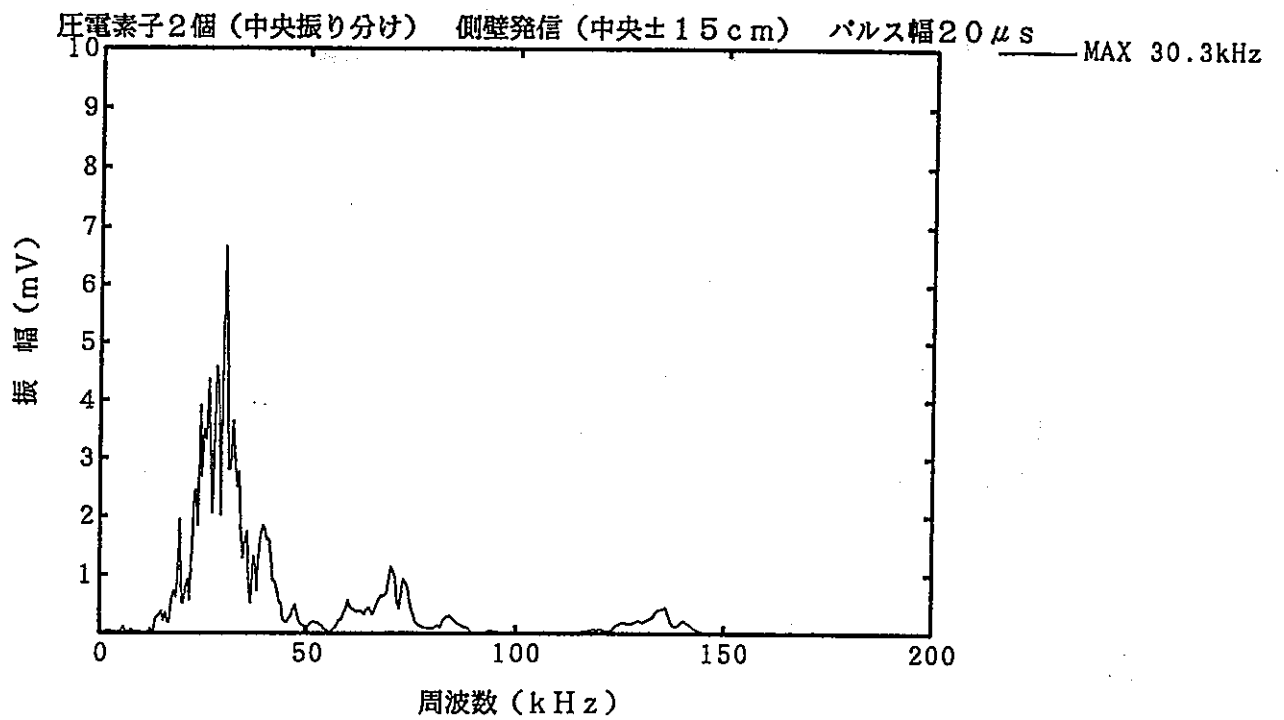
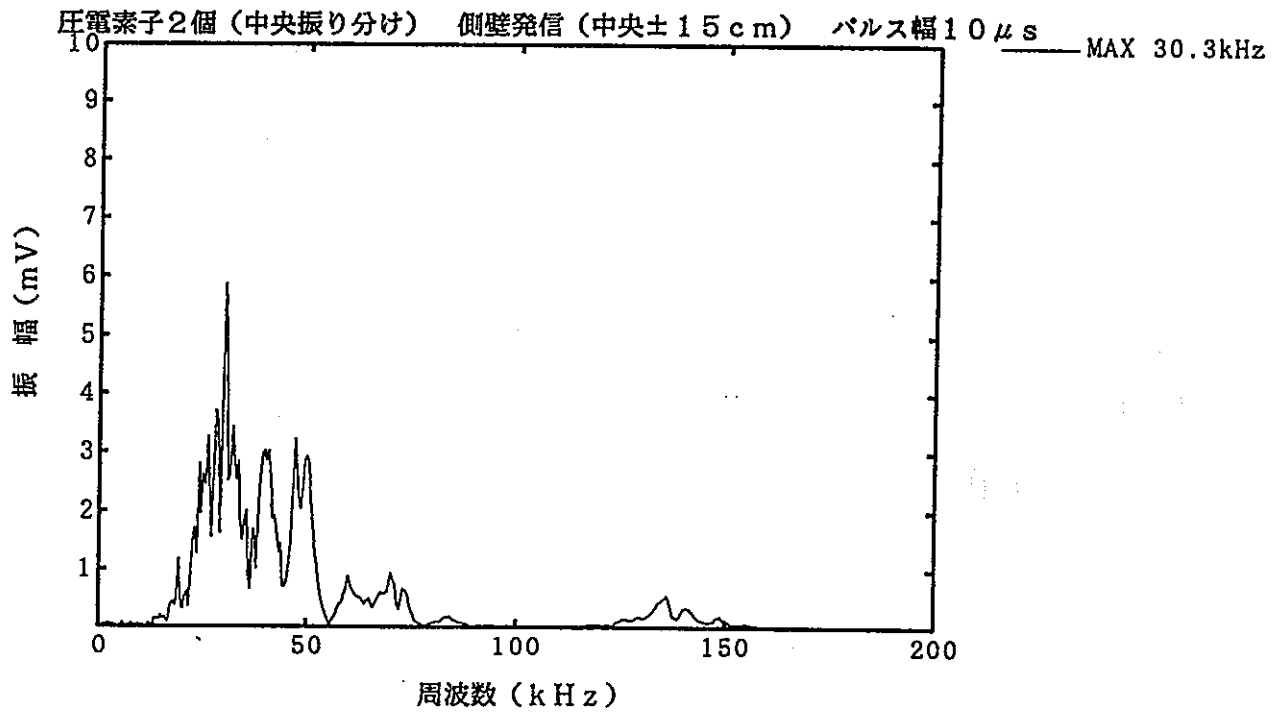


圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央+10cm） パルス幅100 μ s MAX 25.9kHz

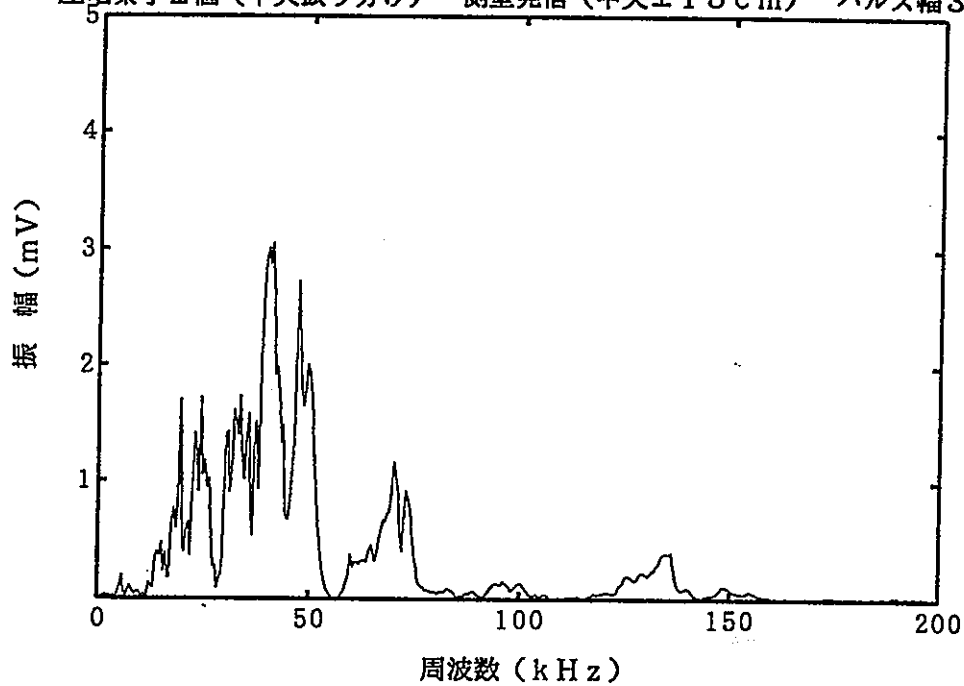


圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央±15cm） パルス幅5 μ s MAX 30.3kHz

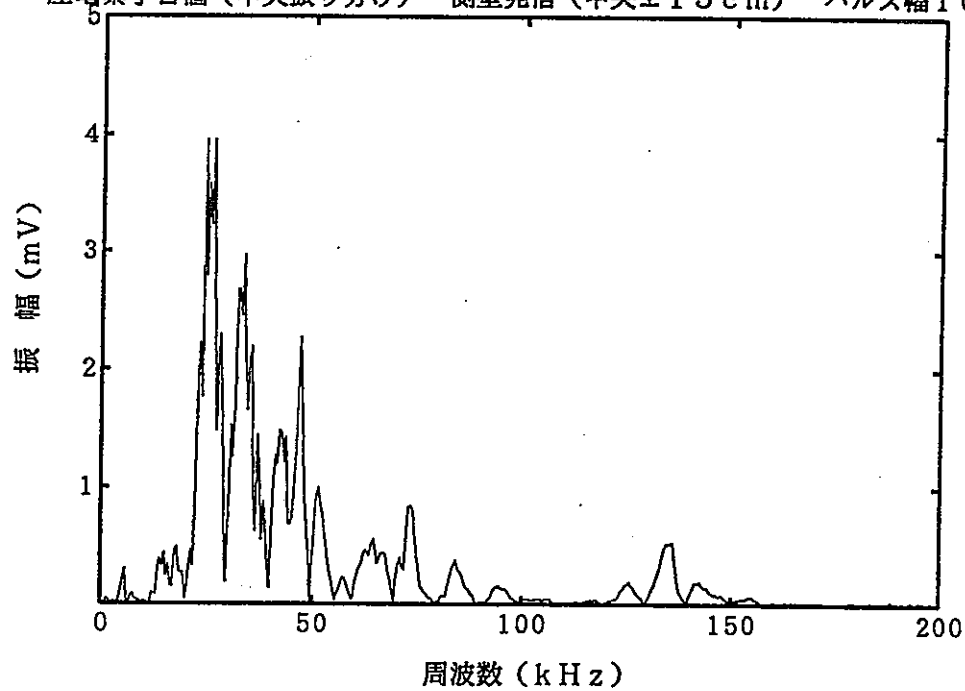


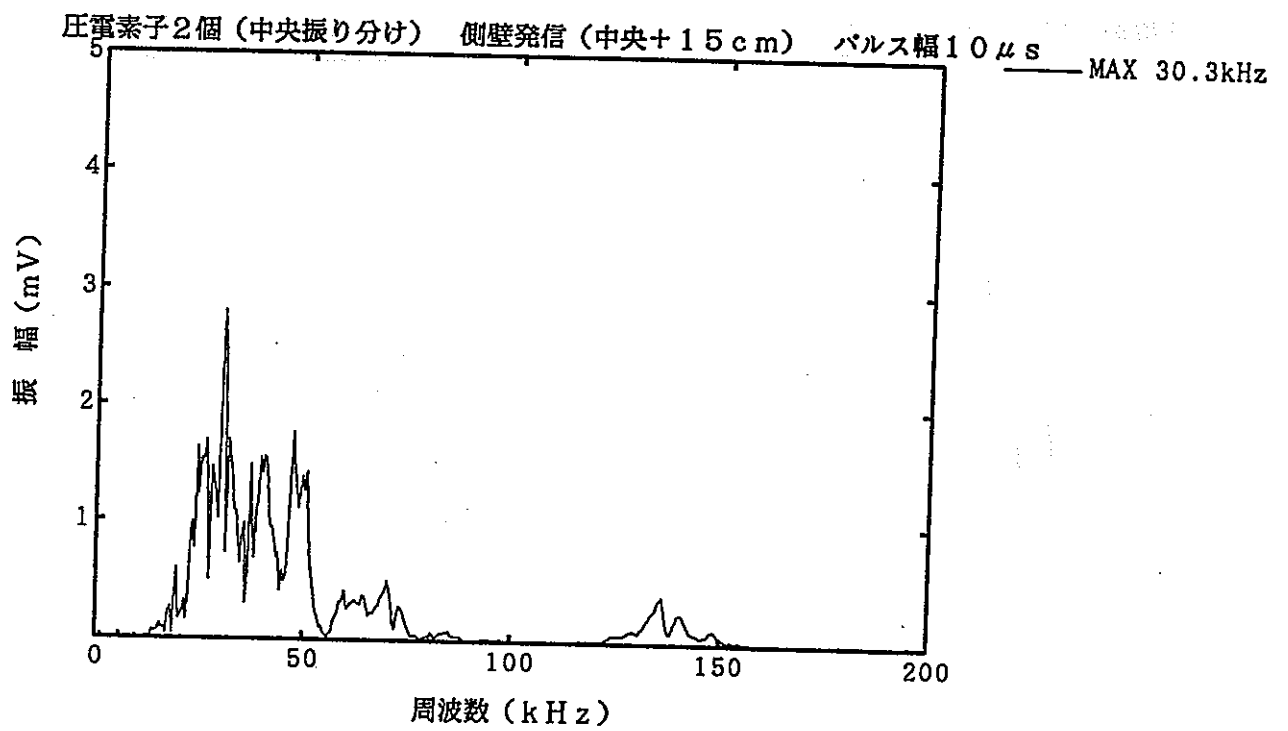
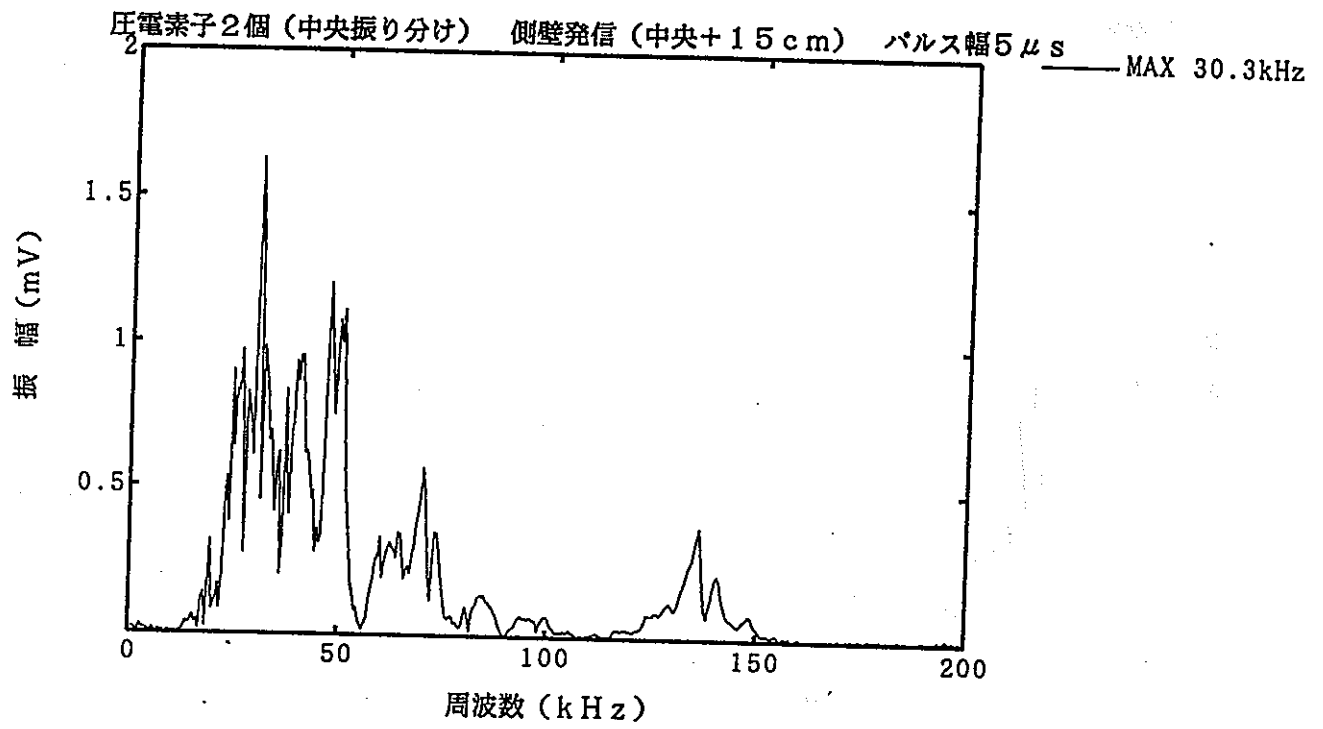


圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央±15cm） パルス幅35 μ s MAX 41kHz

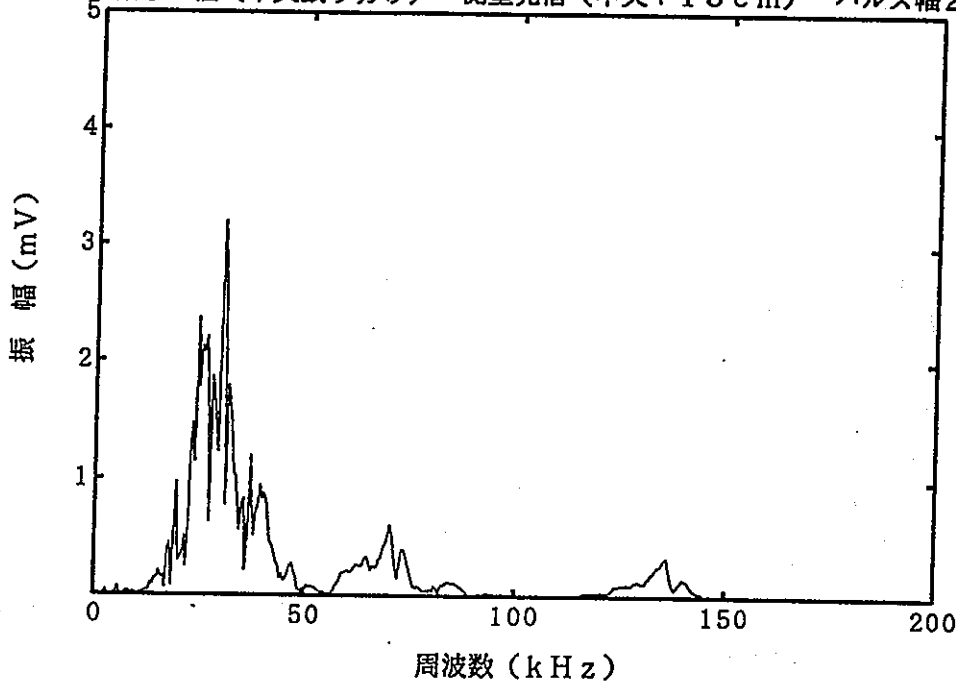


圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央±15cm） パルス幅100 μ s MAX 24.4kHz

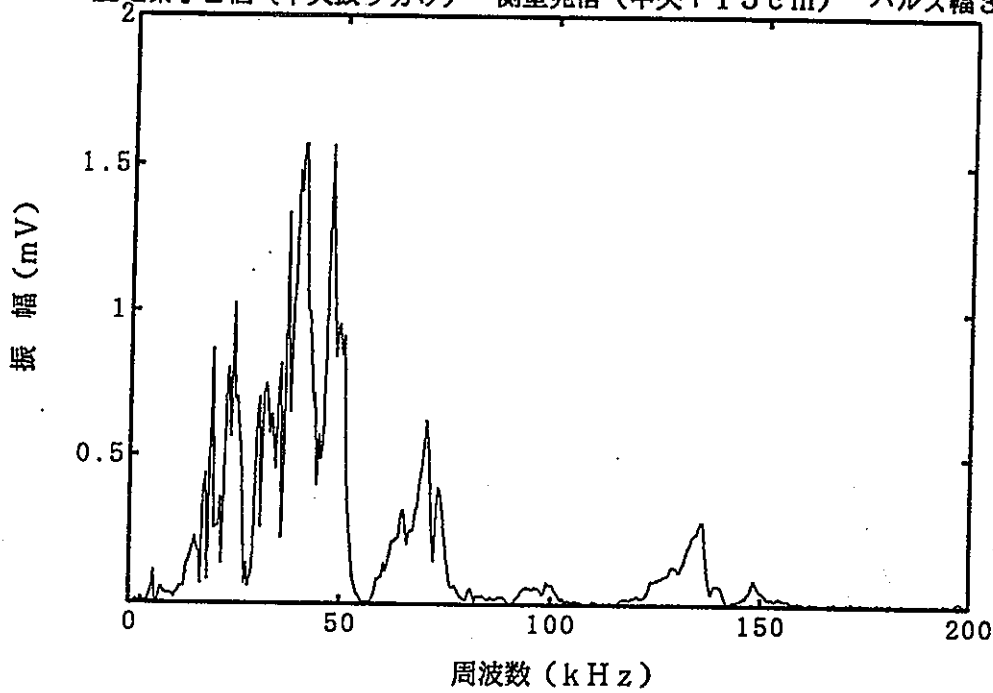




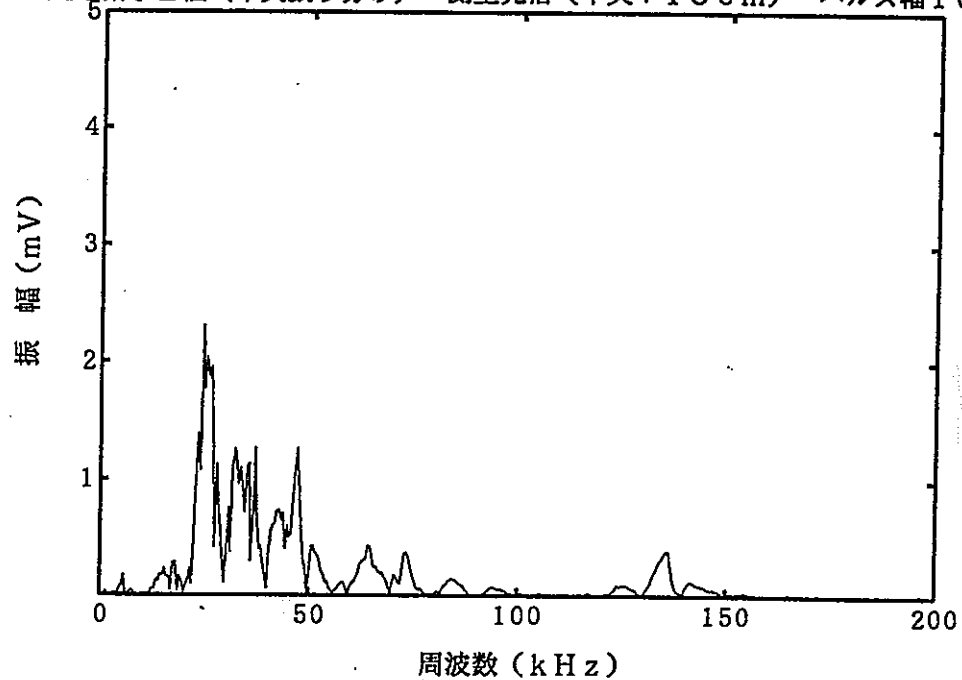
圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央+15cm） パルス幅20 μ s MAX 30.3kHz



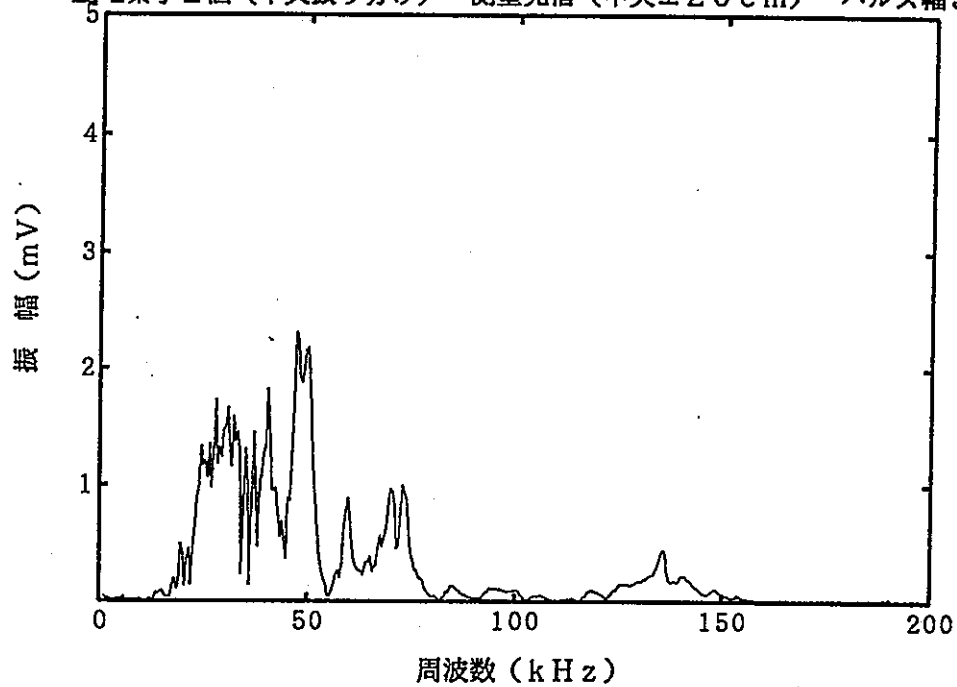
圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央+15cm） パルス幅35 μ s MAX 41kHz

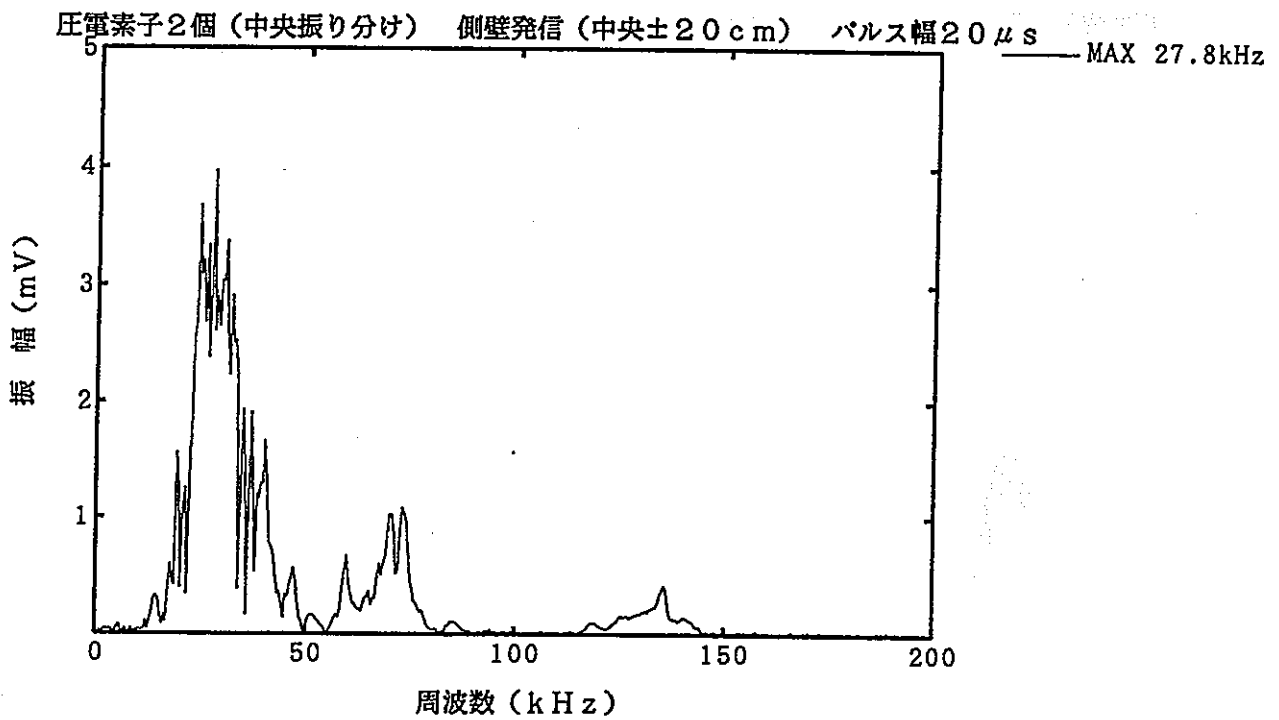
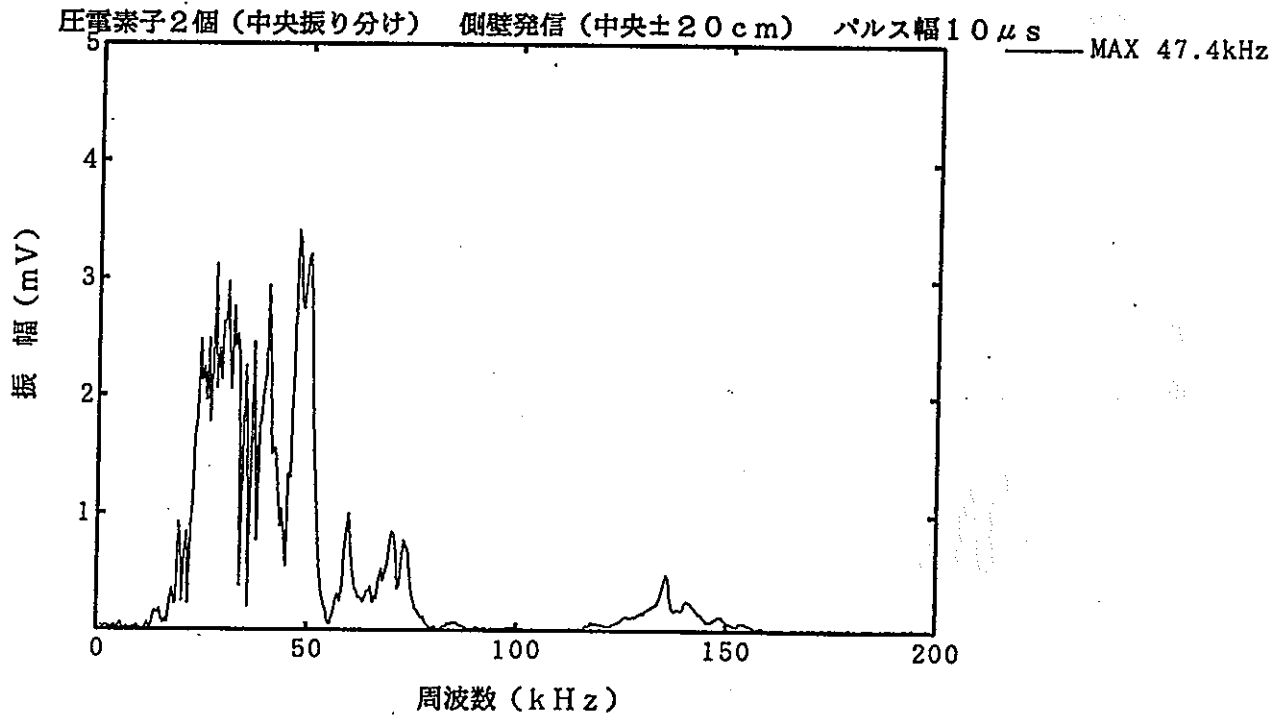


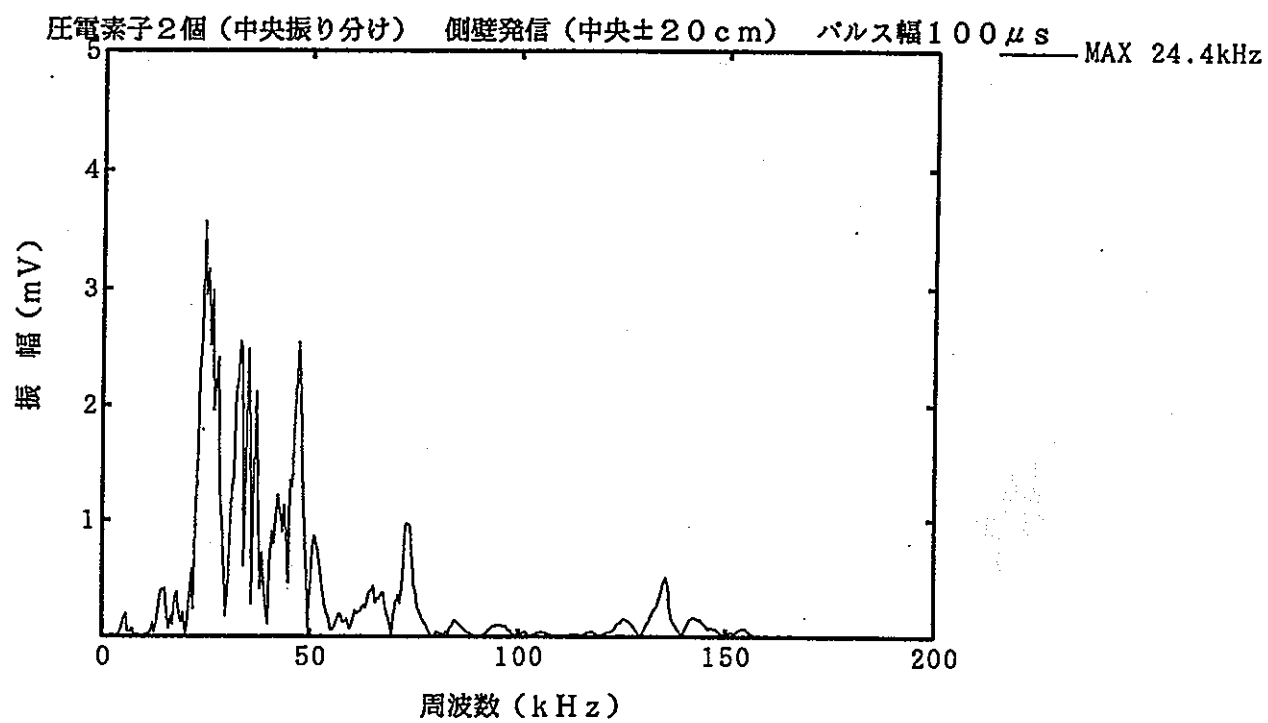
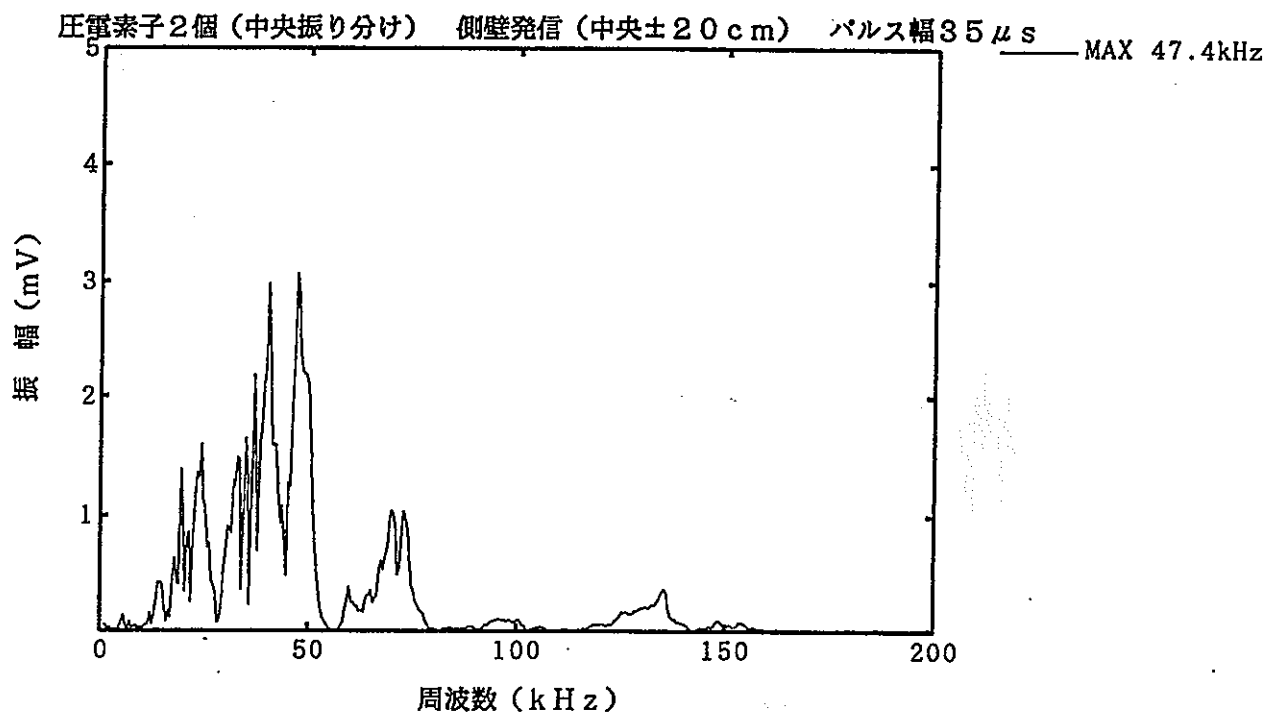
圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央+15cm） パルス幅100 μ s MAX 24.4kHz



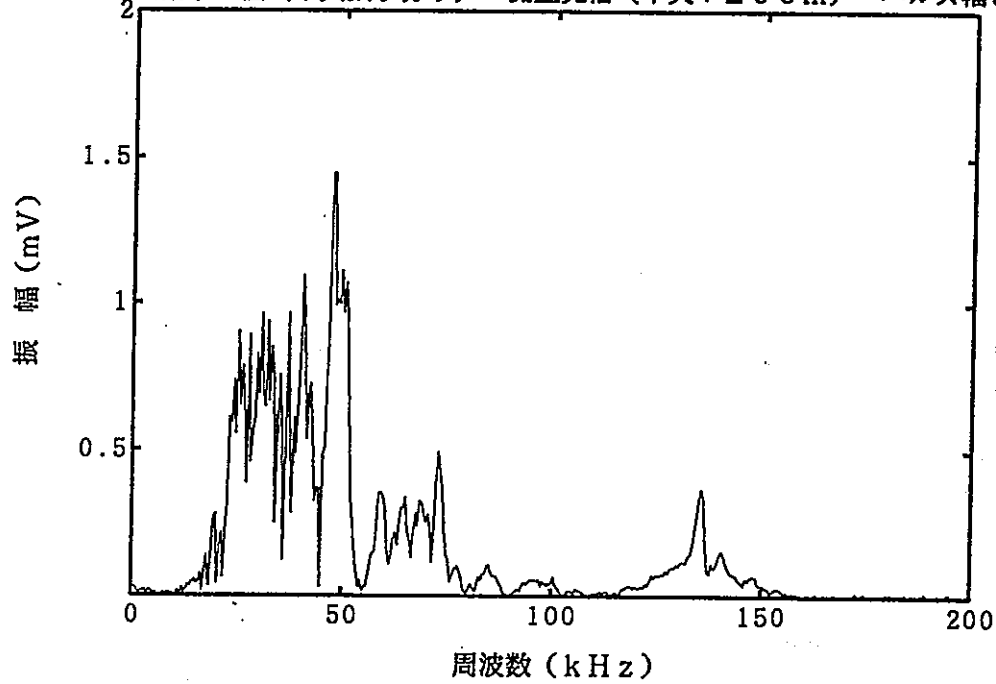
圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央 \pm 20cm） パルス幅5 μ s MAX 47.4kHz



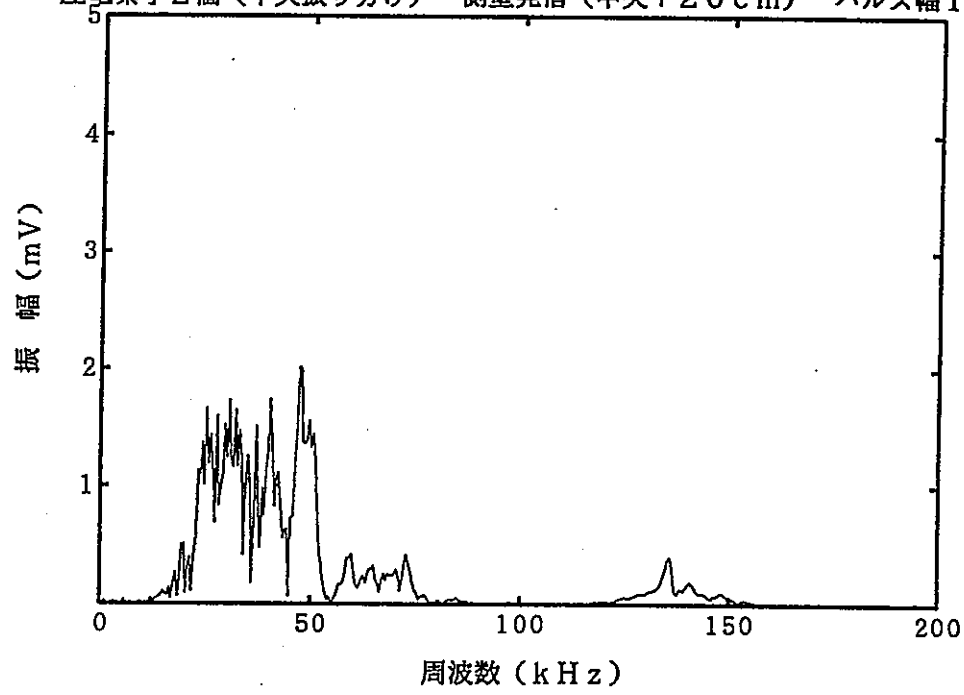


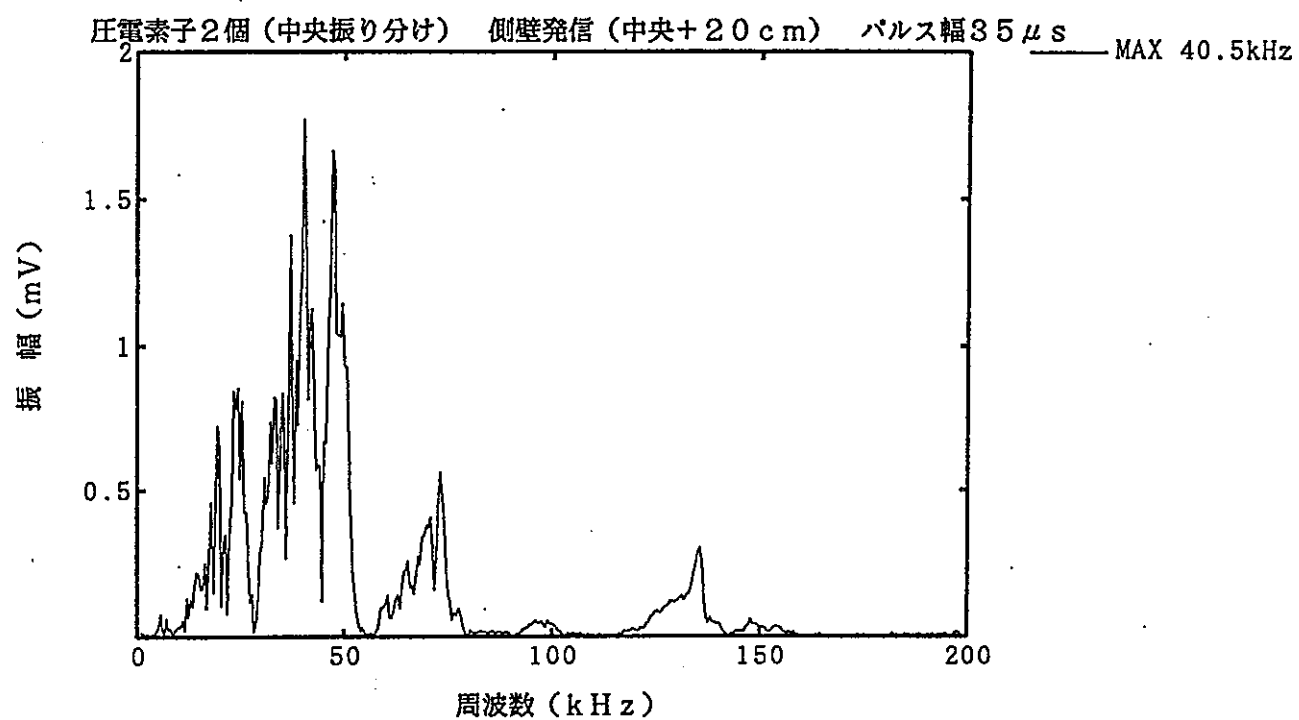
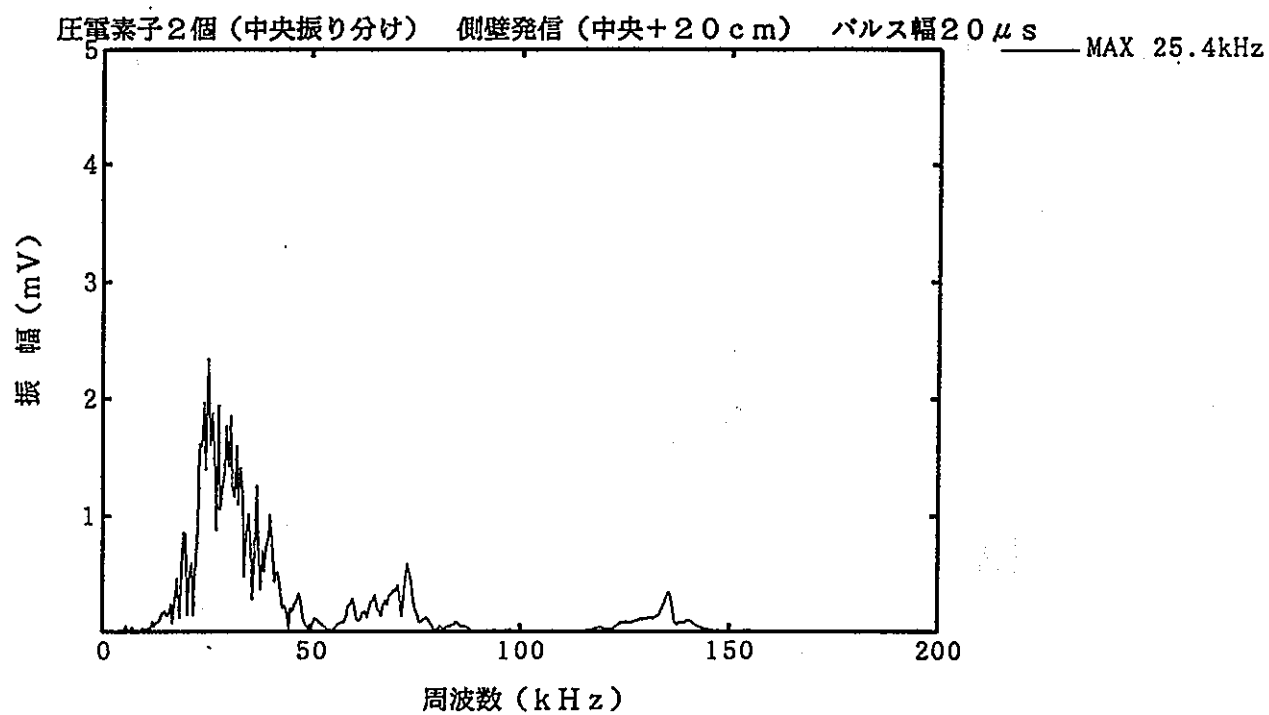


圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央+20cm） パルス幅5 μ s MAX 47.9kHz

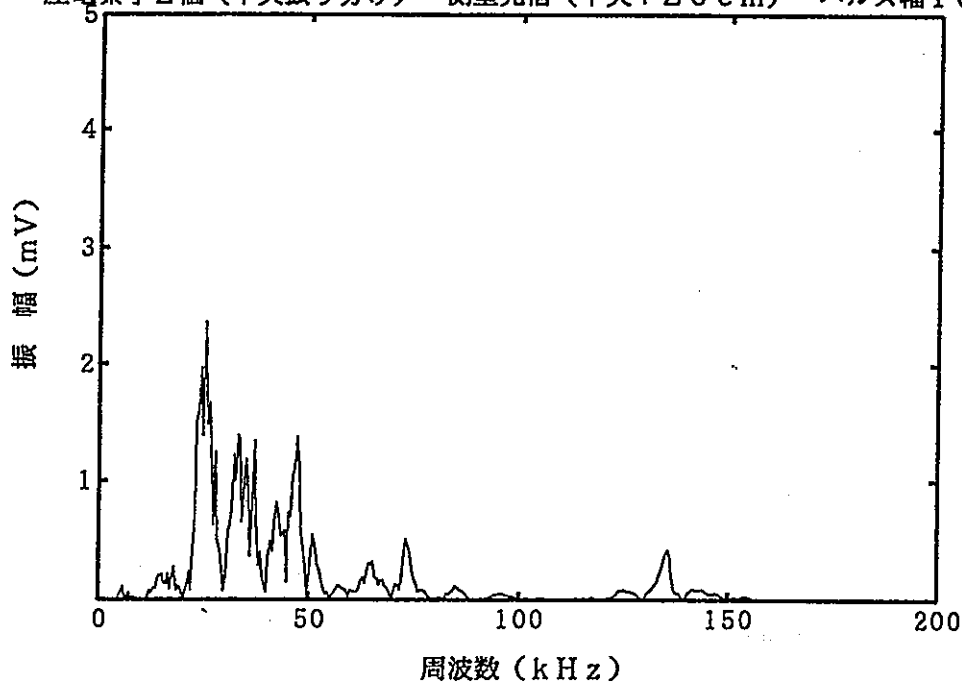


圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発信（中央+20cm） パルス幅10 μ s MAX 47.4kHz

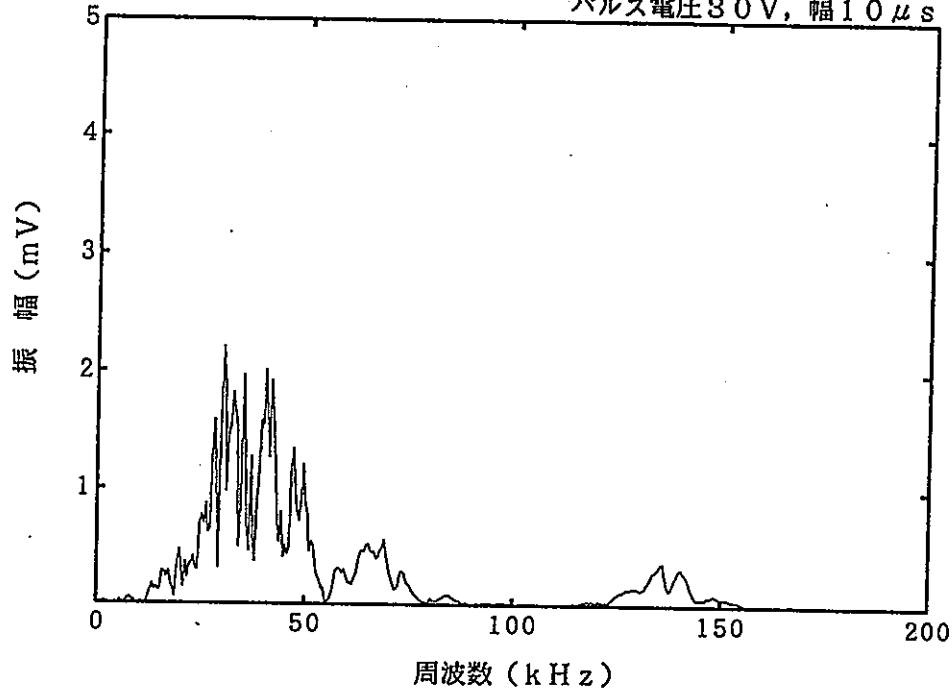




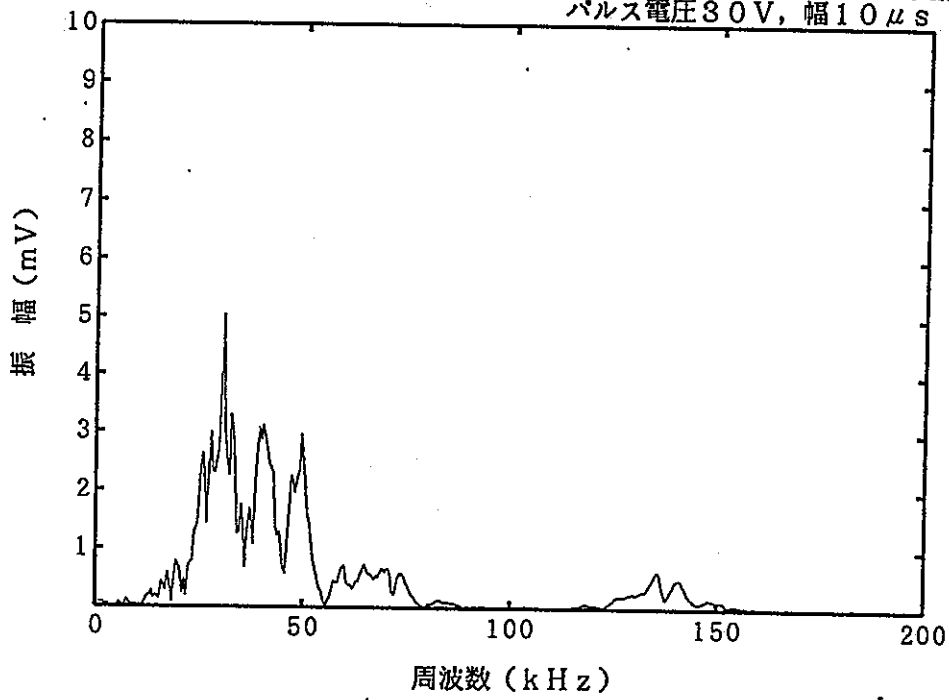
圧電素子2個(中央振り分け) 側壁発信(中央+20cm) パルス幅100 μ s MAX 25.4kHz



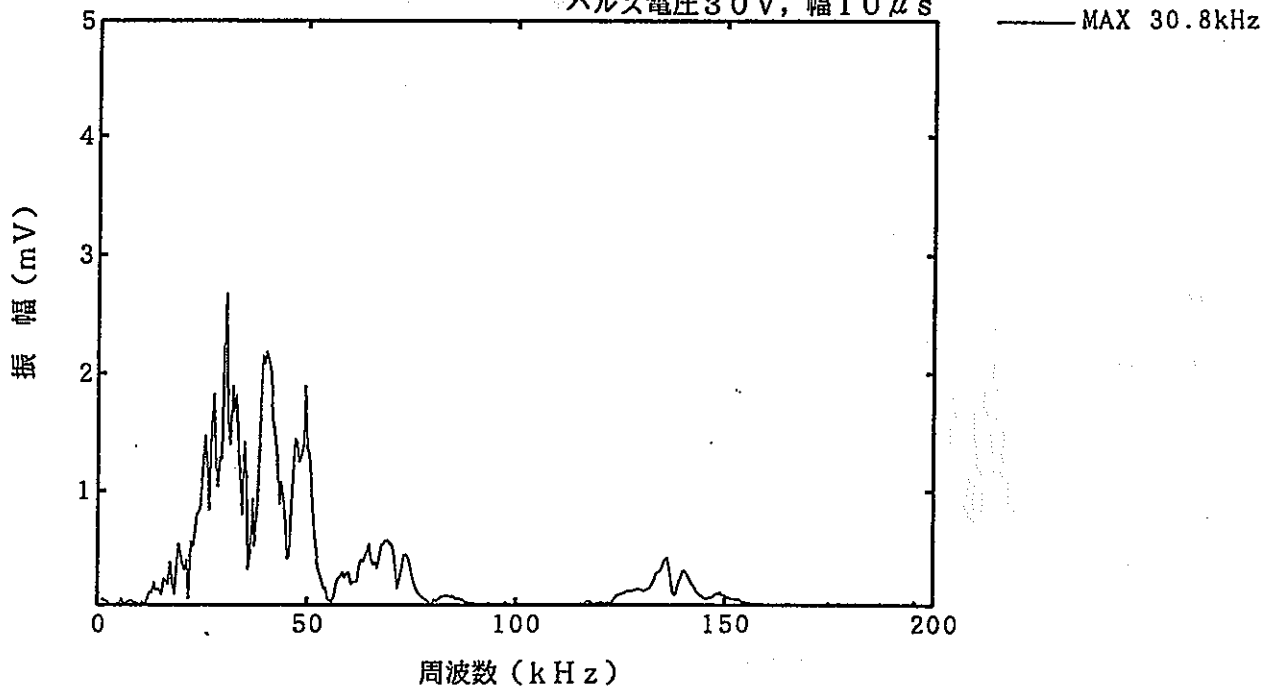
圧電素子1個 (中央振り分け) 側壁発振 (中央+0cm) 受振距離0.5m
パルス電圧30V, 幅10 μ s



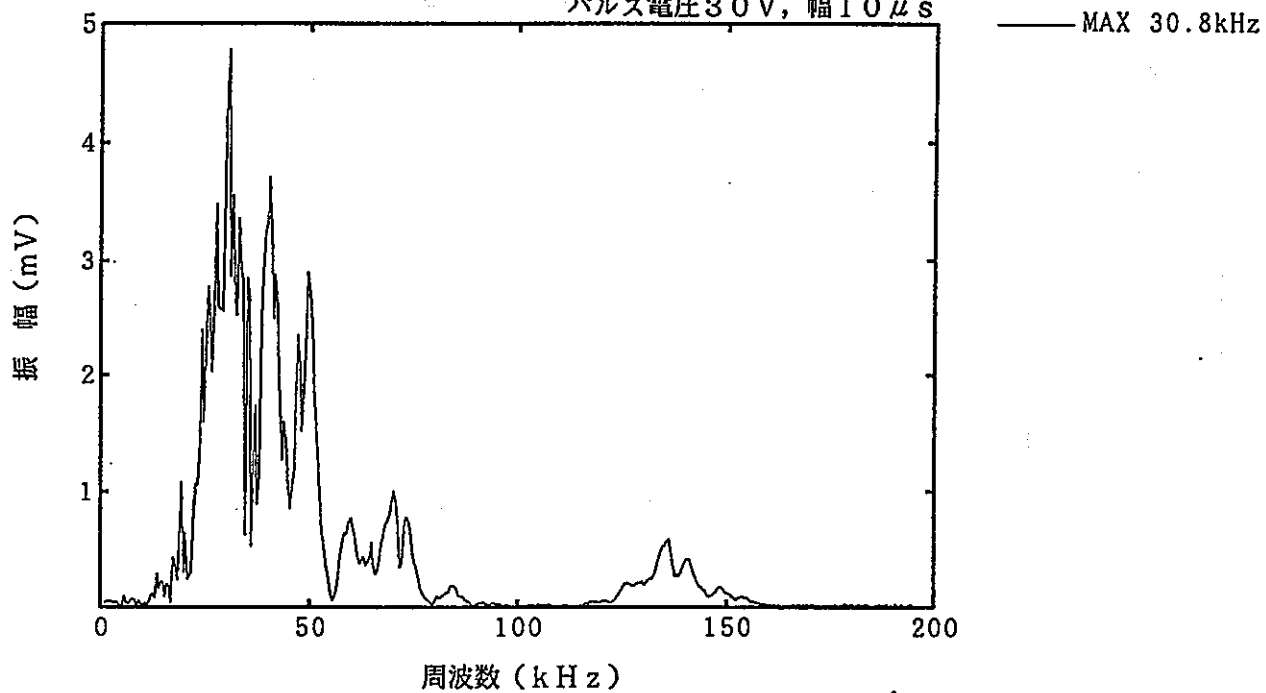
圧電素子2個 (中央振り分け) 側壁発振 (中央, 中央+2.5cm) 受振距離0.5m
パルス電圧30V, 幅10 μ s



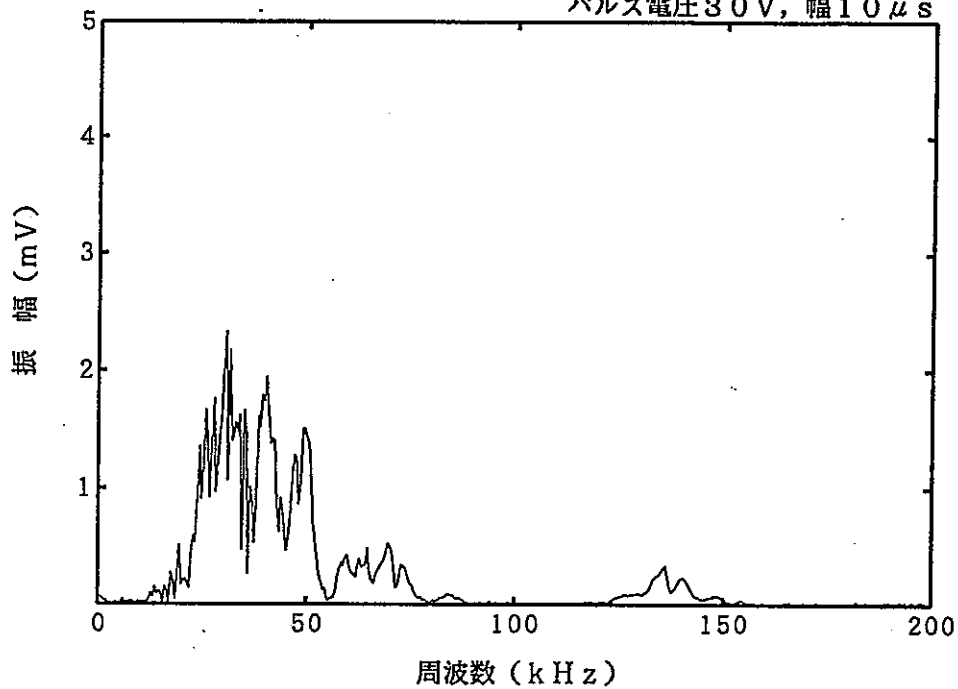
圧電素子1個 (中央振り分け) 側壁発振 (中央+2.5cm) 受振距離0.5m
パルス電圧30V, 幅10 μ s



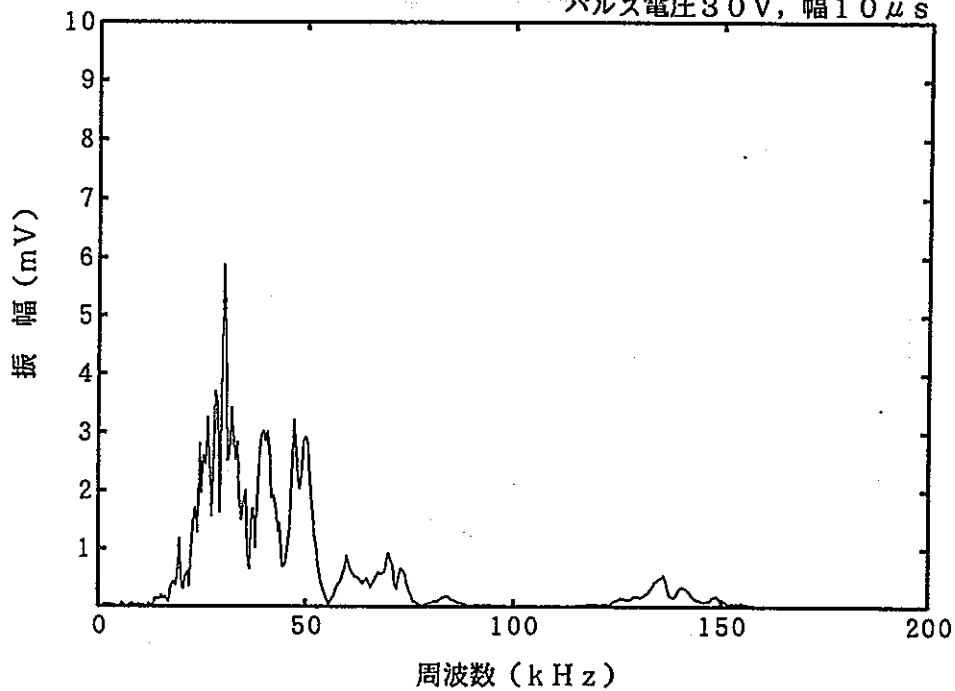
圧電素子2個 (中央振り分け) 側壁発振 (中央, 中央+5cm) 受振距離0.5m
パルス電圧30V, 幅10 μ s



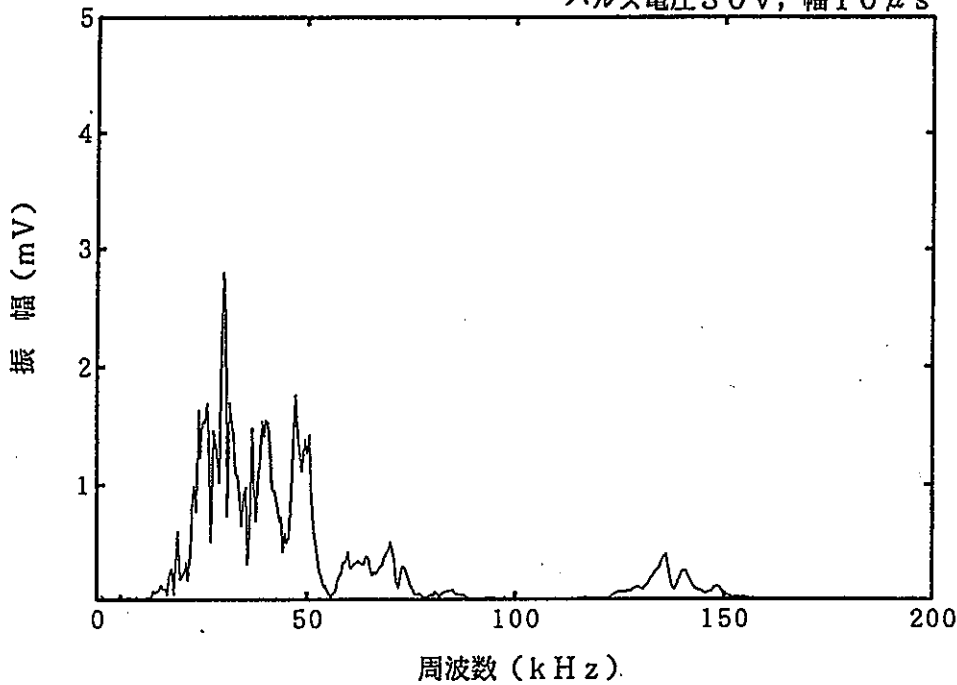
圧電素子1個(中央振り分け) 側壁発振(中央+5cm) 受振距離0.5m
パルス電圧30V, 幅10 μ s



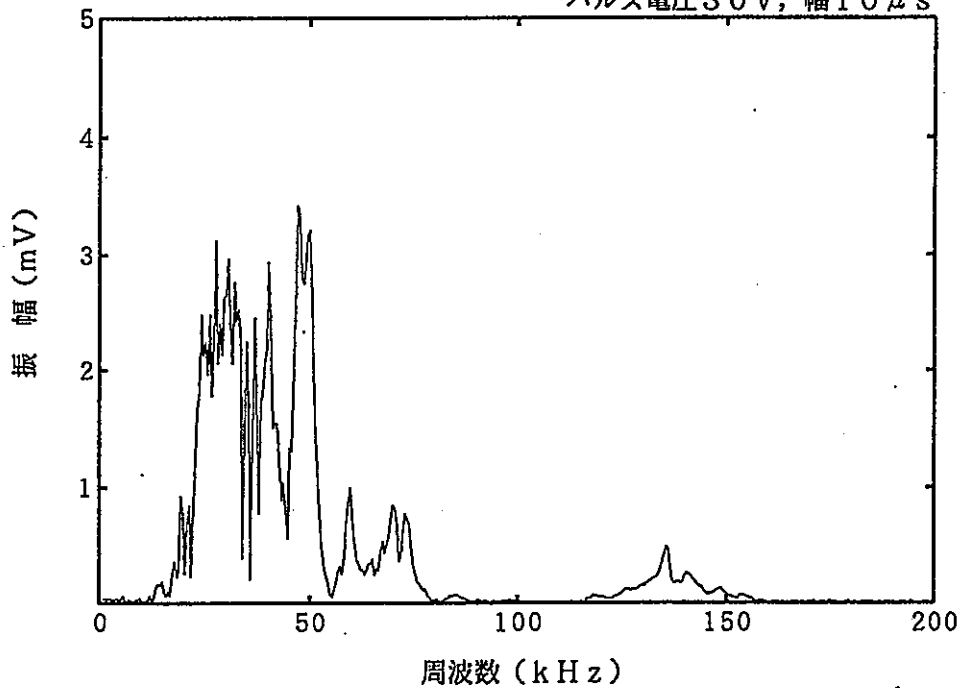
圧電素子2個(中央振り分け) 側壁発振(中央, 中央+7.5cm) 受振距離0.5m
パルス電圧30V, 幅10 μ s



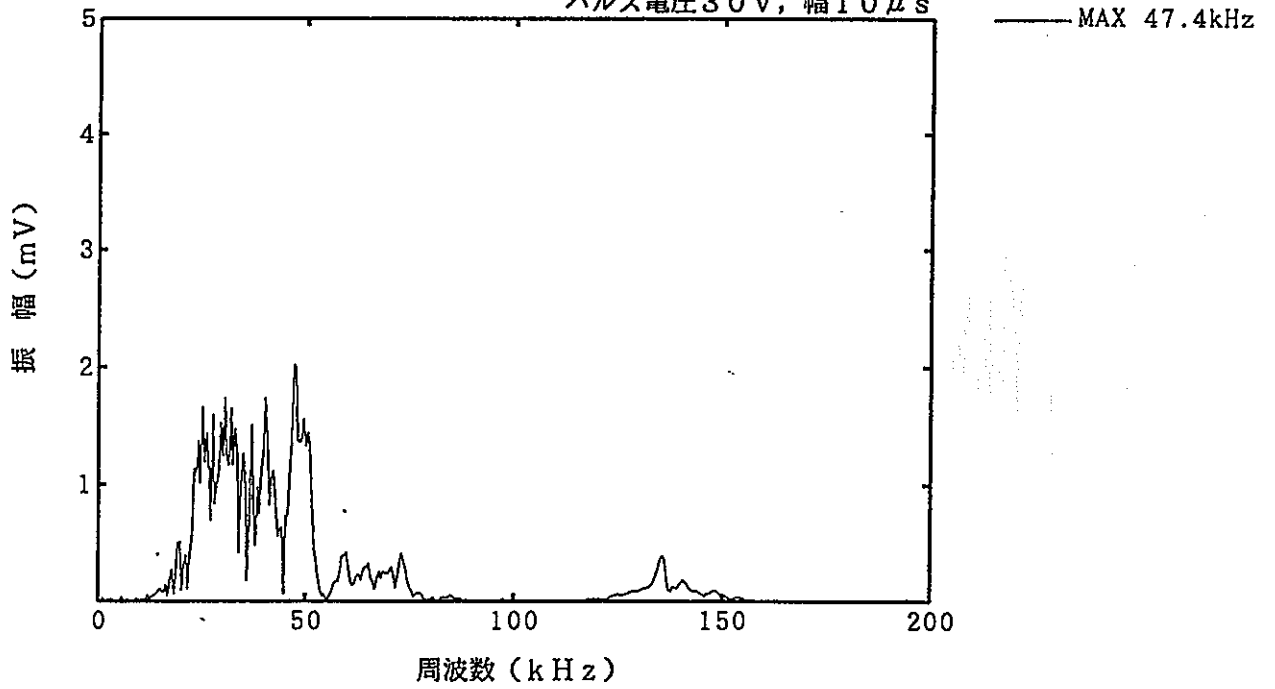
圧電素子1個 (中央振り分け) 側壁発振 (中央+7.5cm) 受振距離0.5m
パルス電圧30V, 幅10 μ s



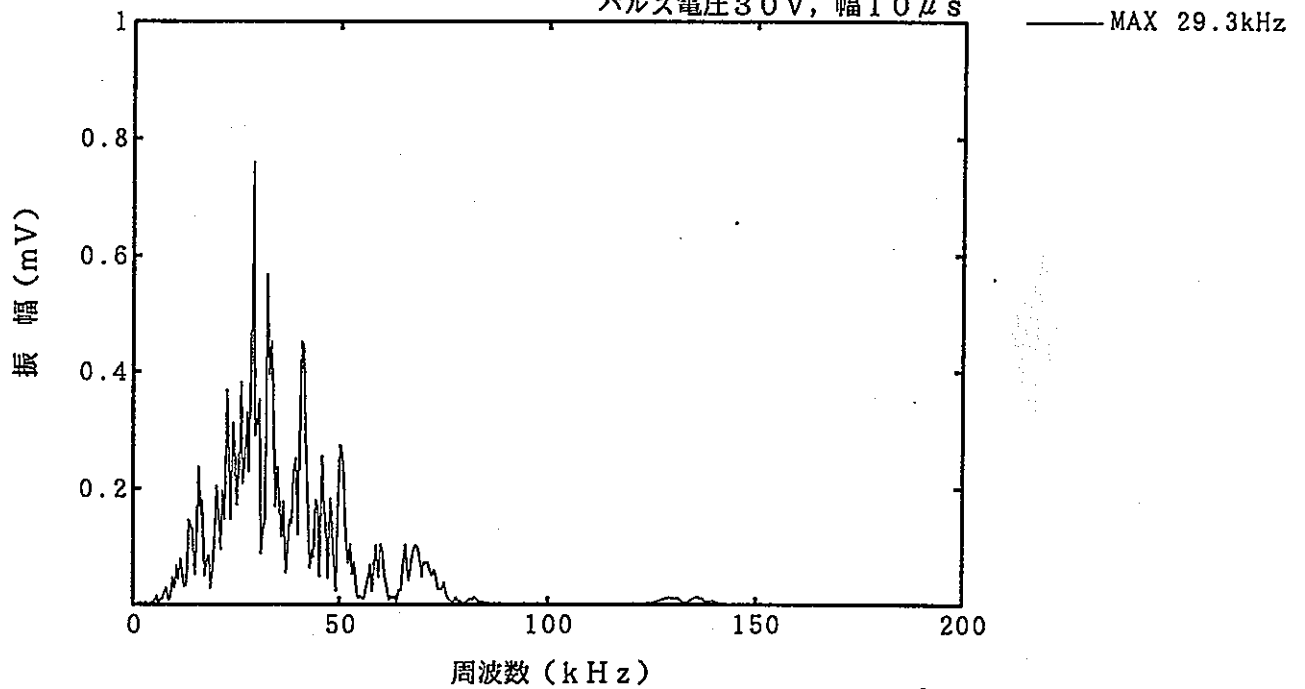
圧電素子2個 (中央振り分け) 側壁発振 (中央, 中央+10cm) 受振距離0.5m
パルス電圧30V, 幅10 μ s



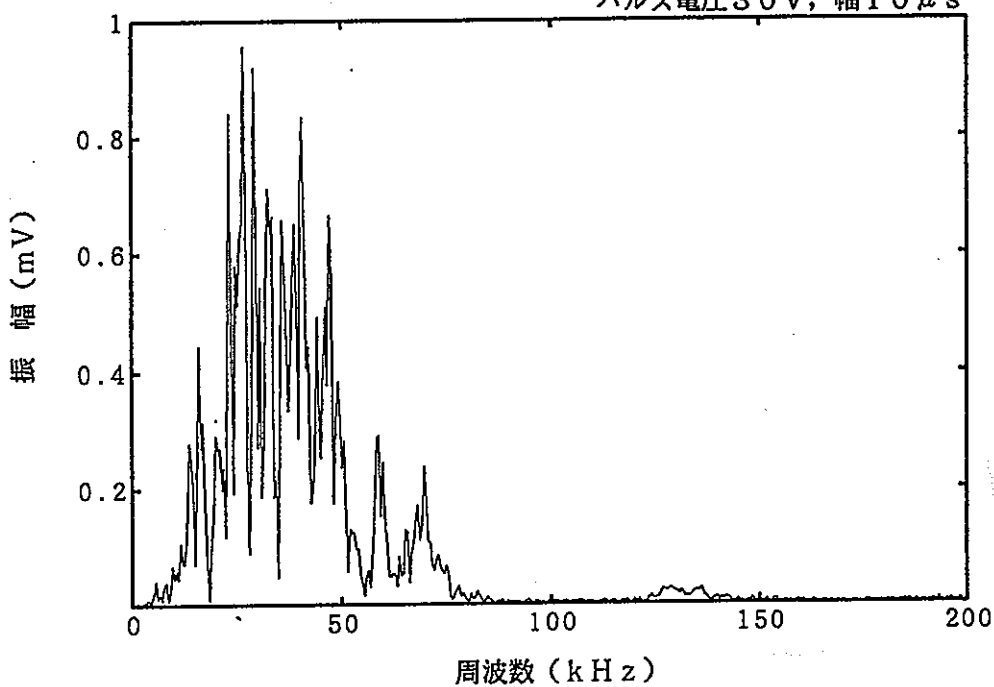
圧電素子1個(中央振り分け) 側壁発振(中央+10cm) 受振距離0.5m
パルス電圧30V, 幅10 μ s



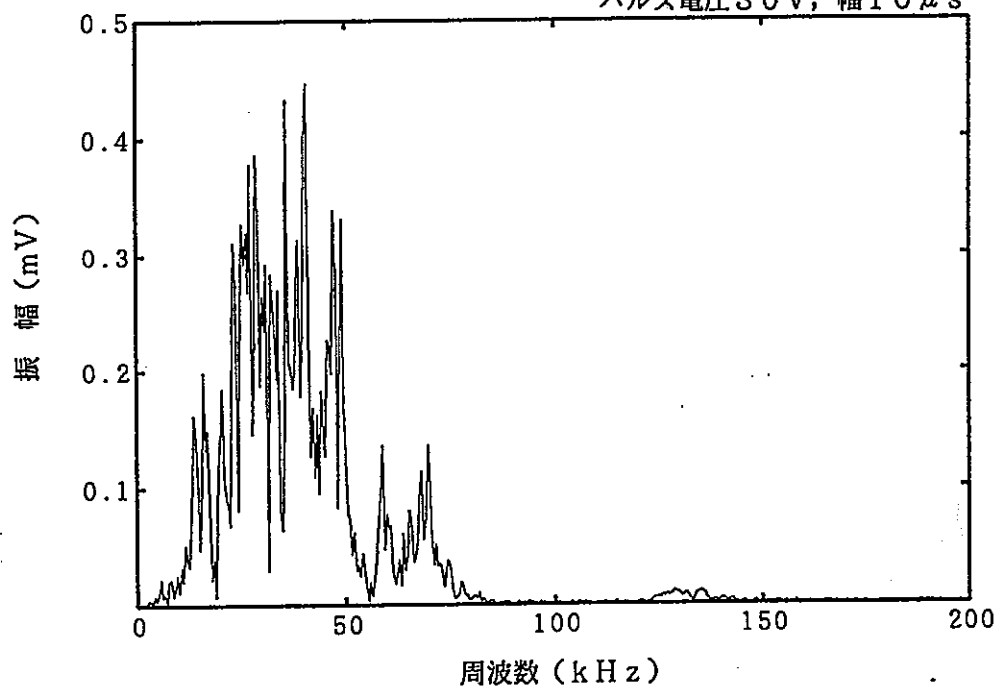
圧電素子1個(中央振り分け) 側壁発振(中央+0cm) 受振距離1m
パルス電圧30V, 幅10 μ s

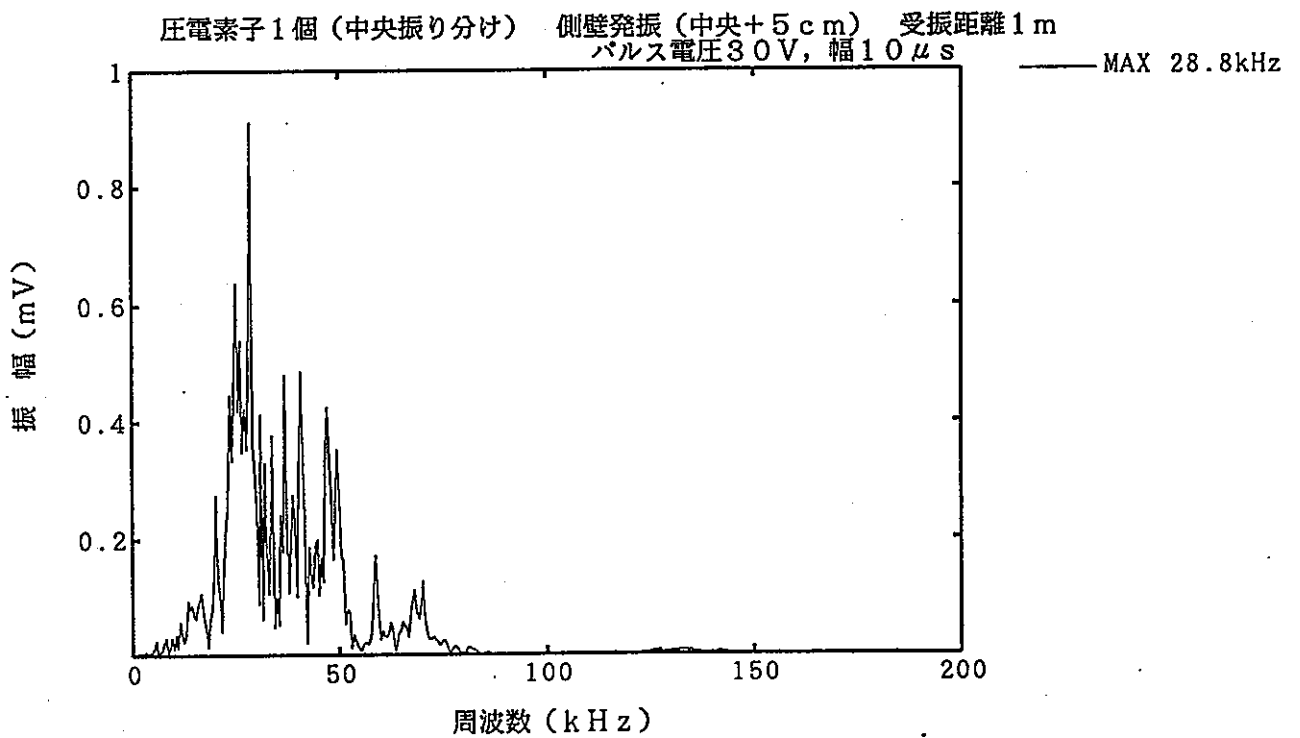
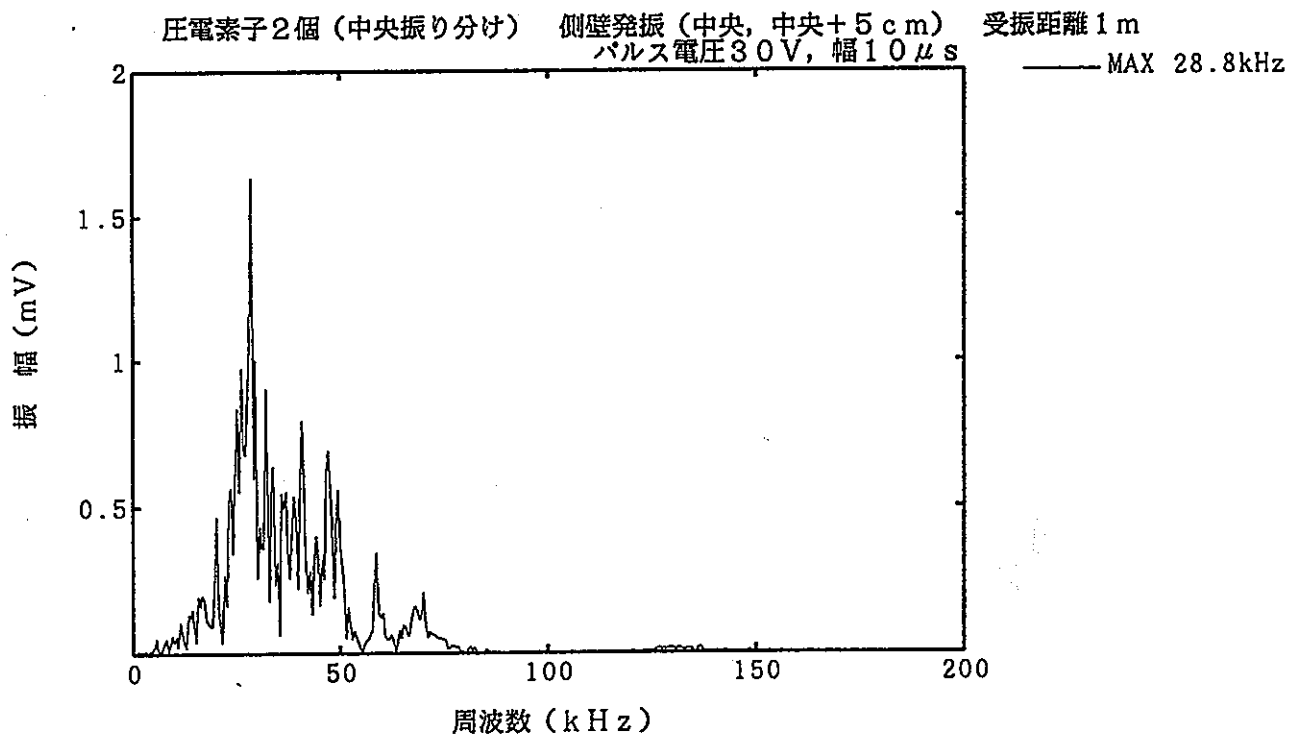


圧電素子2個 (中央振り分け) 側壁発振 (中央, 中央+2.5cm) 受振距離1m
パルス電圧30V, 幅10 μ s

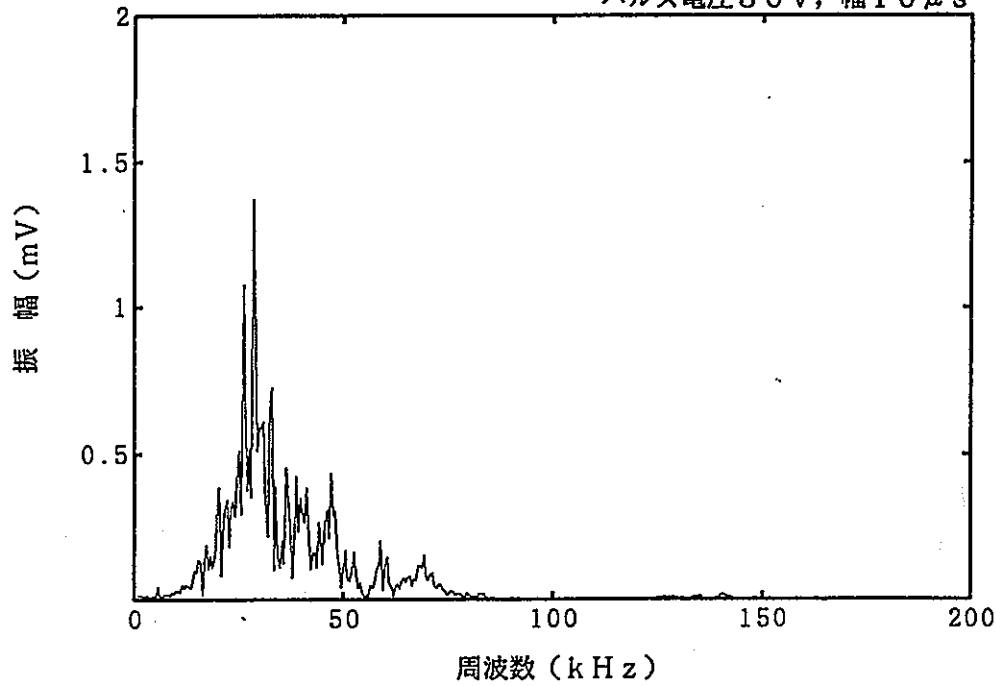


圧電素子1個 (中央振り分け) 側壁発振 (中央+2.5cm) 受振距離1m
パルス電圧30V, 幅10 μ s

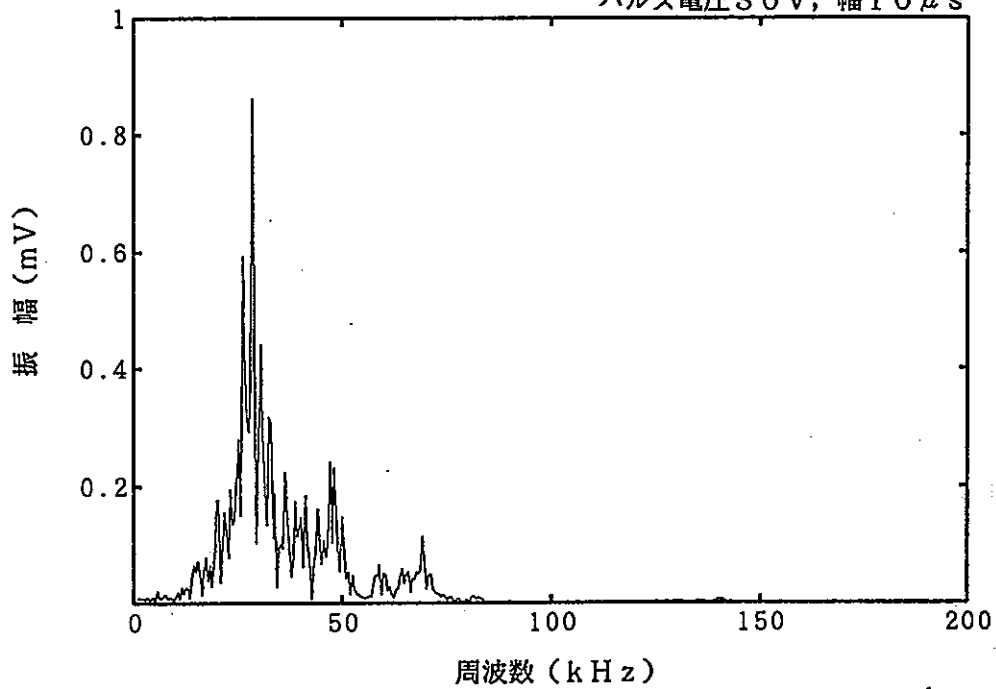


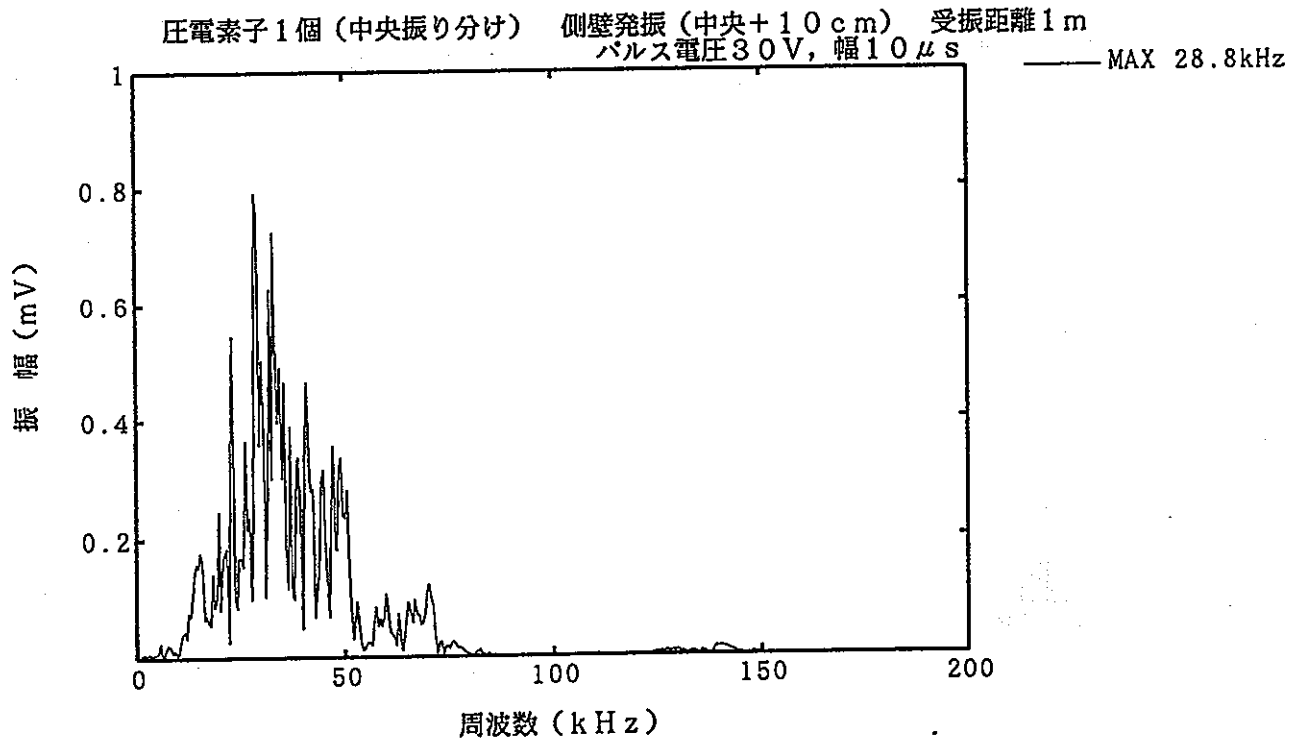
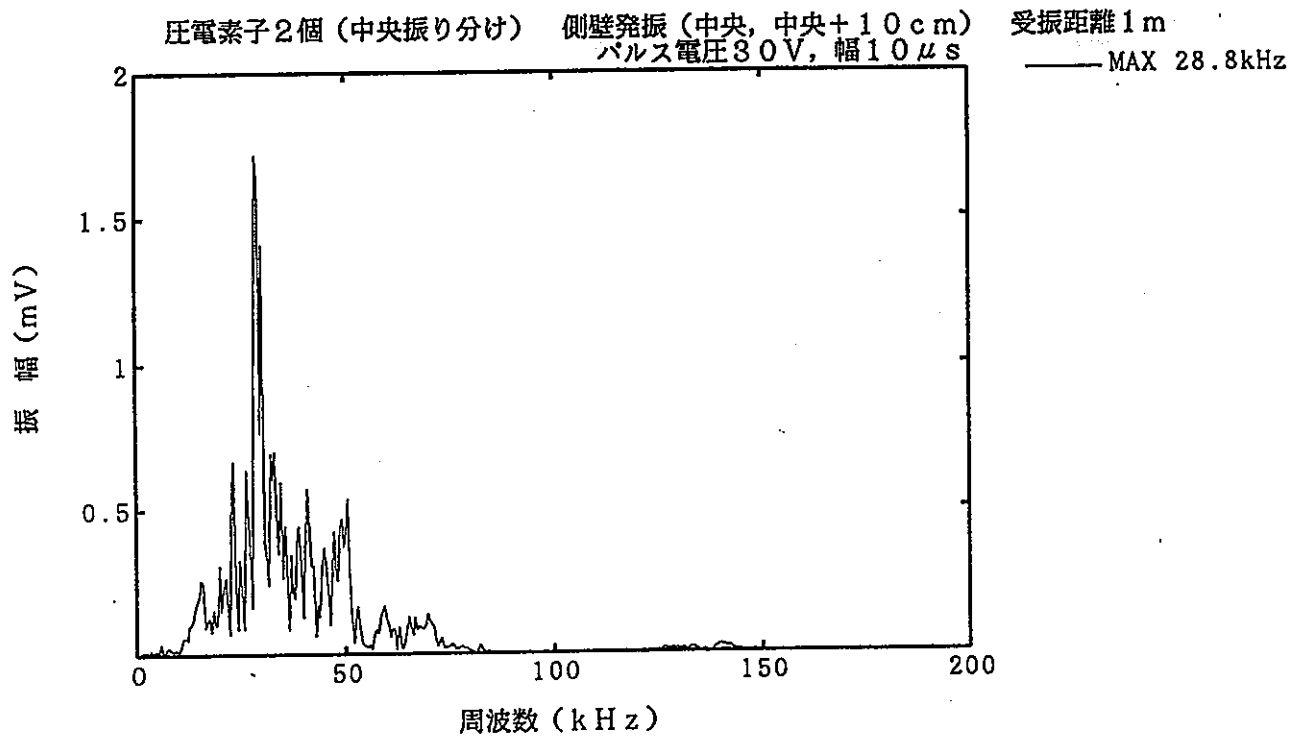


圧電素子2個（中央振り分け） 側壁発振（中央, 中央+7.5cm） 受振距離1m
パルス電圧30V, 幅10 μ s

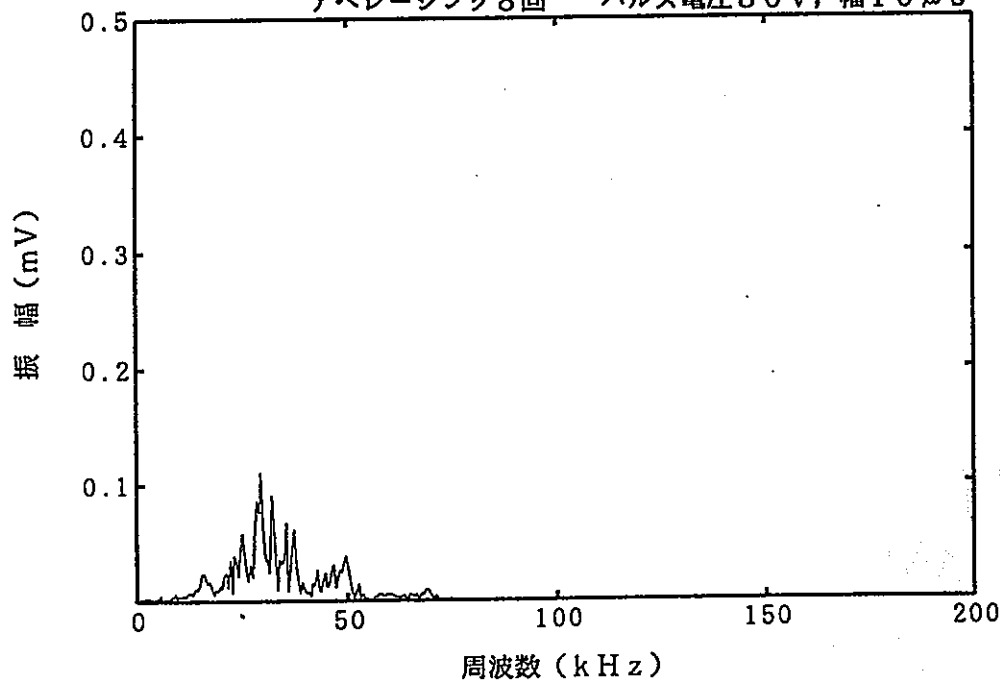


圧電素子1個（中央振り分け） 側壁発振（中央+7.5cm） 受振距離1m
パルス電圧30V, 幅10 μ s

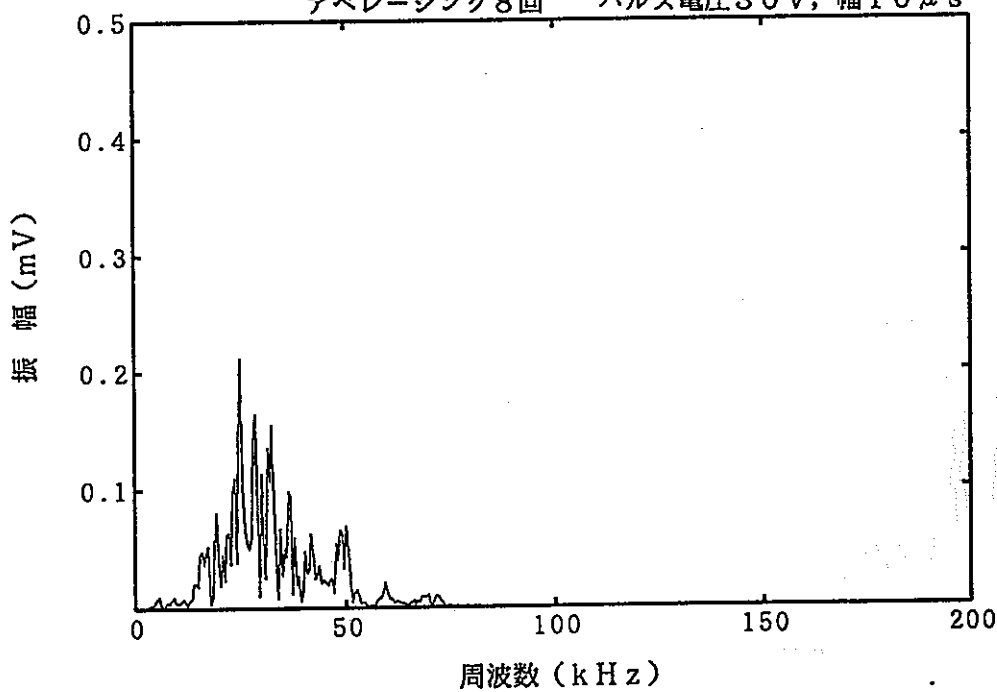


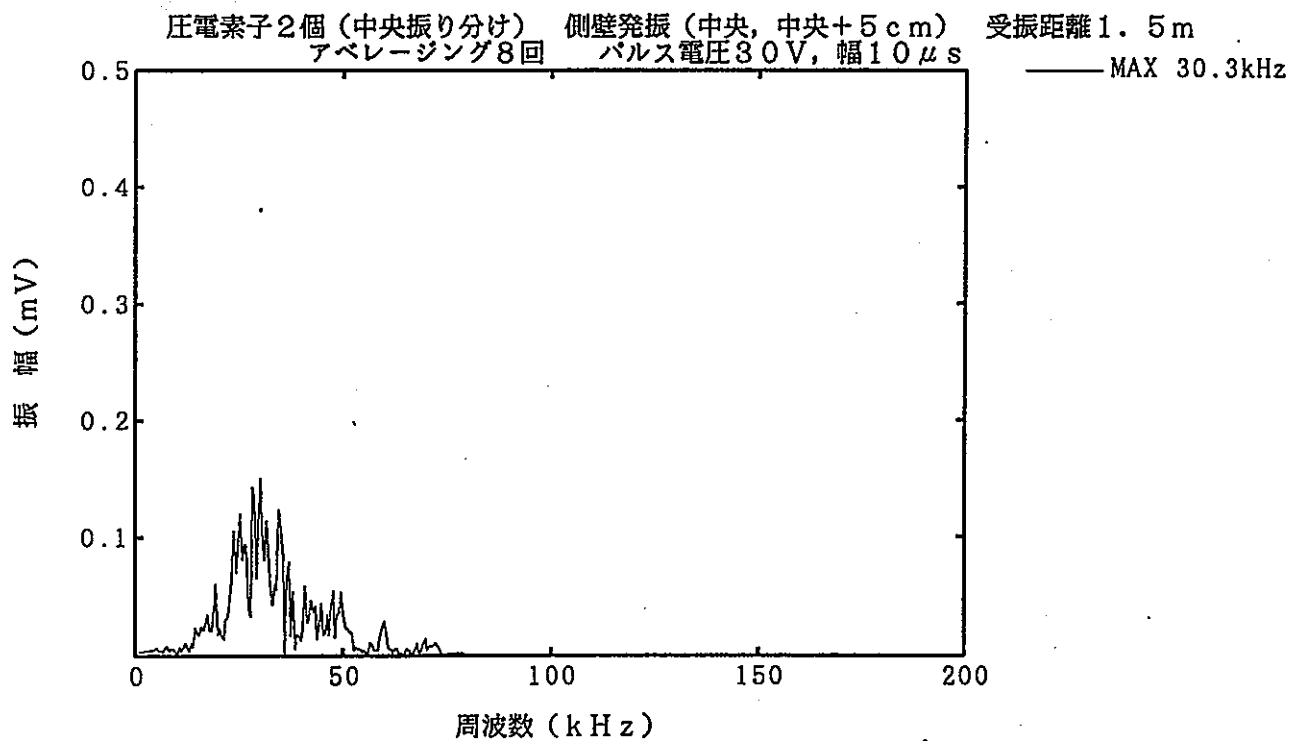
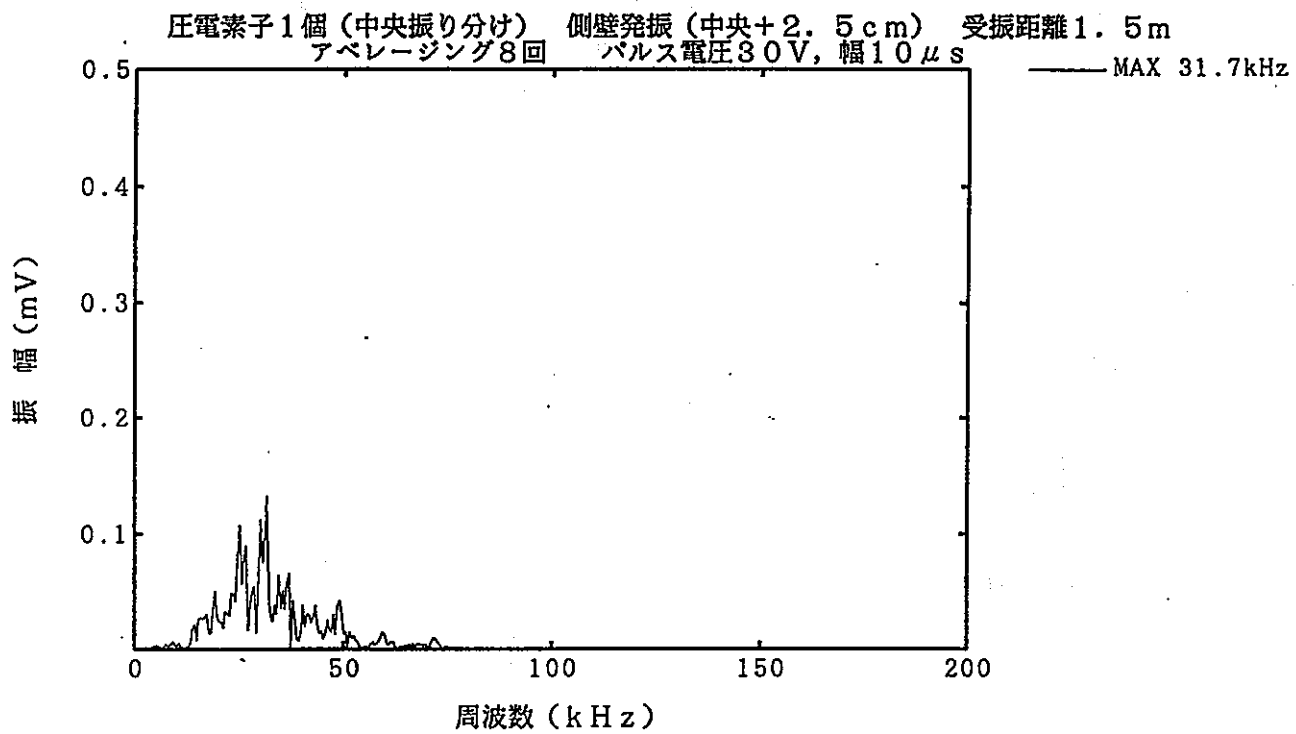


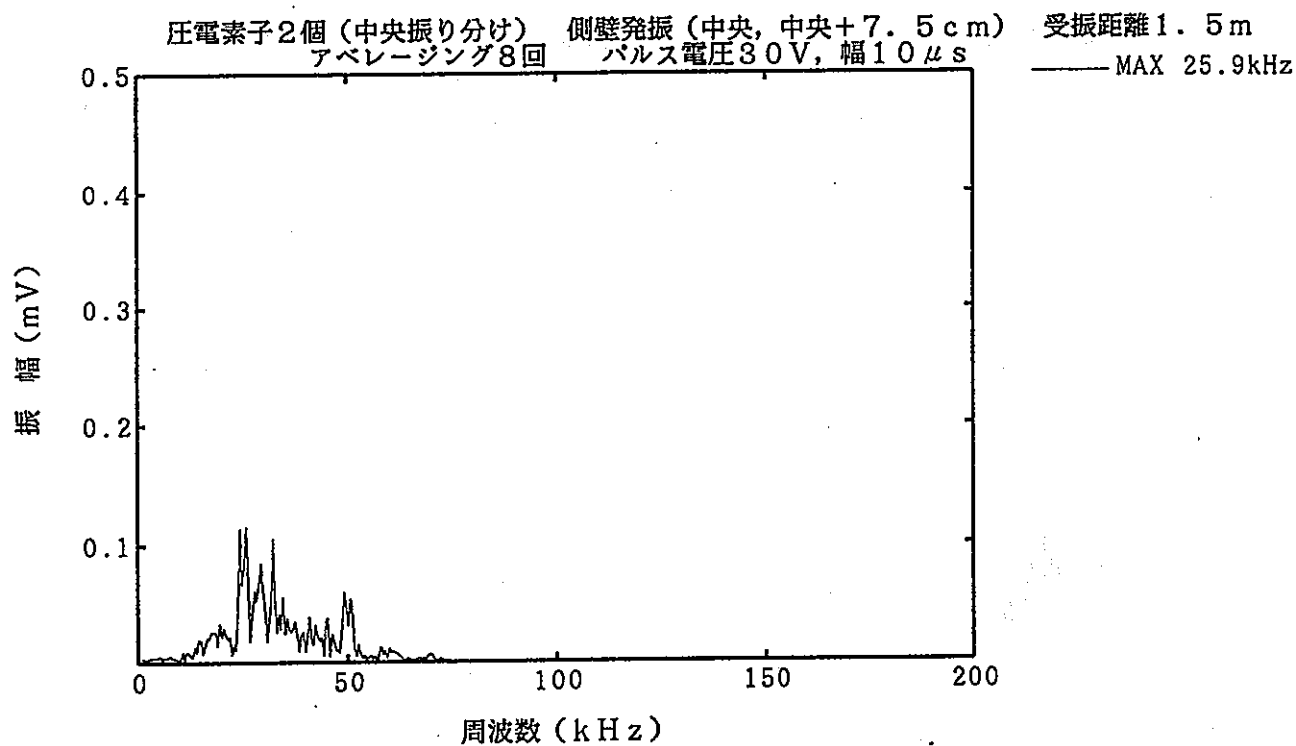
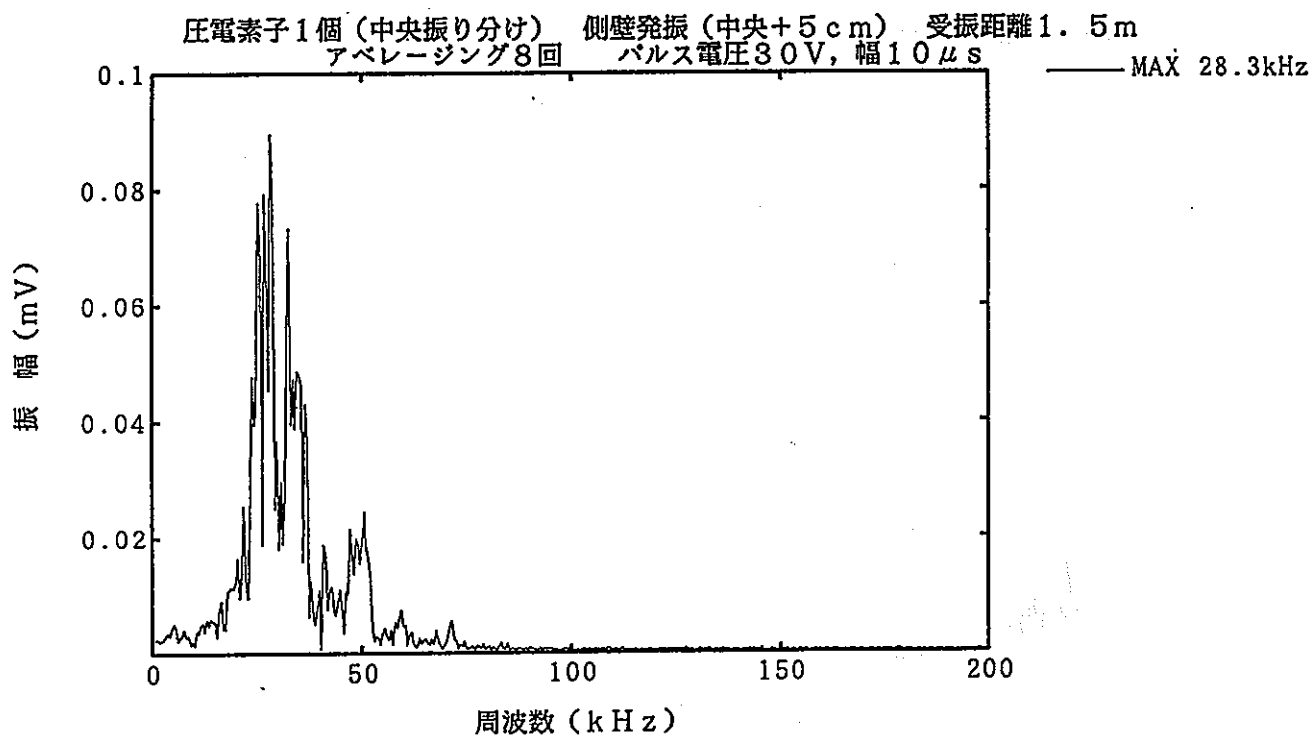
圧電素子1個(中央振り分け) 側壁発振(中央+0cm) 受振距離1.5m
アベレーシング8回 パルス電圧30V, 幅10 μ s

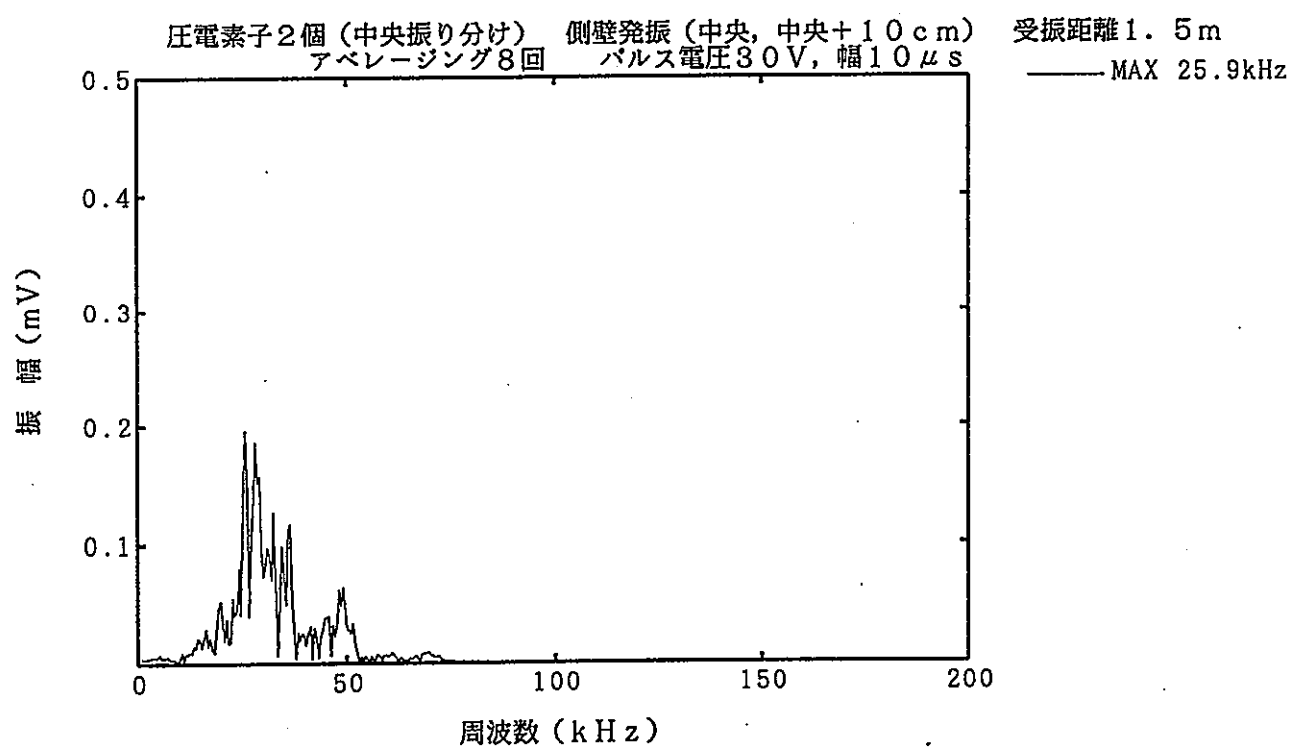
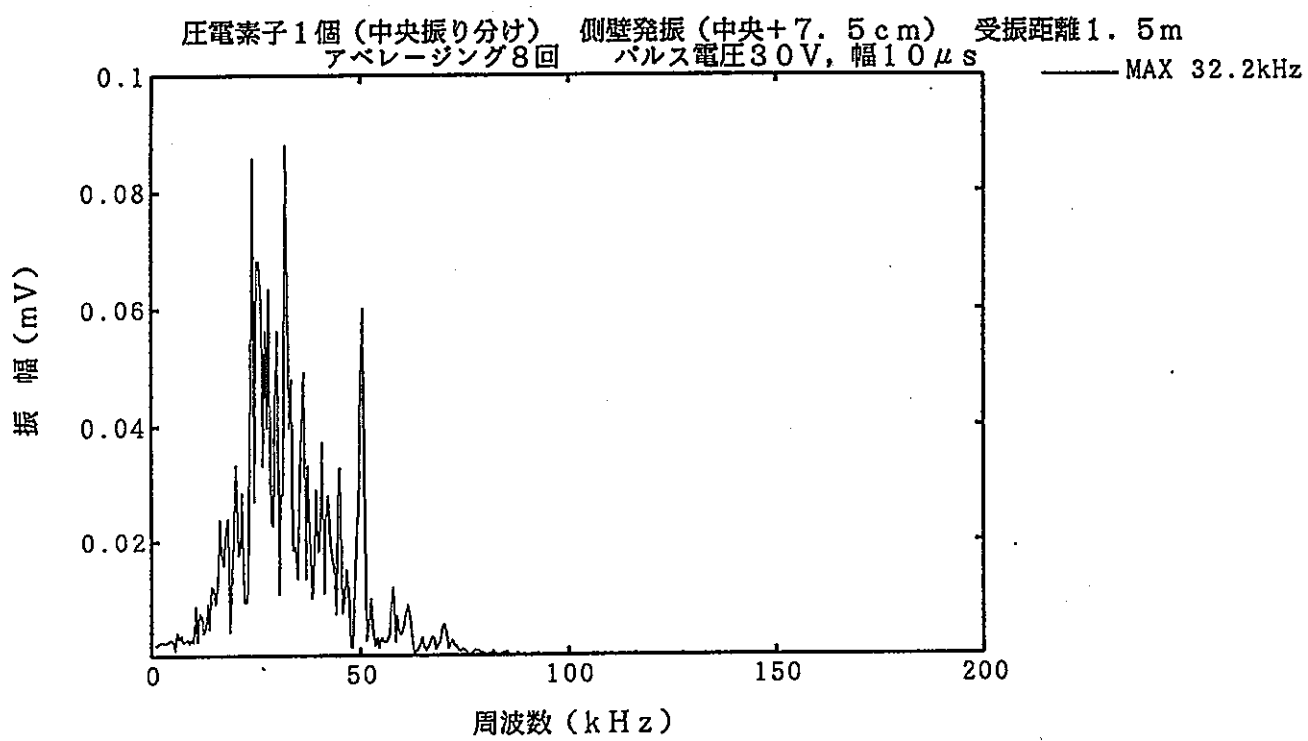


圧電素子2個(中央振り分け) 側壁発振(中央, 中央+2.5cm) 受振距離1.5m
アベレーシング8回 パルス電圧30V, 幅10 μ s

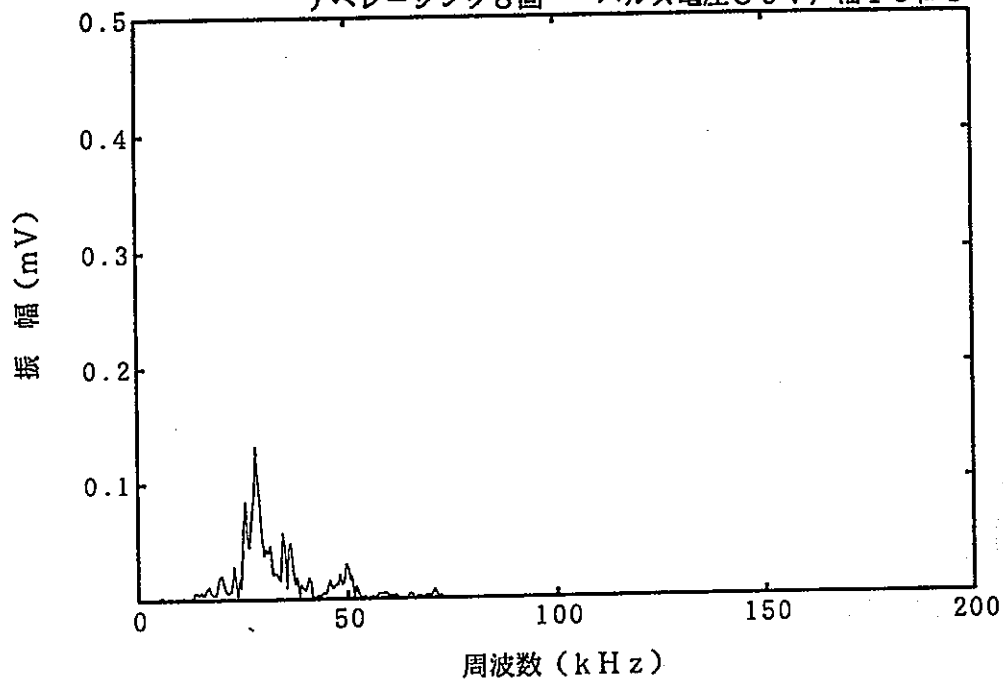




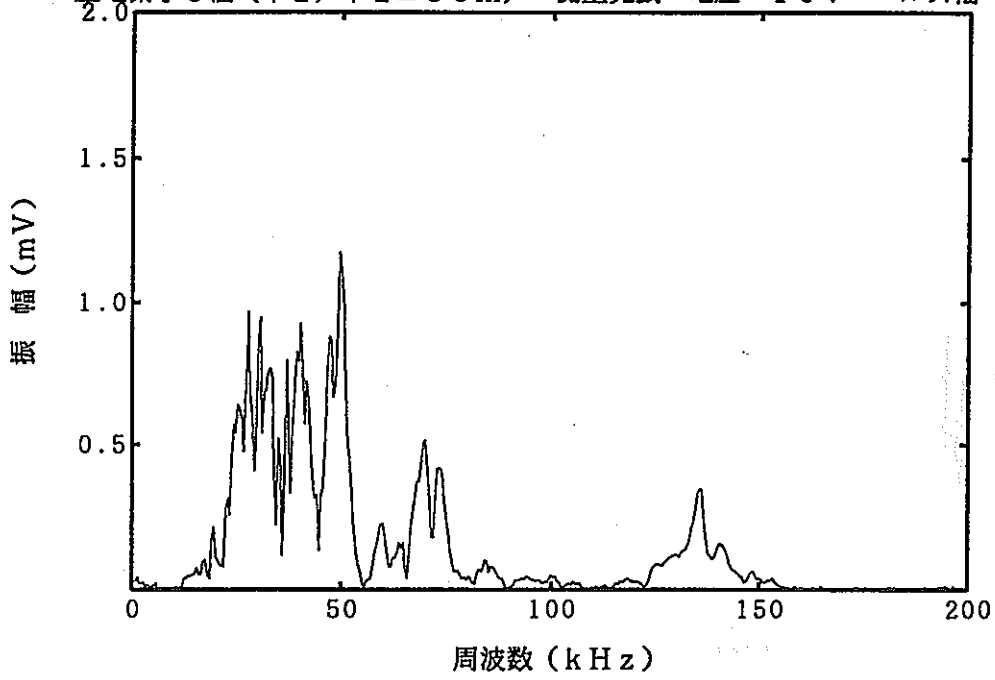




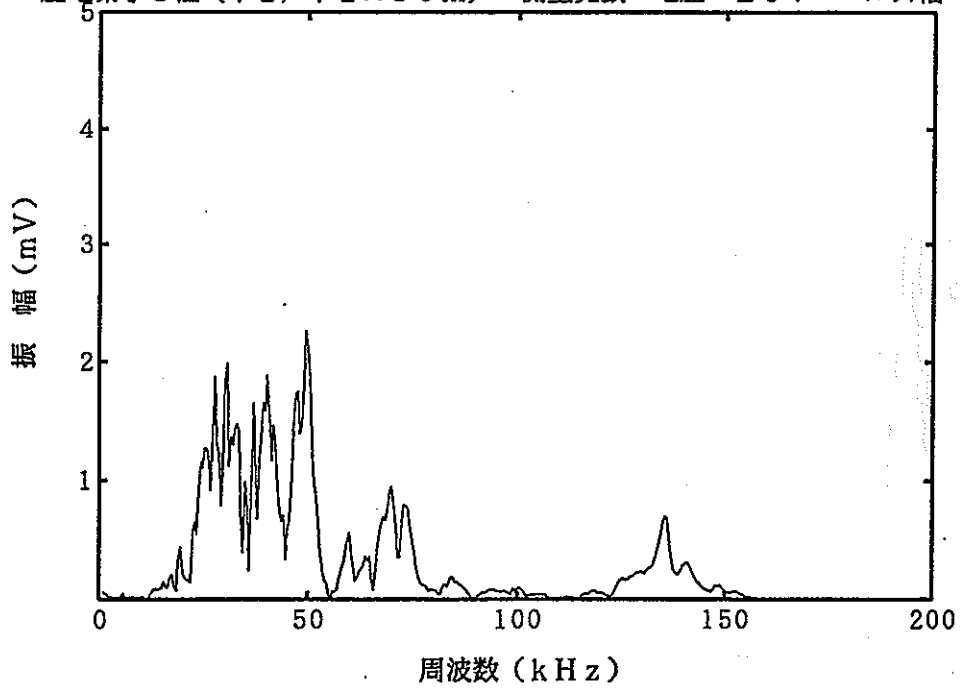
圧電素子1個(中央振り分け) 側壁発振(中央+10cm) 受振距離1.5m
アベレーシング8回 パルス電圧30V, 幅10 μ s MAX 28.3kHz



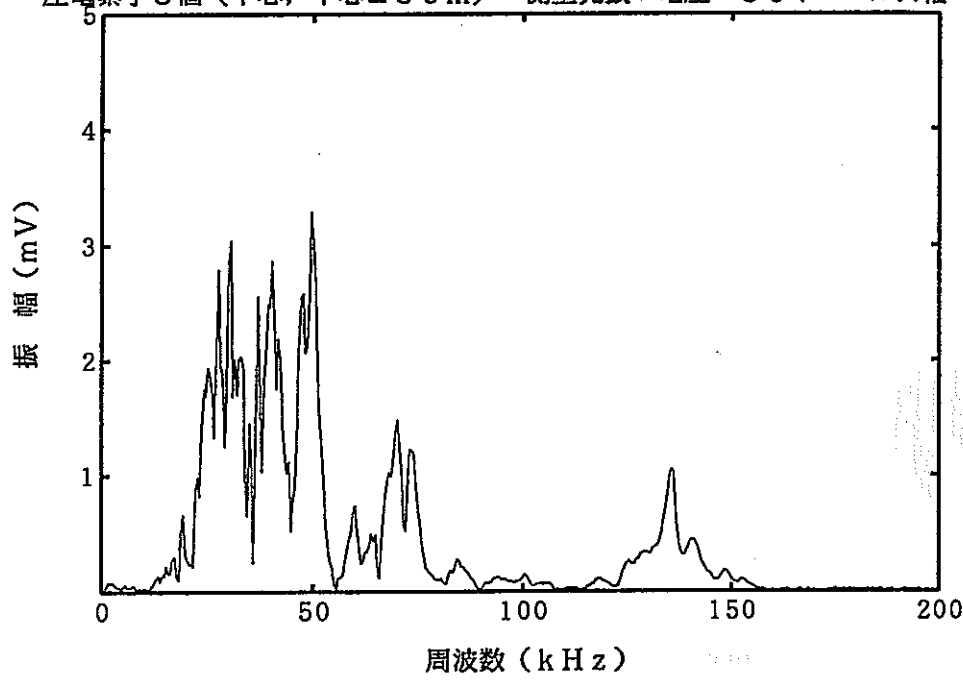
圧電素子3個 (中心, 中心±5 cm) 側壁発振 電圧 10V パルス幅 $5\mu s$ MAX 49.8kHz



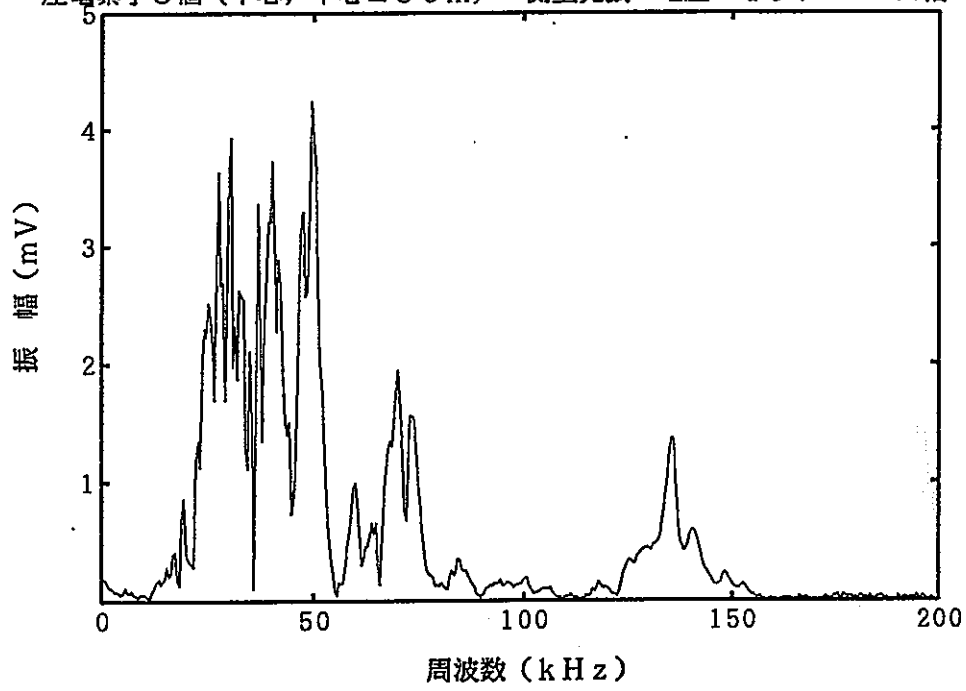
圧電素子3個 (中心, 中心±5 cm) 側壁発振 電圧 20V パルス幅 $5\mu s$ MAX 49.8kHz



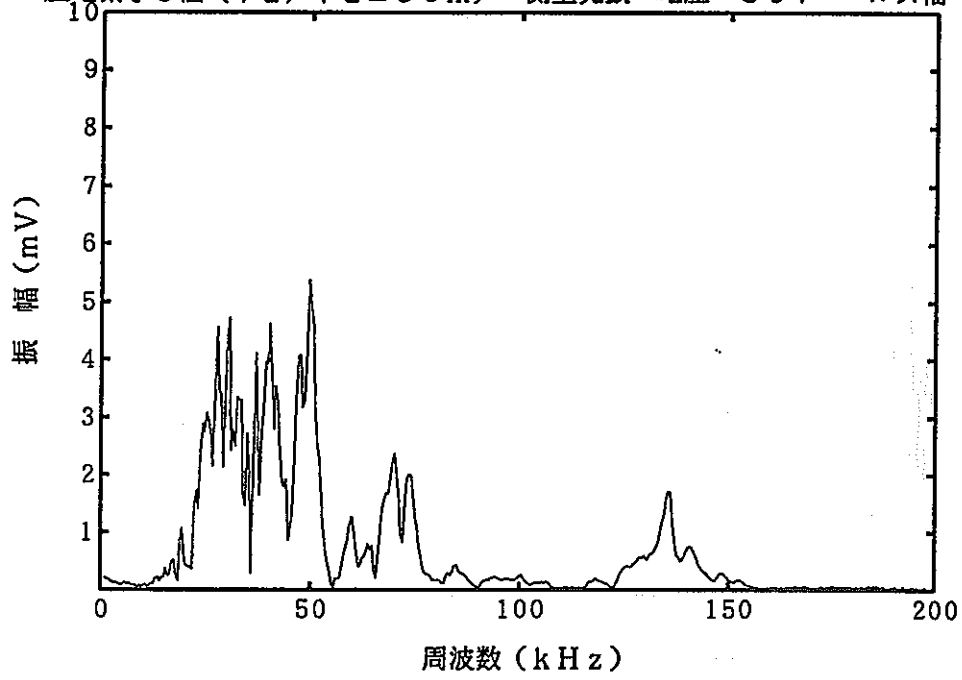
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 30V パルス幅 5 μ s MAX 49.8kHz



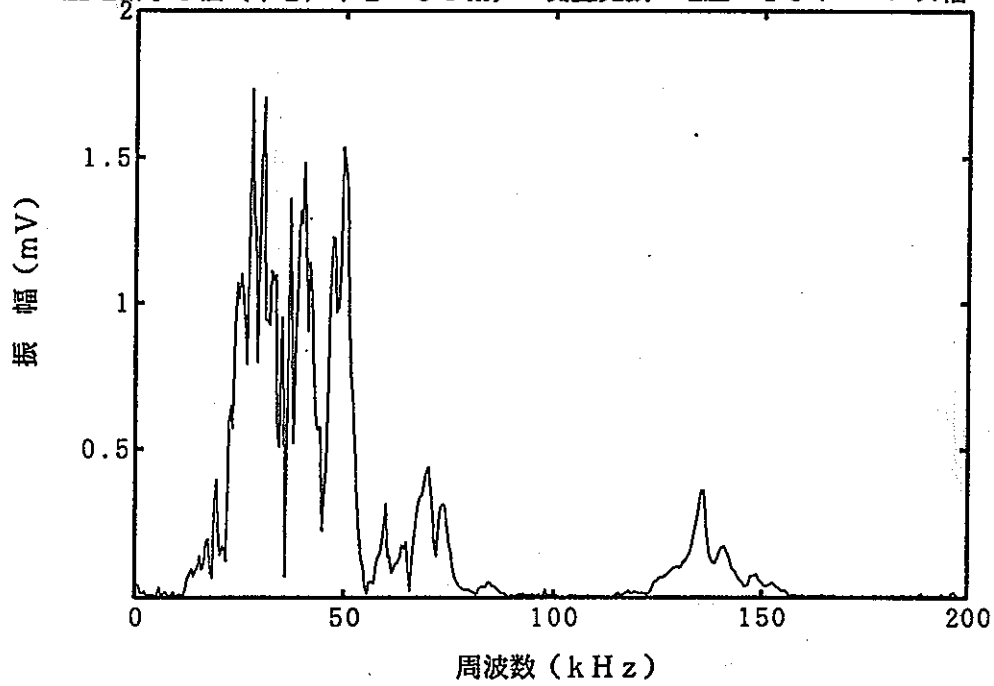
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 40V パルス幅 5 μ s MAX 49.8kHz



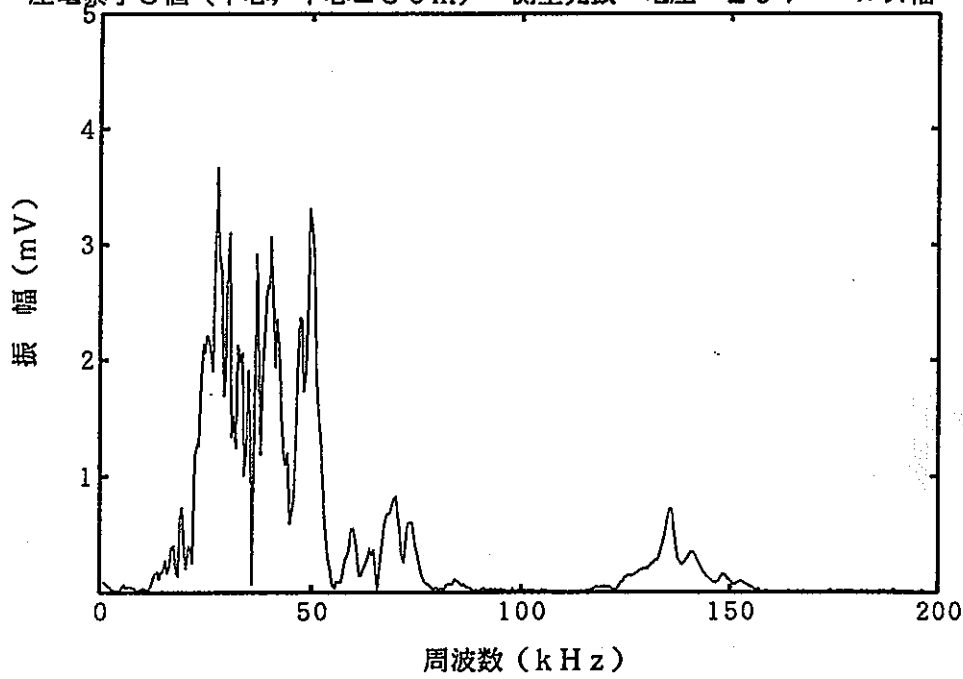
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 50V パルス幅 5 μ s MAX 49.8kHz



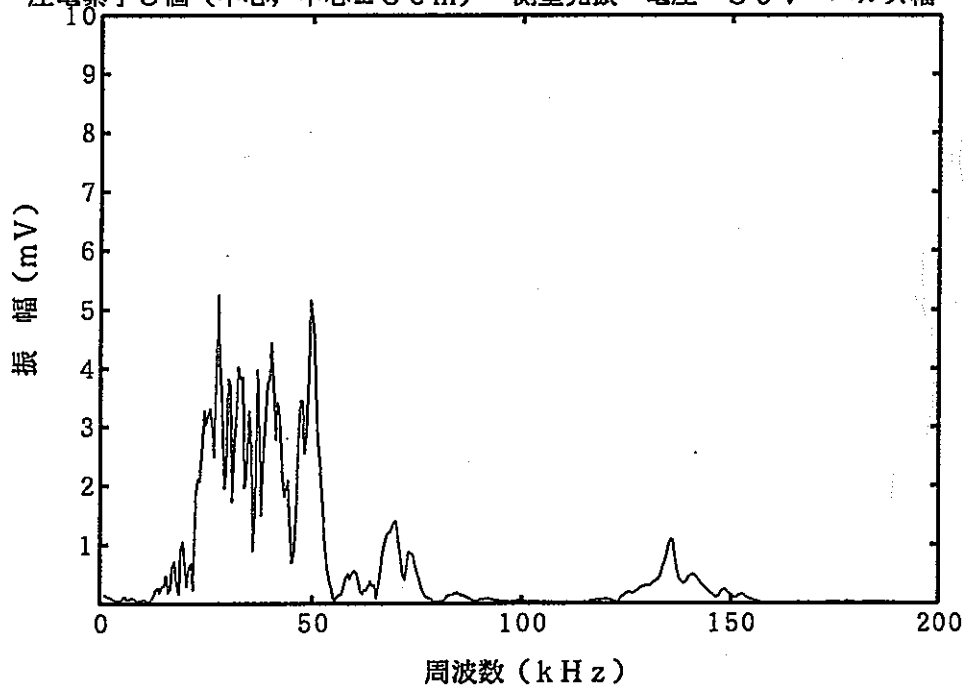
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 10V パルス幅 10 μ s MAX 27.8kHz



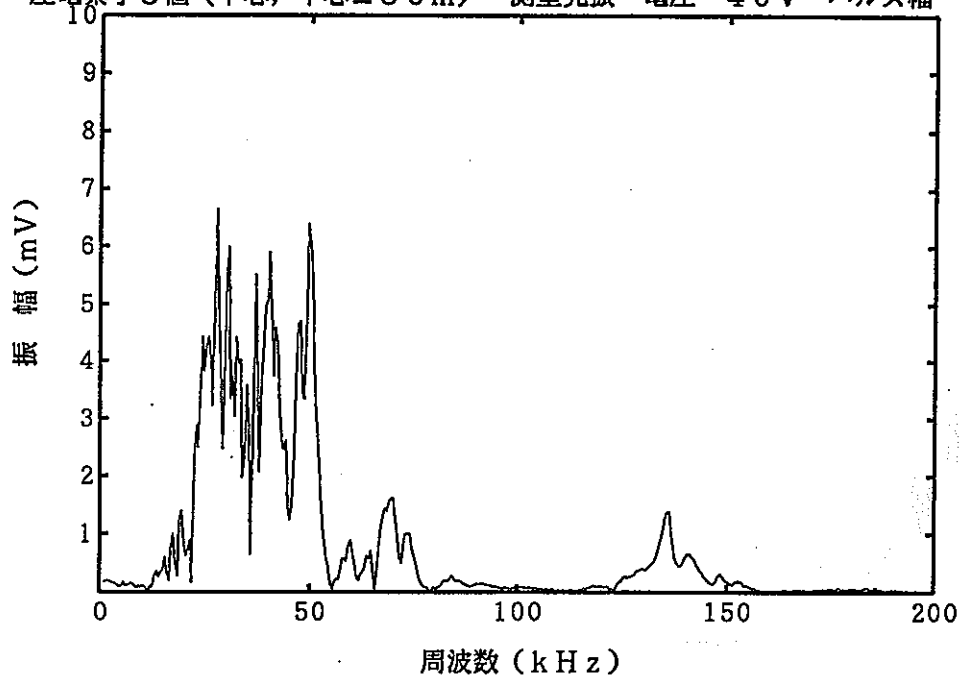
圧電素子3個 (中心, 中心±5 cm) 側壁発振 電圧 20V パルス幅 10 μ s MAX 27.8kHz



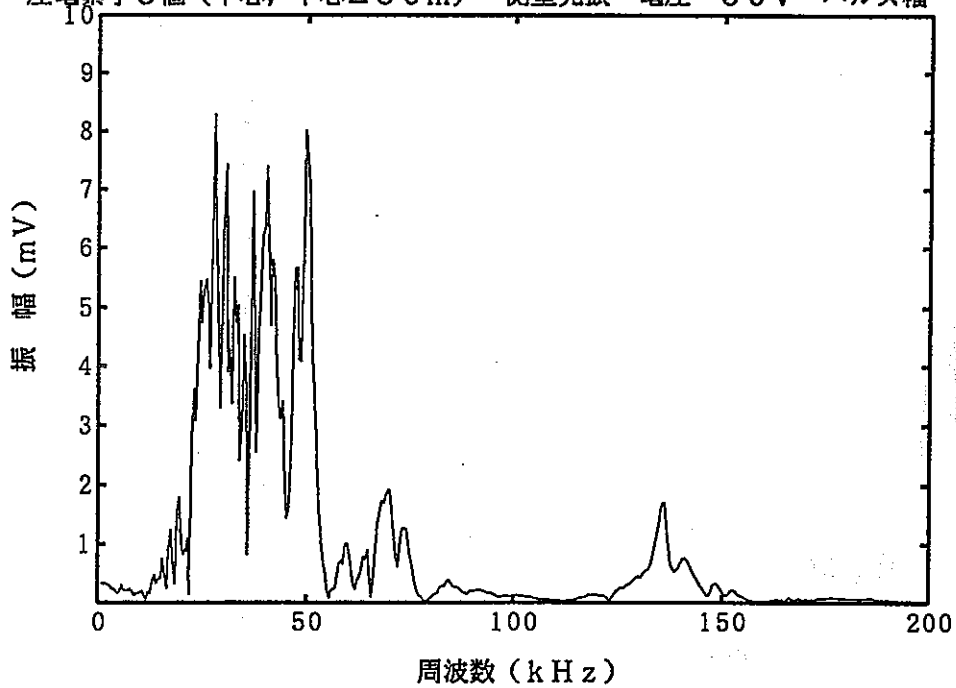
圧電素子3個 (中心, 中心±5 cm) 側壁発振 電圧 30V パルス幅 10 μ s MAX 27.8kHz



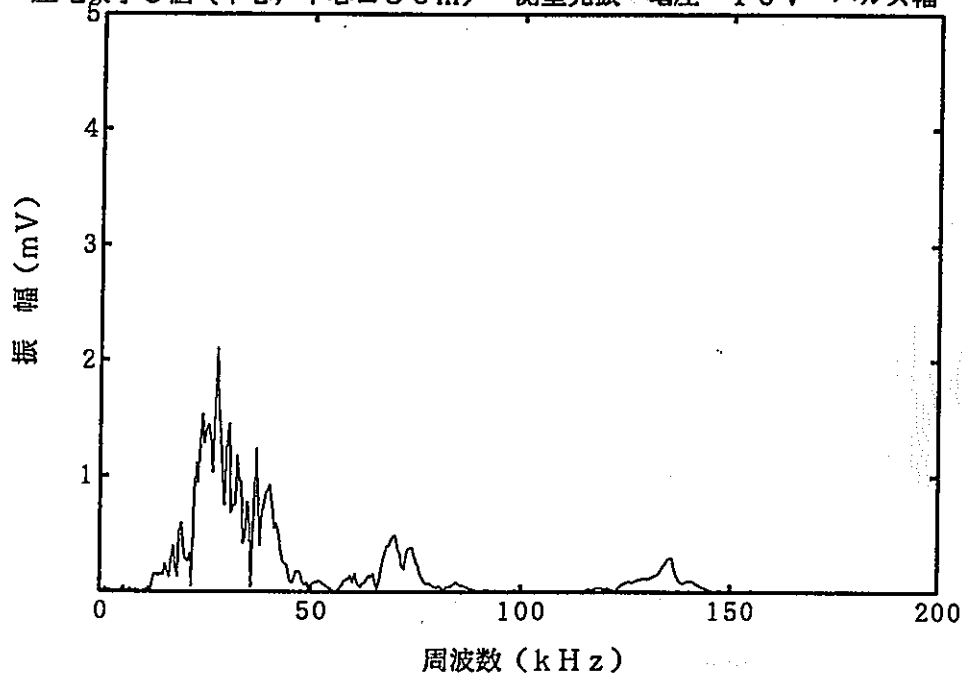
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 40V パルス幅 10 μ s MAX 27.8kHz



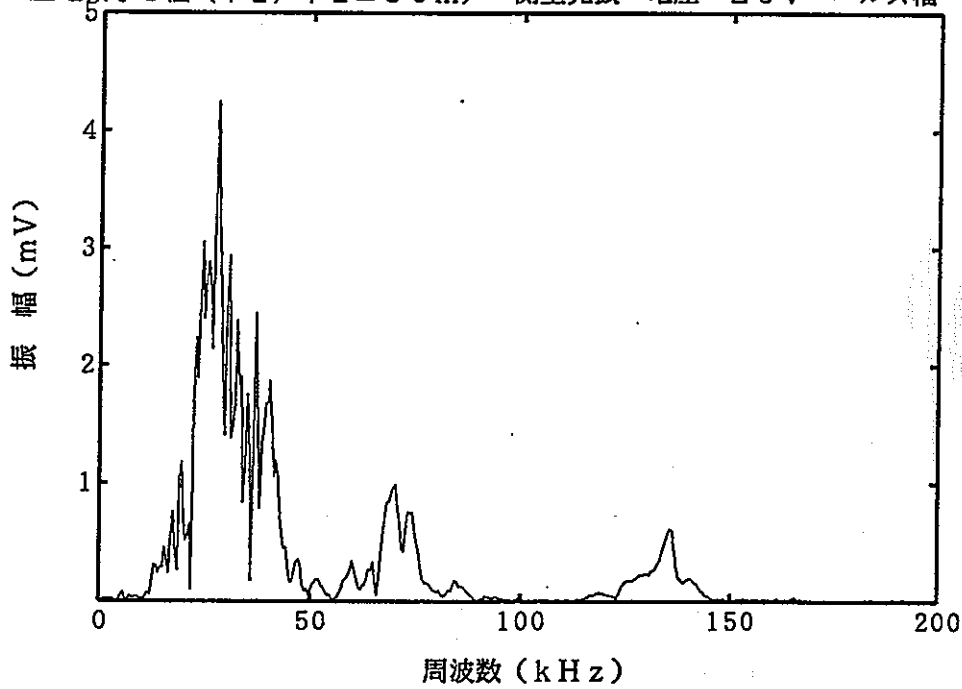
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 50V パルス幅 10 μ s MAX 27.8kHz



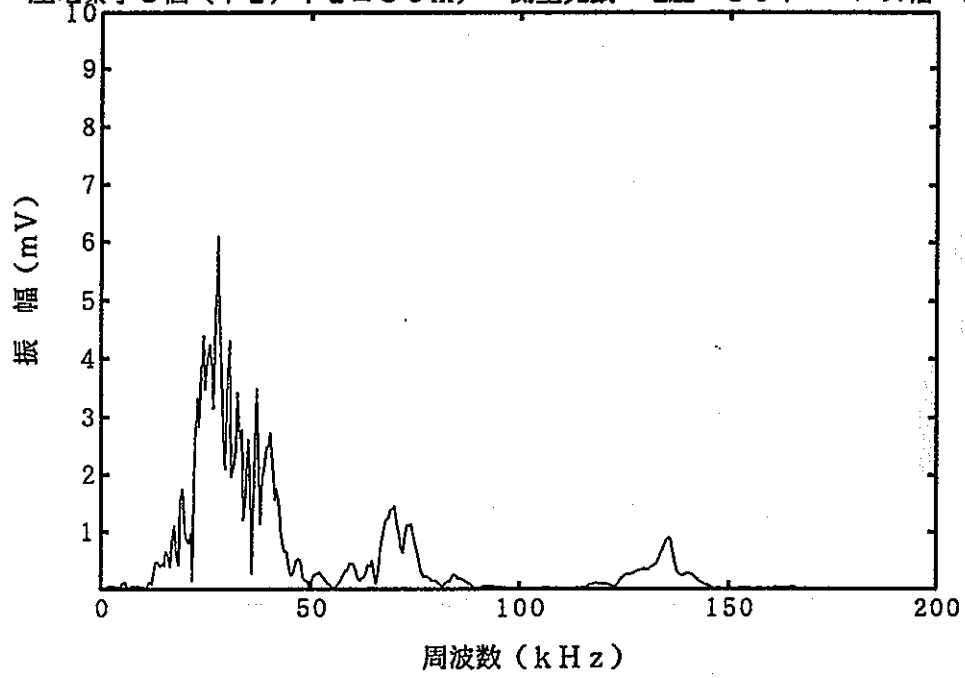
圧電素子3個 (中心, 中心±5 cm) 側壁発振 電圧 10V パルス幅 20 μ s MAX 27.8kHz



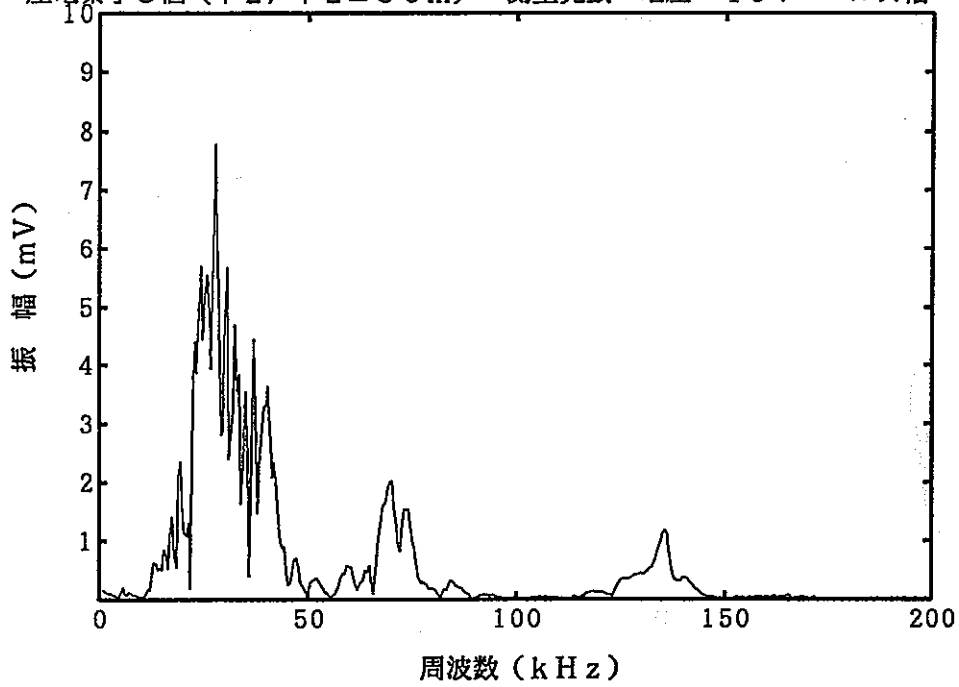
圧電素子3個 (中心, 中心±5 cm) 側壁発振 電圧 20V パルス幅 20 μ s MAX 27.8kHz



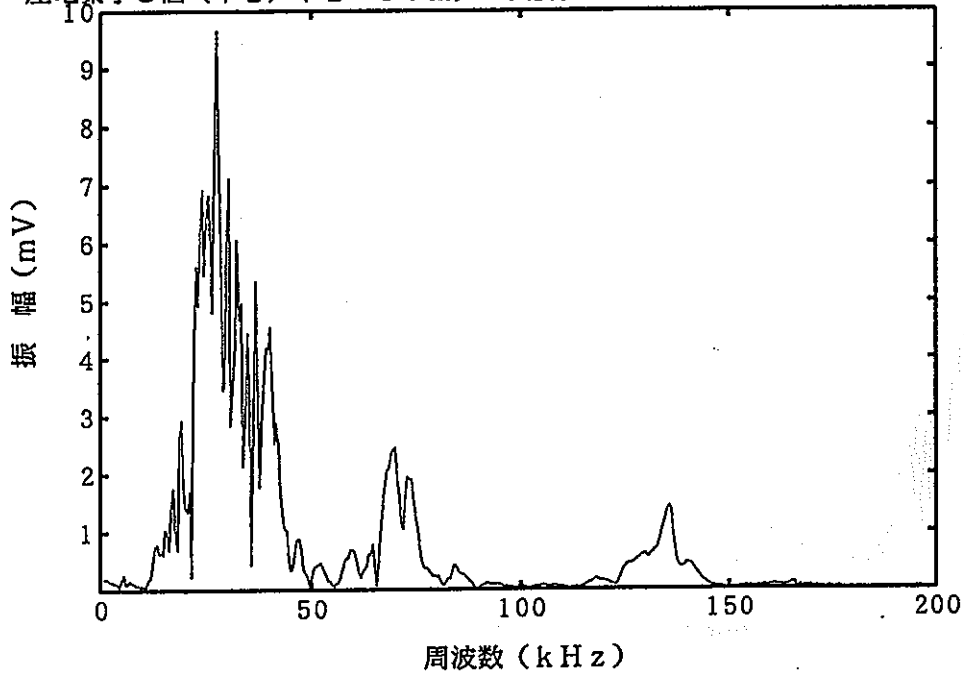
圧電素子3個 (中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 30V パルス幅 20 μ s MAX 27.8kHz



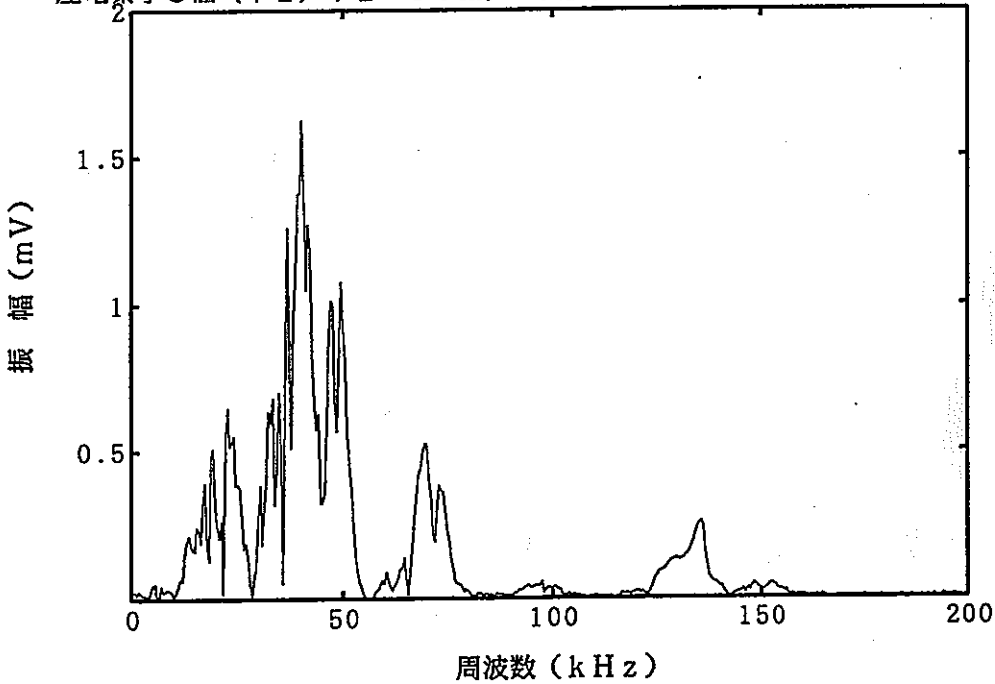
圧電素子3個 (中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 40V パルス幅 20 μ s MAX 27.8kHz



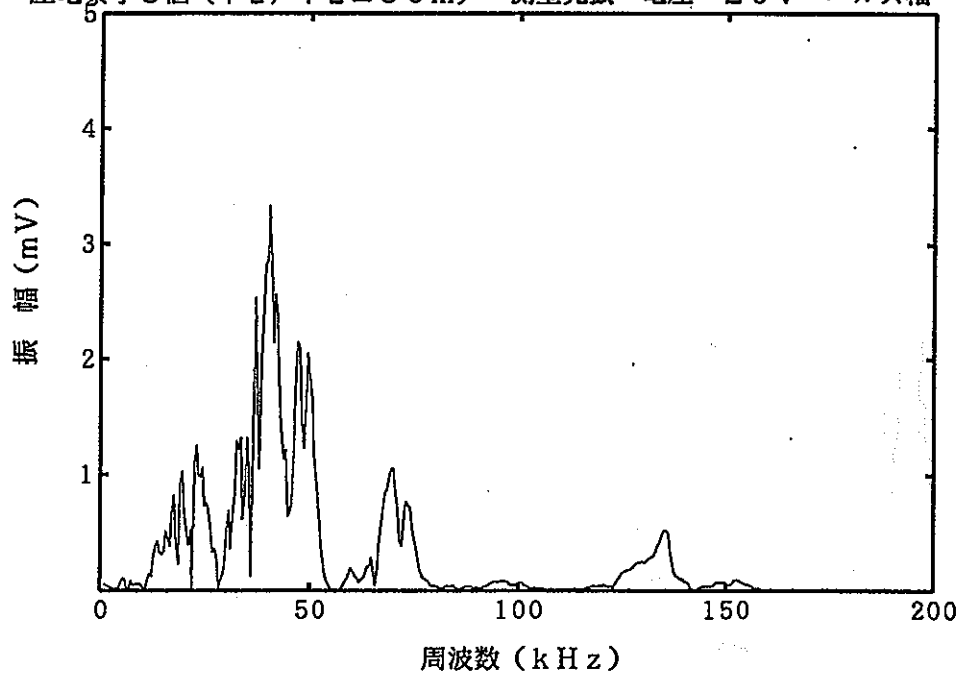
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 50V パルス幅 20 μ s MAX 27.8kHz



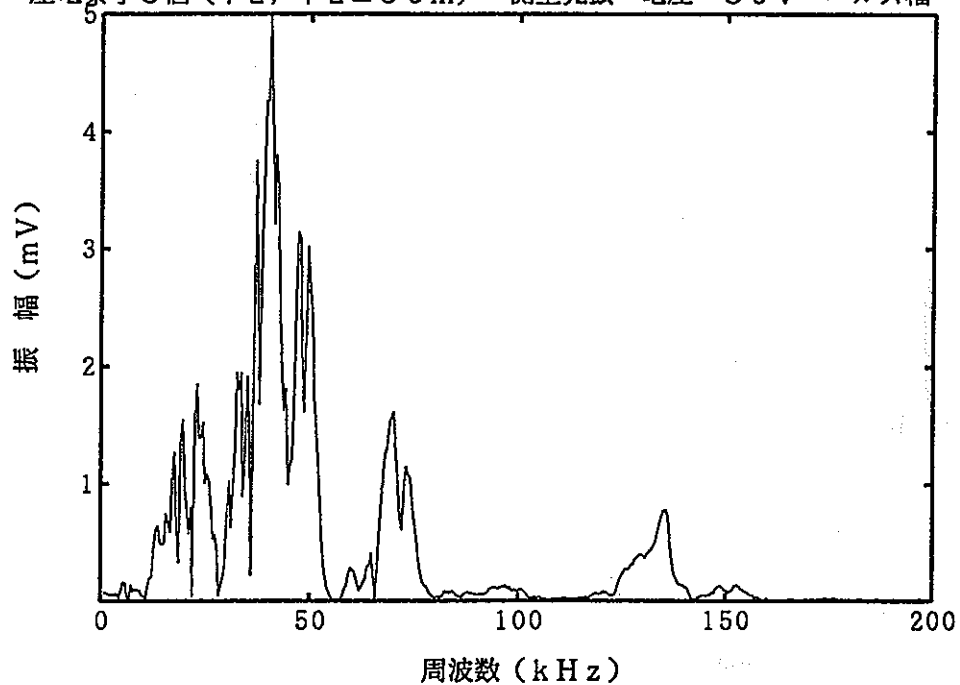
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 10V パルス幅 35 μ s MAX 40.5kHz



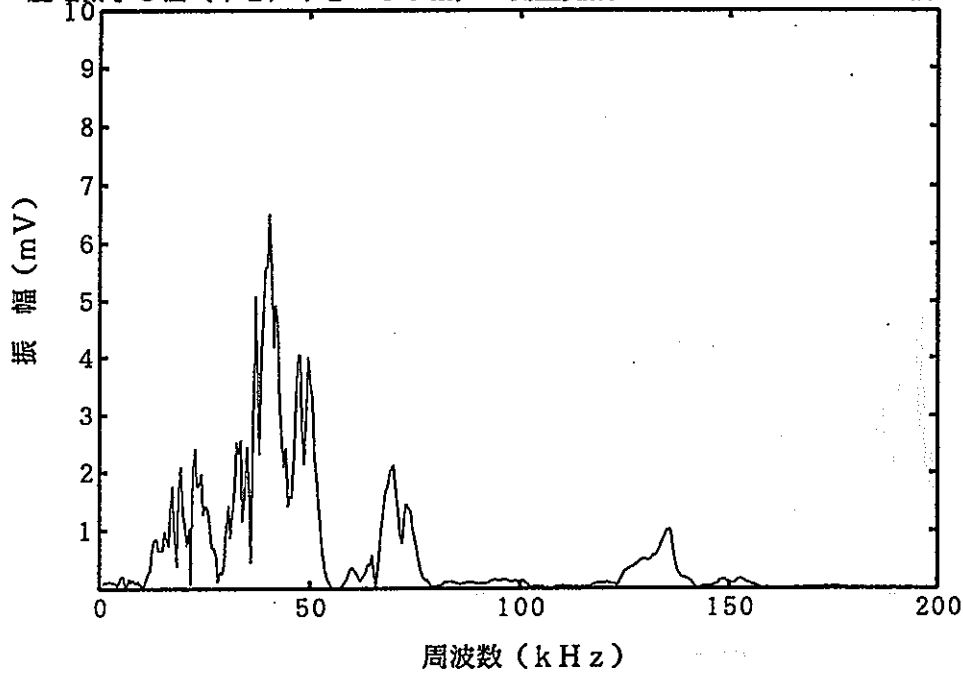
圧電素子3個 (中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 20V パルス幅 35 μ s MAX 40.5kHz



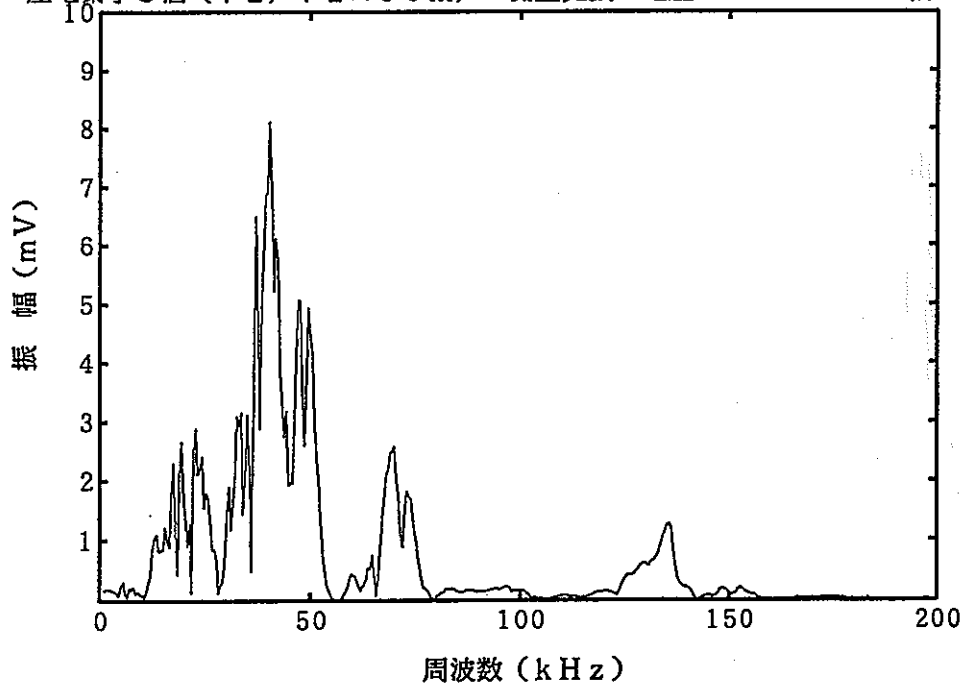
圧電素子3個 (中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 30V パルス幅 35 μ s MAX 40.5kHz



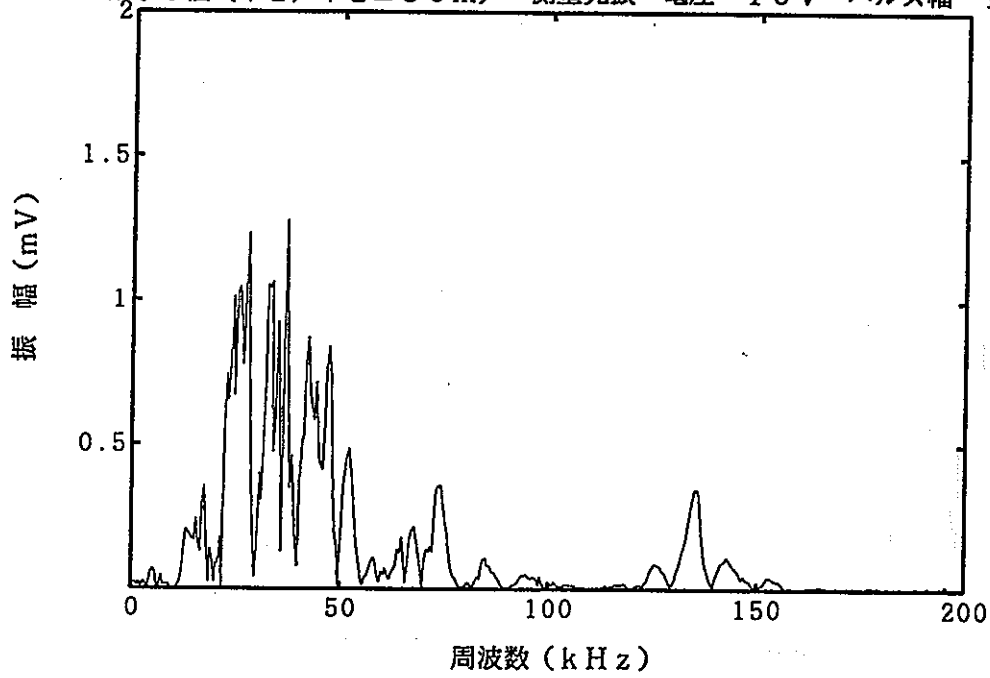
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 40V パルス幅 35 μ s MAX 40.5kHz



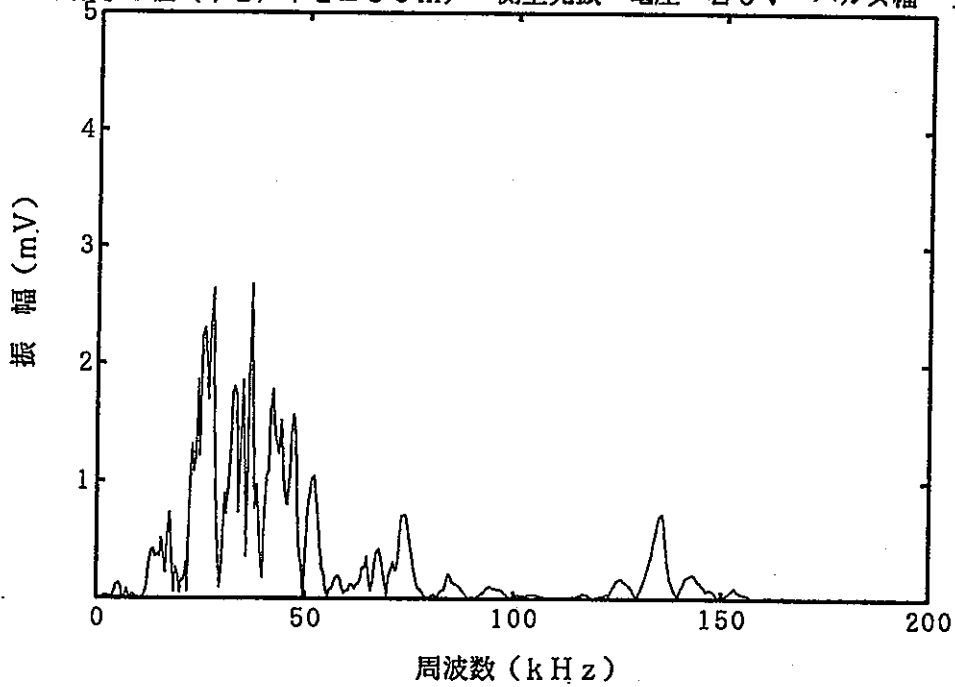
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 50V パルス幅 35 μ s MAX 40.5kHz



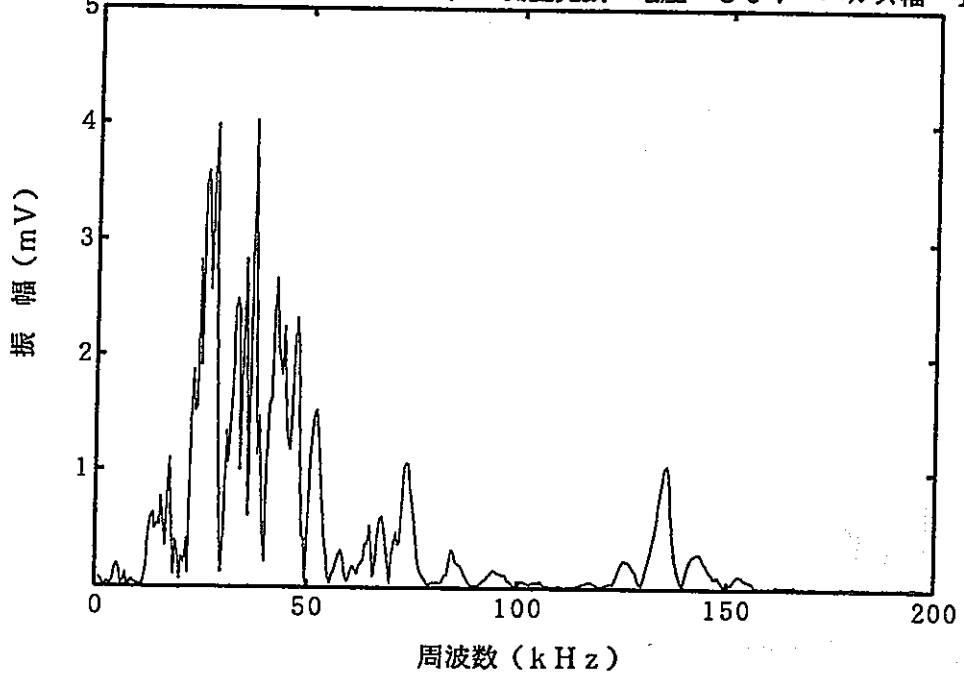
圧電素子3個 (中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 10V パルス幅 100 μ s MAX 37.1kHz



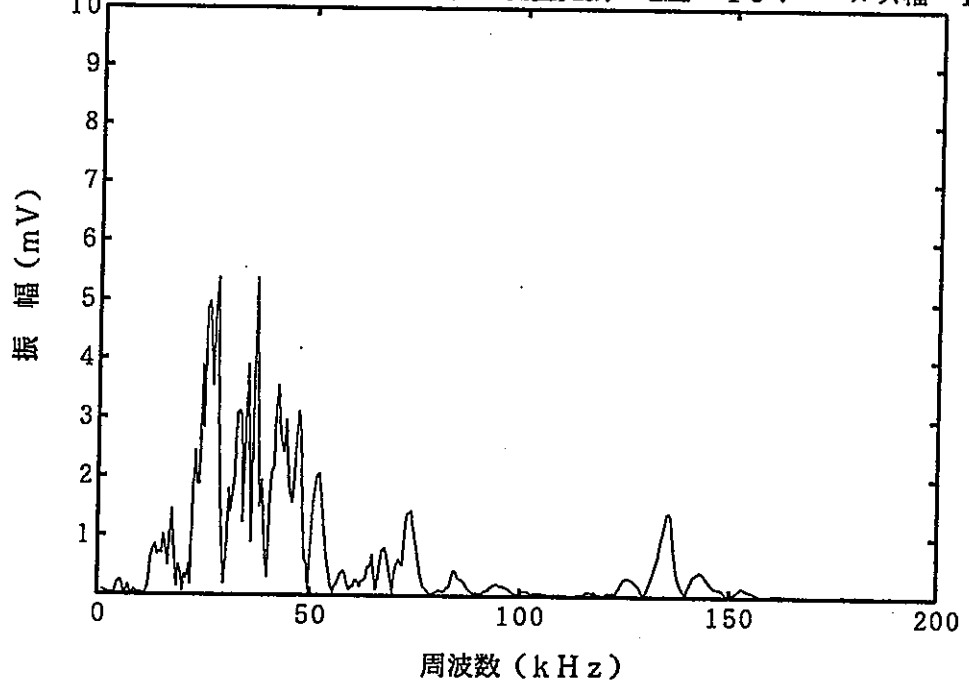
圧電素子3個 (中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 20V パルス幅 100 μ s MAX 37.1kHz



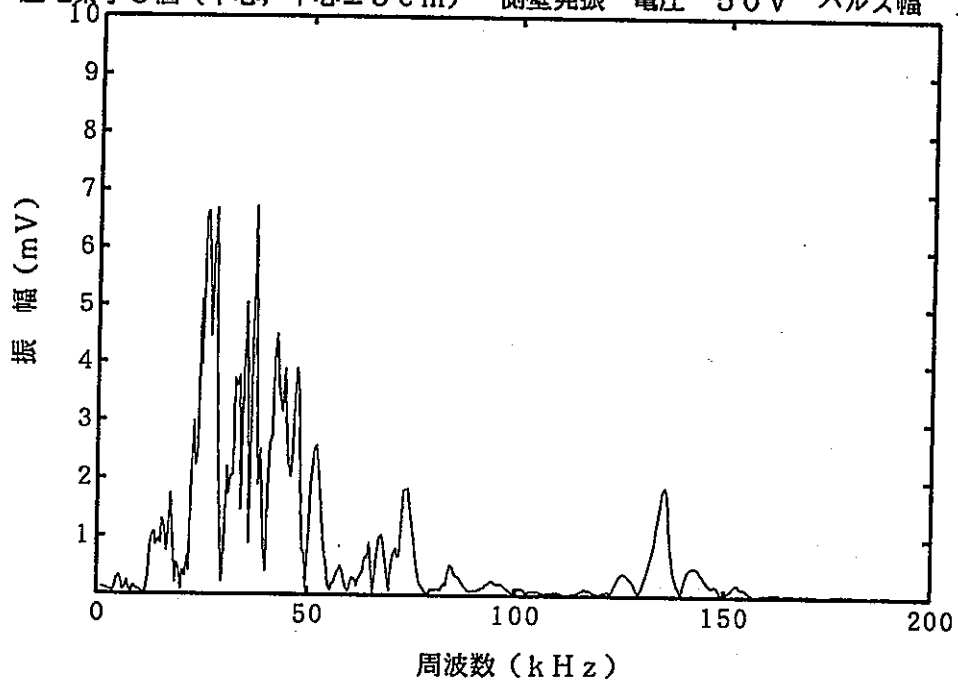
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 30V パルス幅 100 μ s MAX 37.1kHz



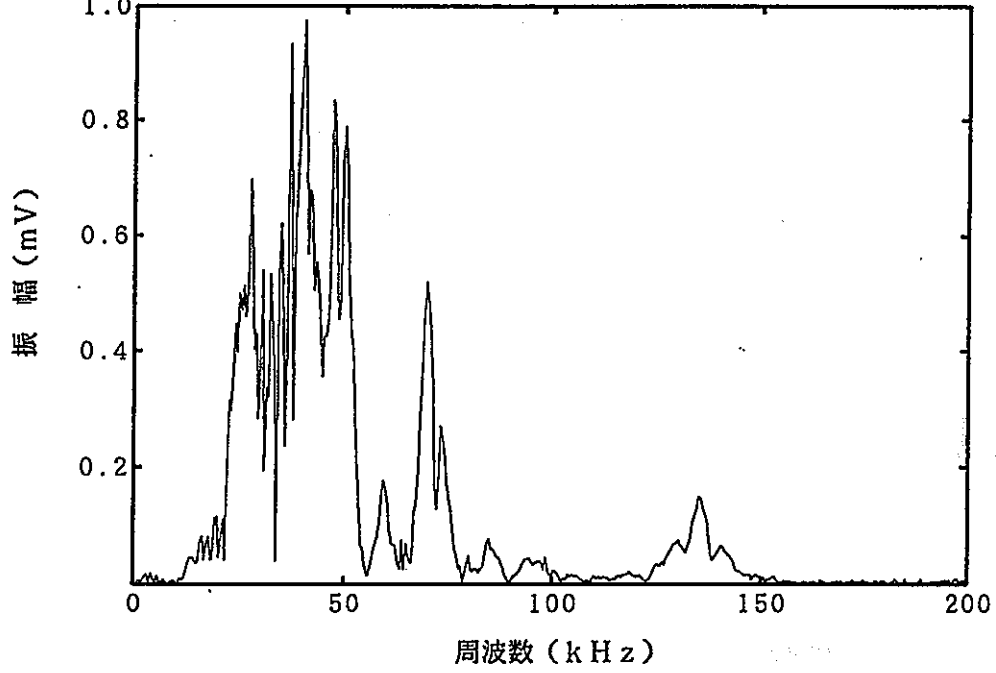
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 40V パルス幅 100 μ s MAX 37.1kHz



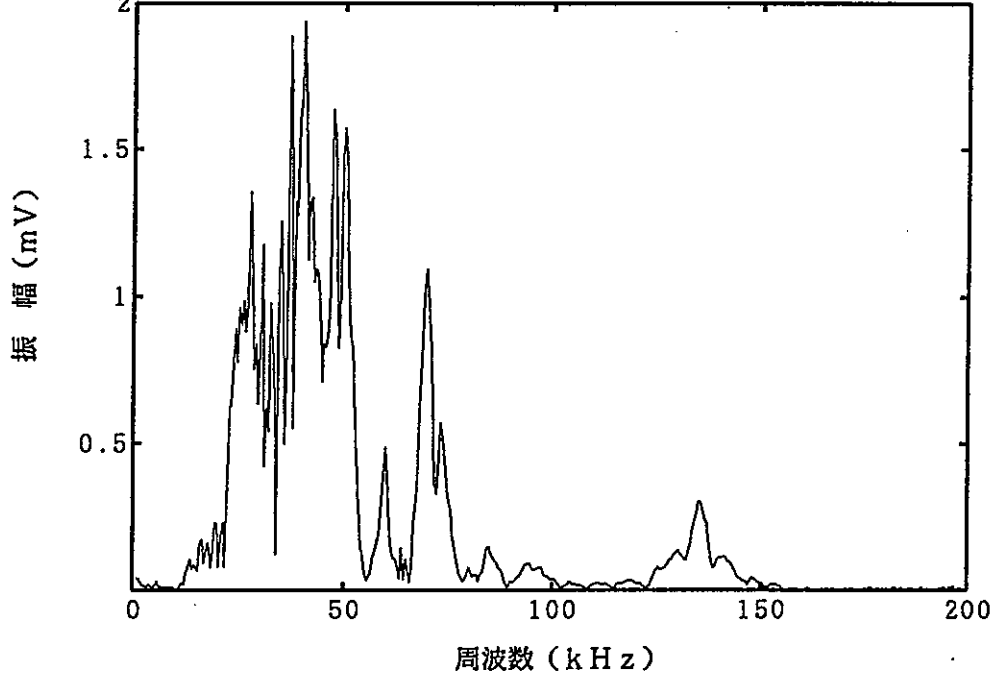
圧電素子3個(中心, 中心±5cm) 側壁発振 電圧 50V パルス幅 100 μ s MAX 37.1kHz



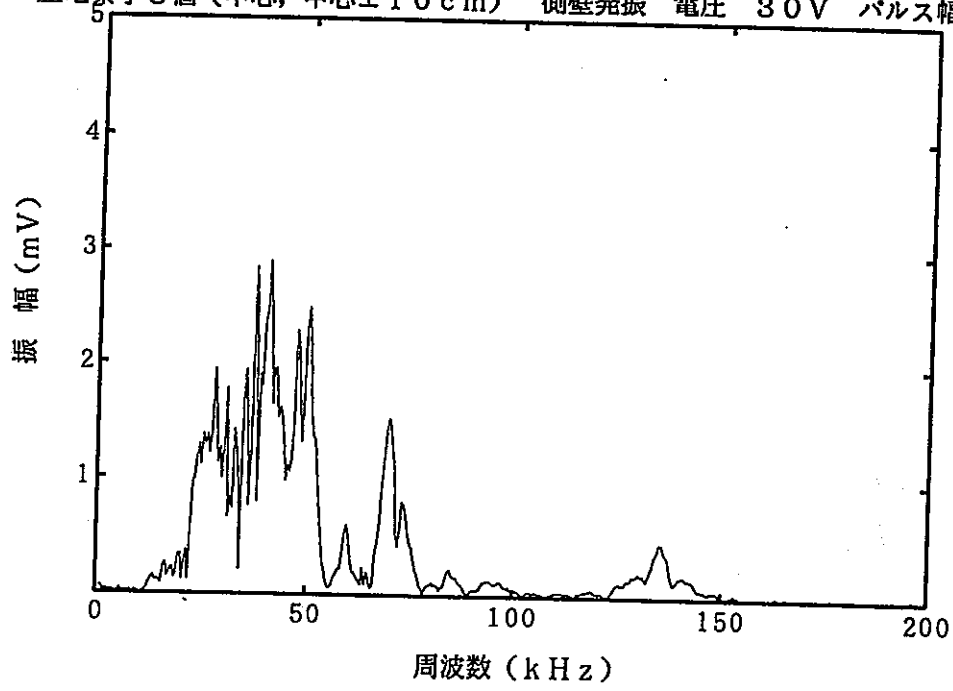
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 10V パルス幅 5 μ s MAX 40.5kHz



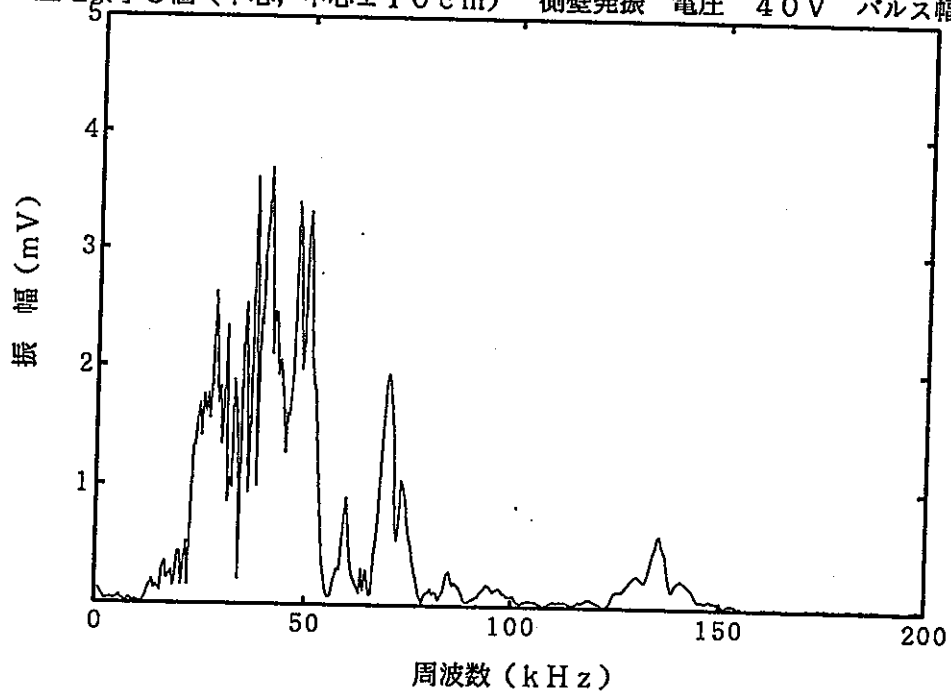
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 20V パルス幅 5 μ s MAX 40.5kHz



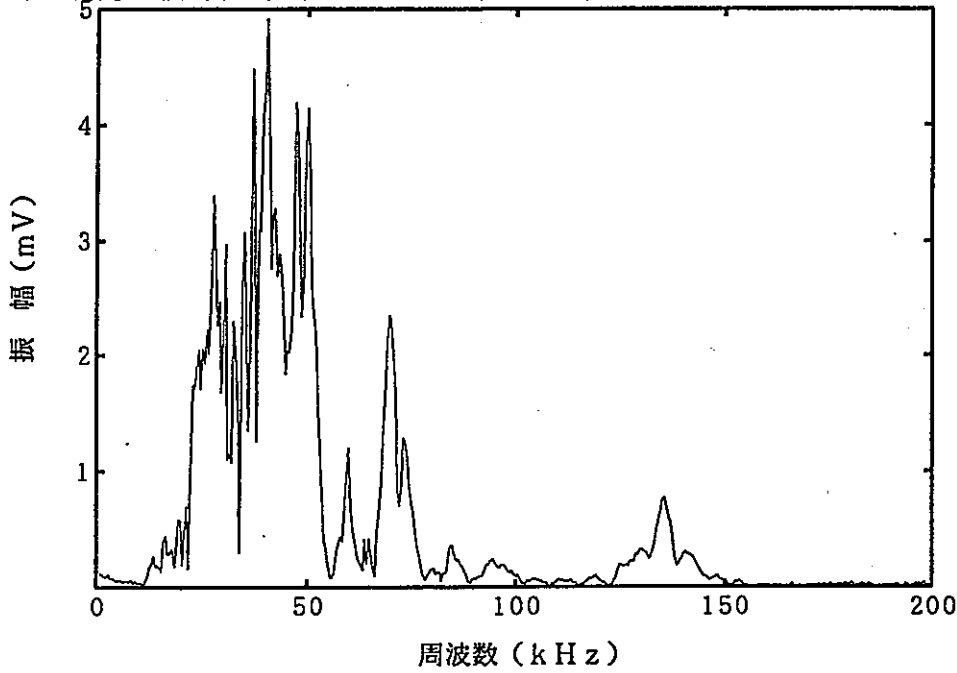
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 30V パルス幅 5 μ s MAX 40.5kHz



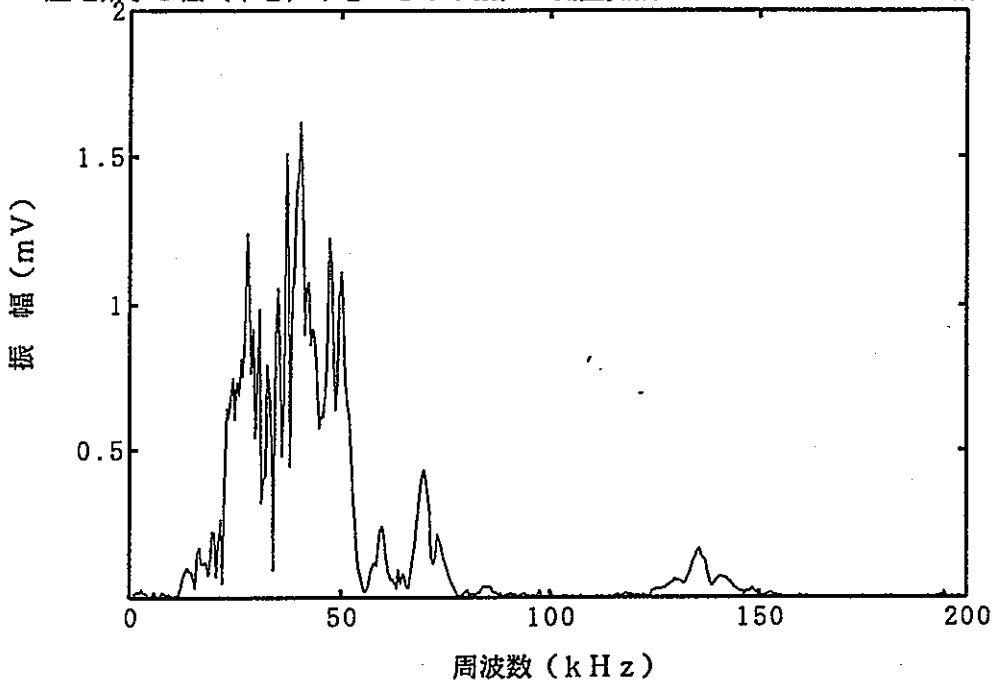
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 40V パルス幅 5 μ s MAX 40.5kHz



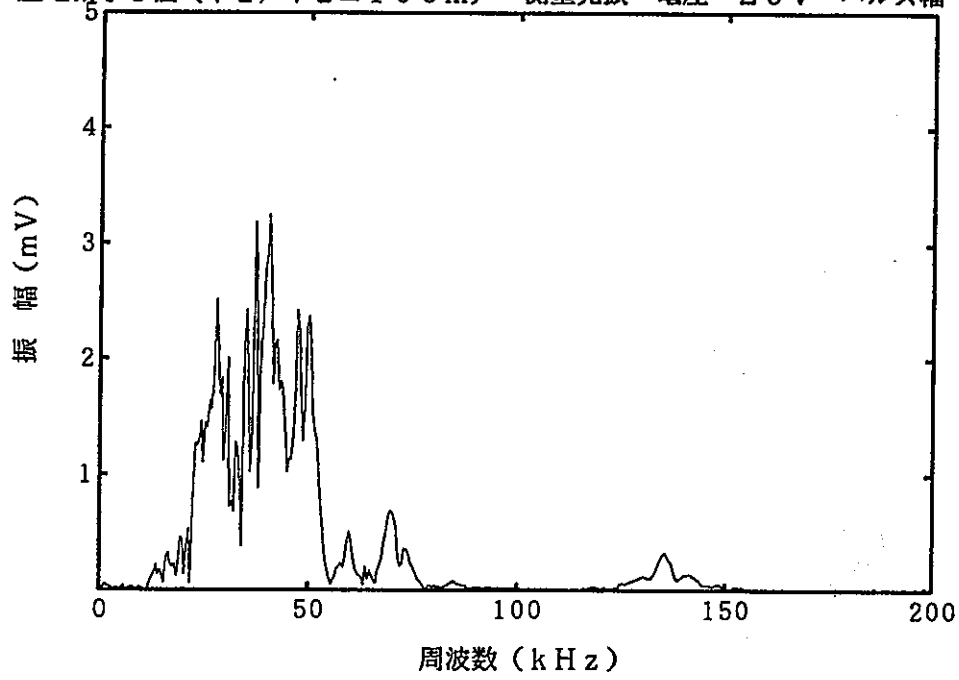
圧電素子3個 (中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 50V パルス幅 5 μ s MAX 40.5kHz



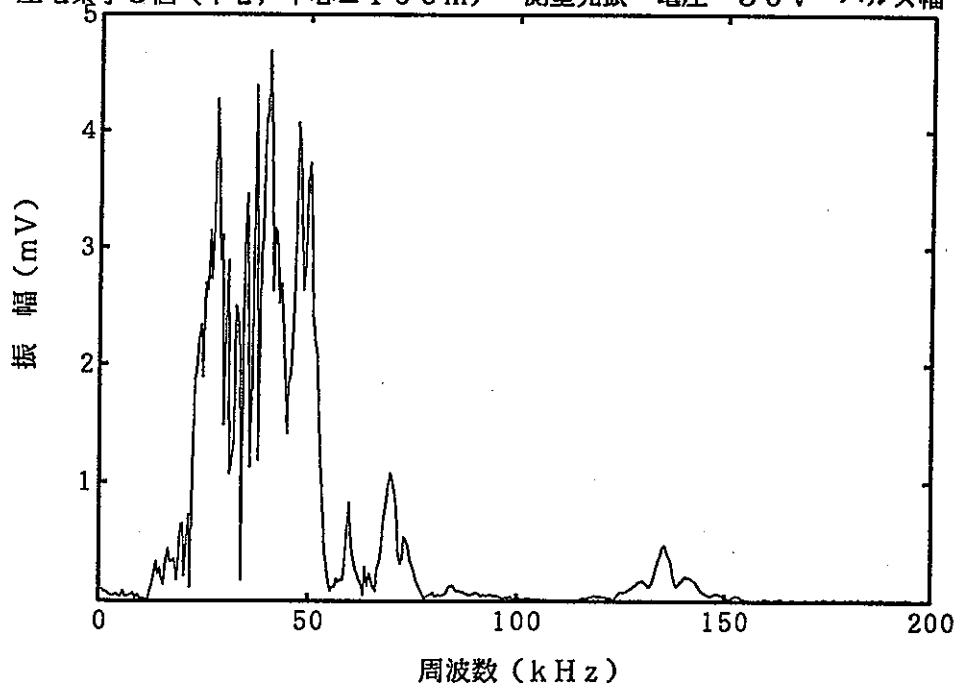
圧電素子3個 (中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 10V パルス幅 10 μ s MAX 40.5kHz



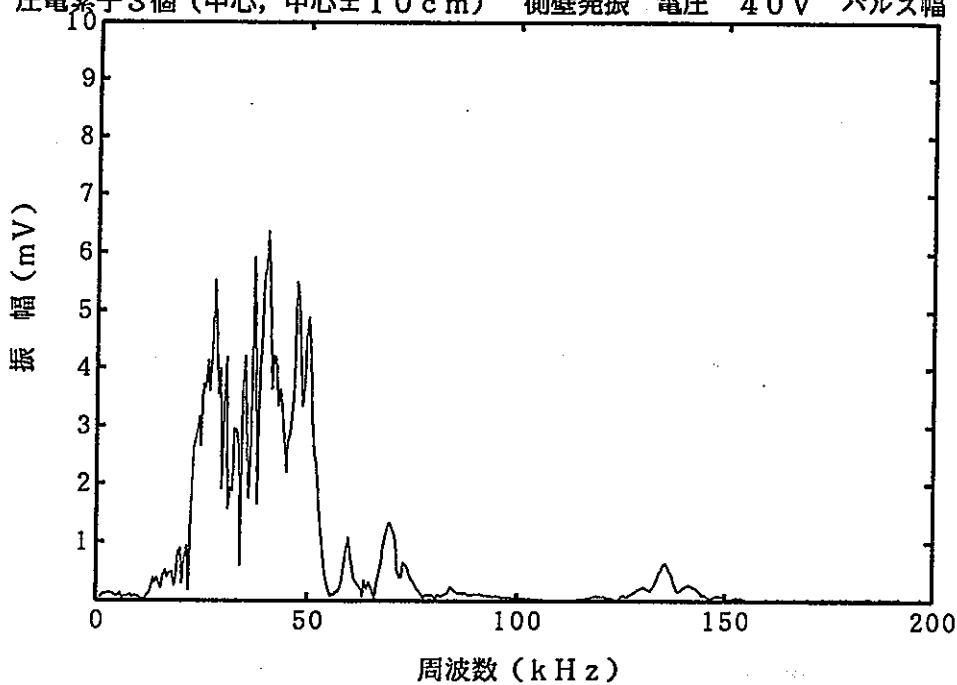
圧電素子3個 (中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 20V パルス幅 10 μ s MAX 40.5kHz



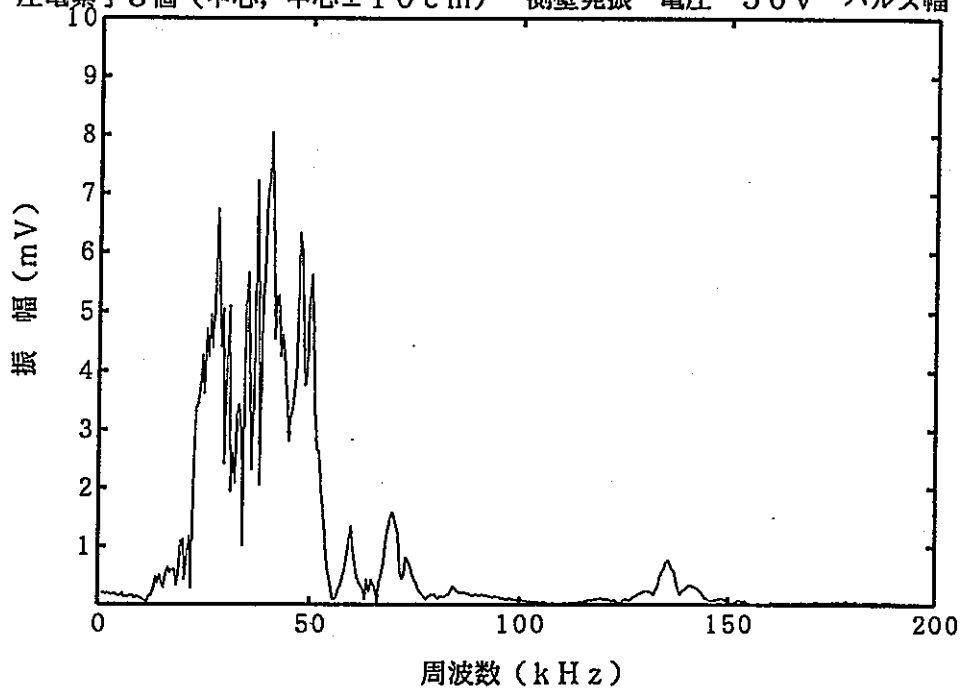
圧電素子3個 (中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 30V パルス幅 10 μ s MAX 40.5kHz



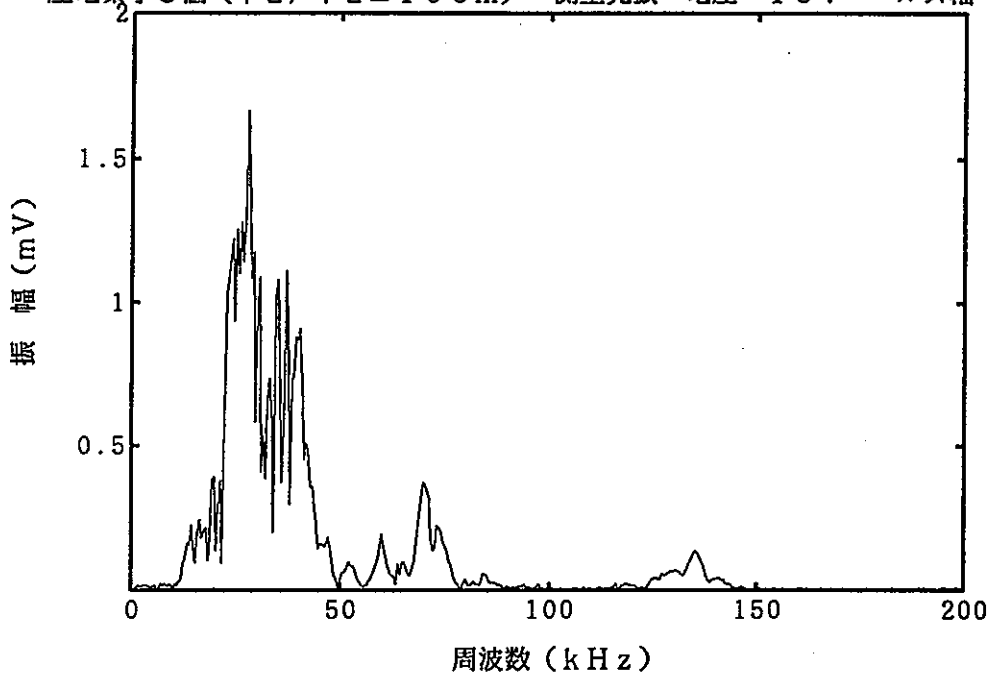
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 40V パルス幅 10 μ s MAX 40.5kHz



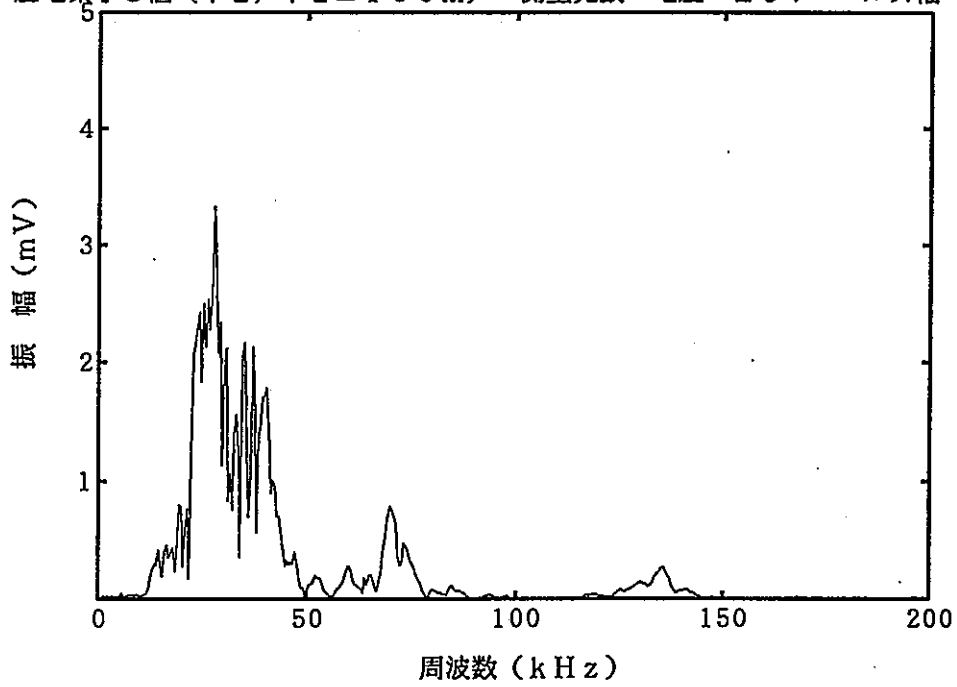
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 50V パルス幅 10 μ s MAX 40.5kHz



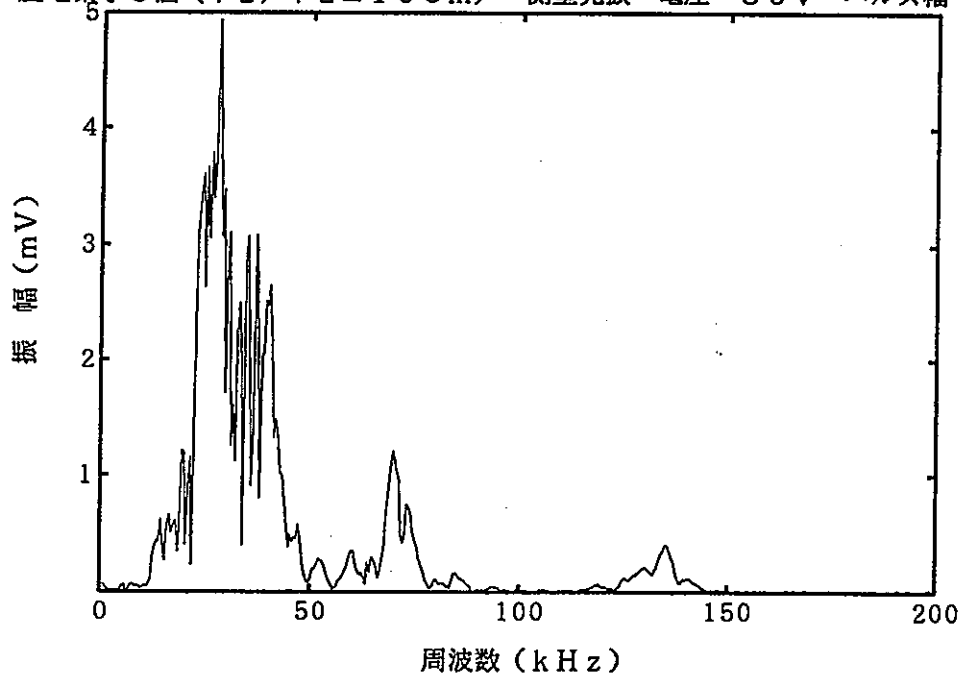
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 10V パルス幅 20 μ s MAX 27.8kHz



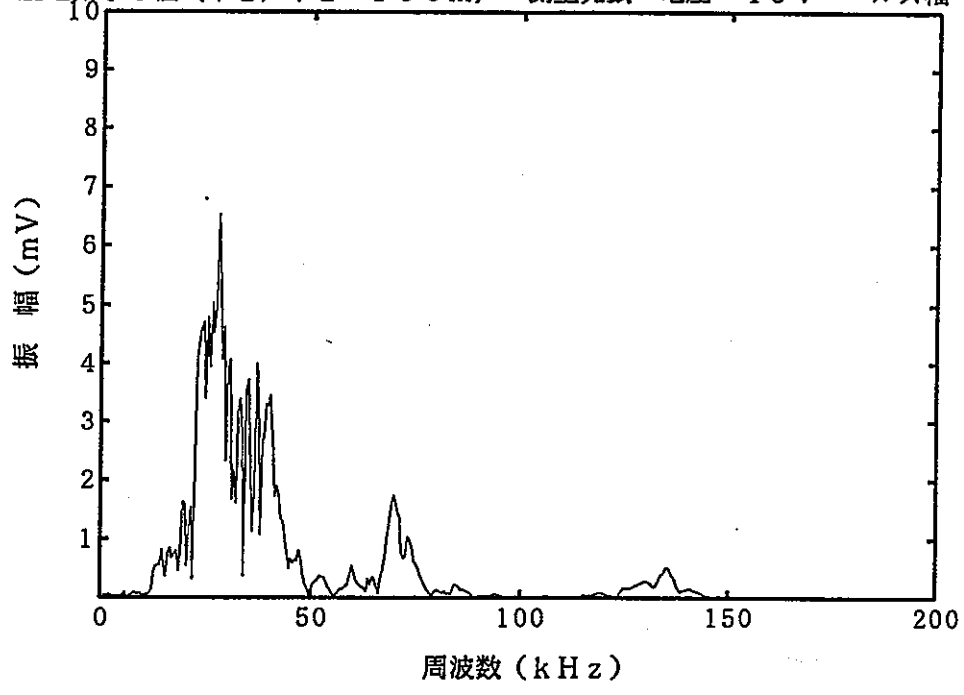
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 20V パルス幅 20 μ s MAX 27.8kHz



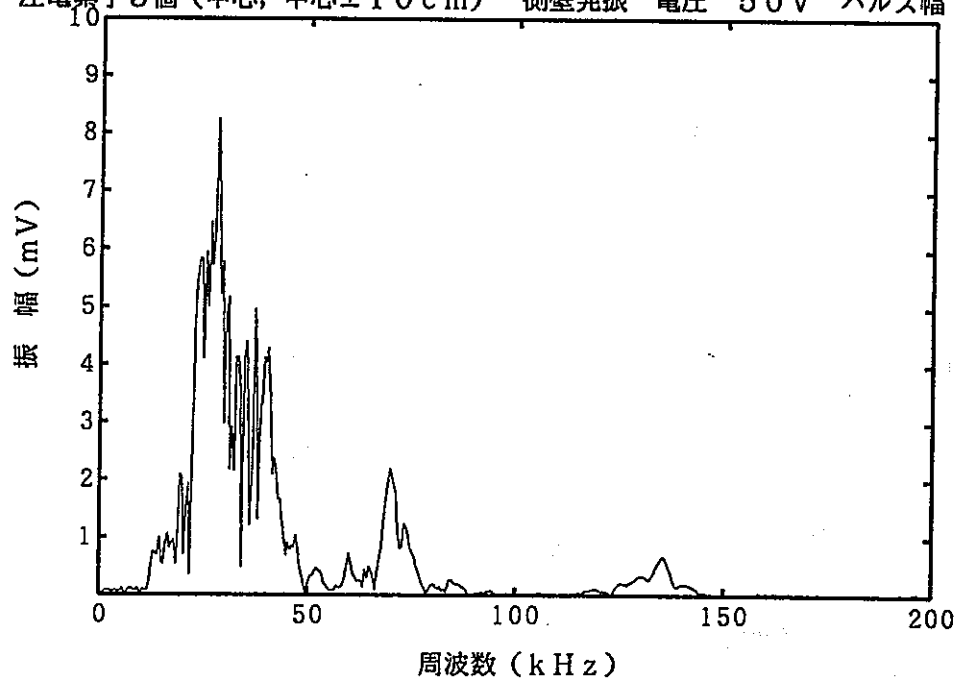
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 30V パルス幅 20 μ s MAX 27.8kHz



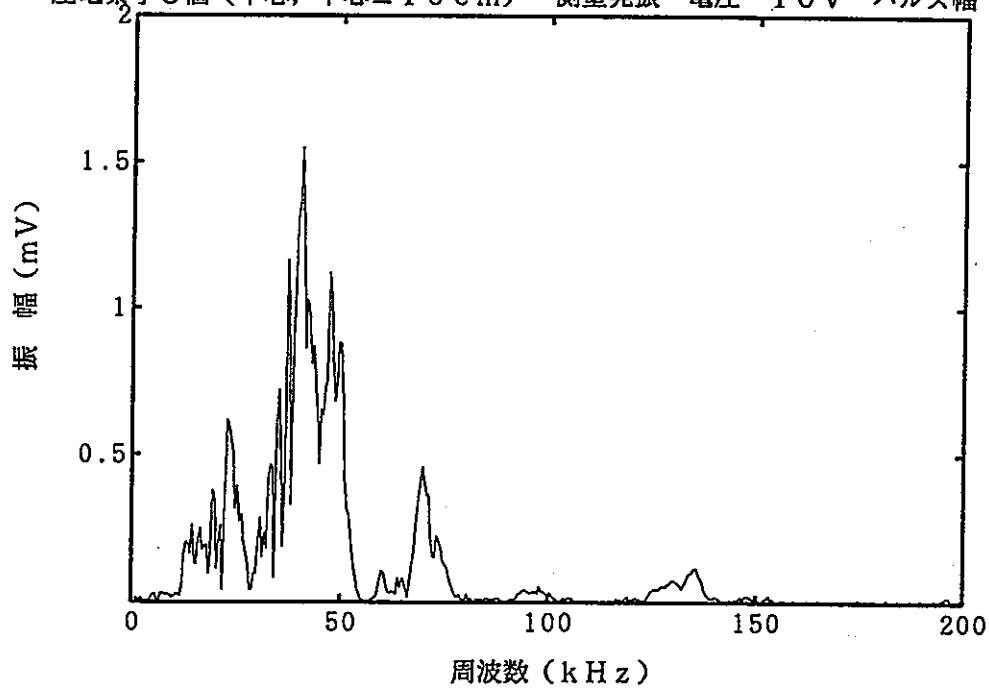
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 40V パルス幅 20 μ s MAX 27.8kHz



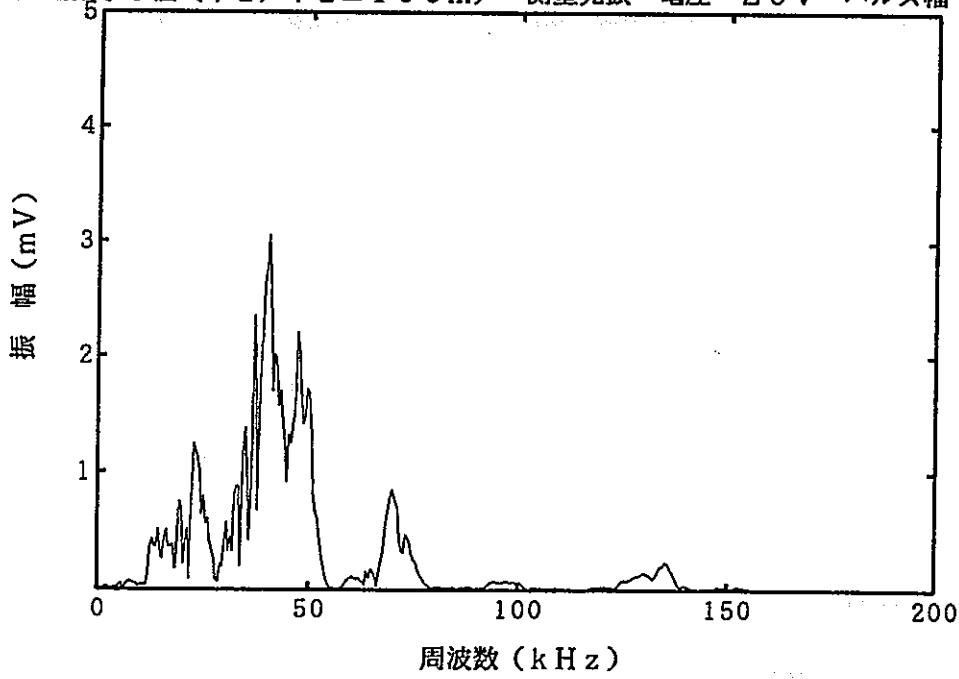
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 50V パルス幅 20 μ s MAX 27.8kHz



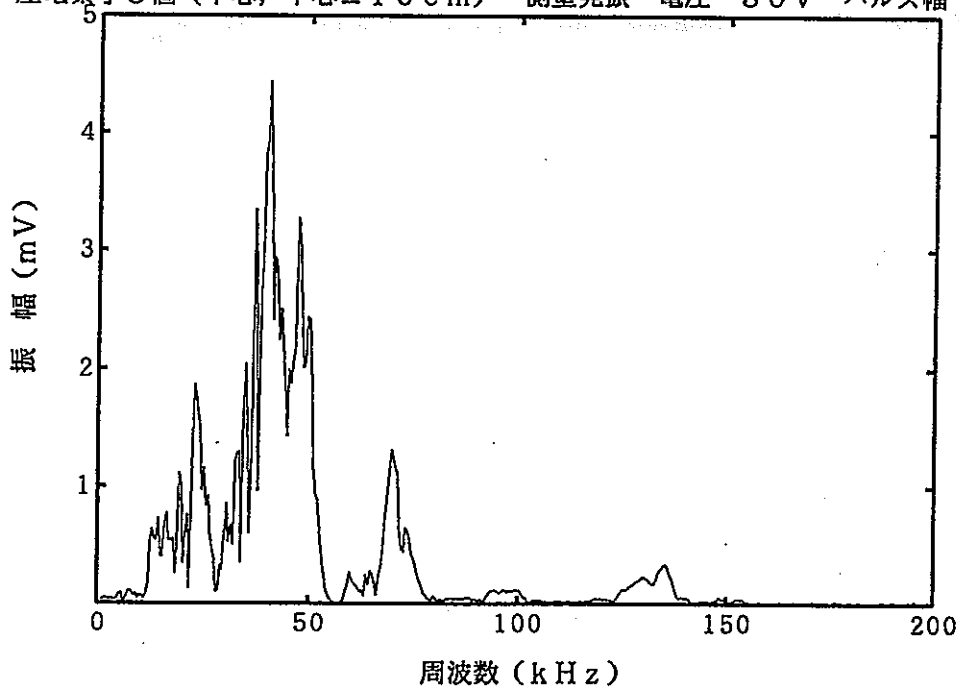
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 10V パルス幅 35 μ s MAX 40.5kHz



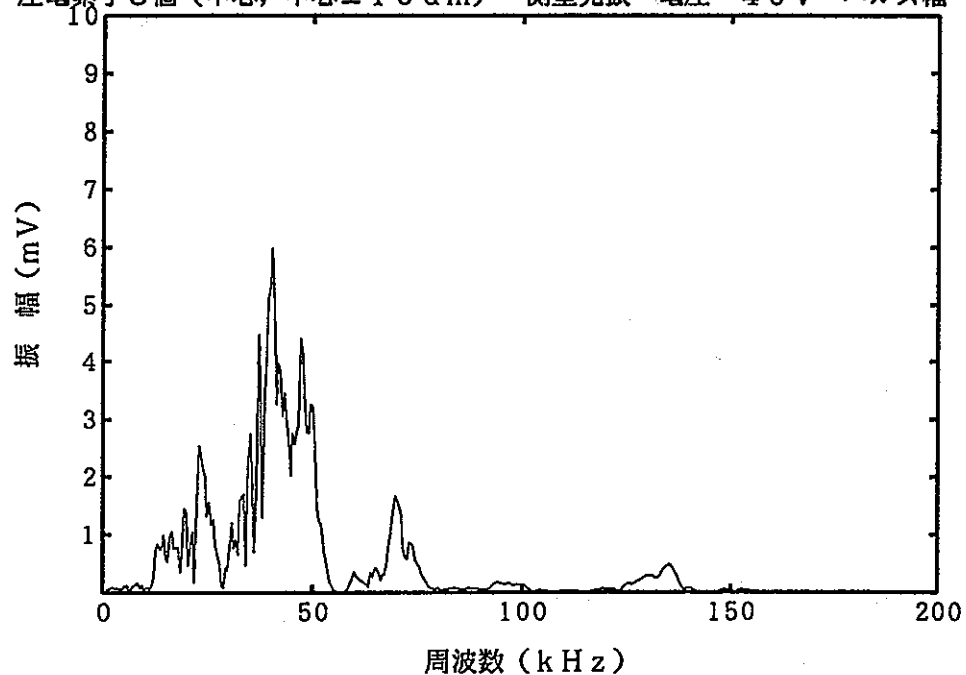
圧電素子3個 (中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 20V パルス幅 $35\mu s$ MAX 40.5kHz



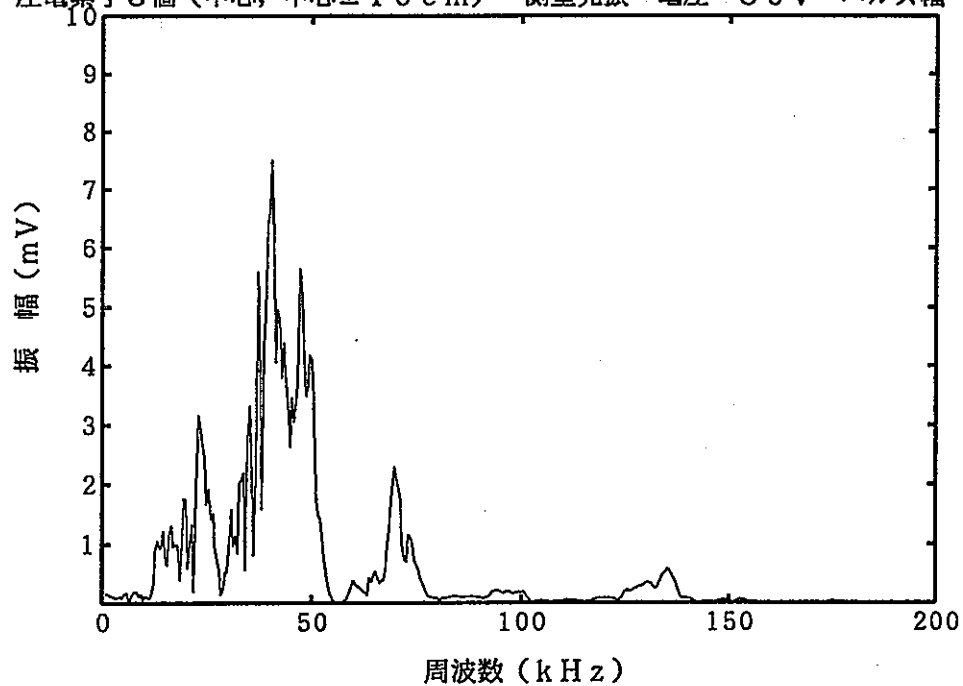
圧電素子3個 (中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 30V パルス幅 $35\mu s$ MAX 40.5kHz



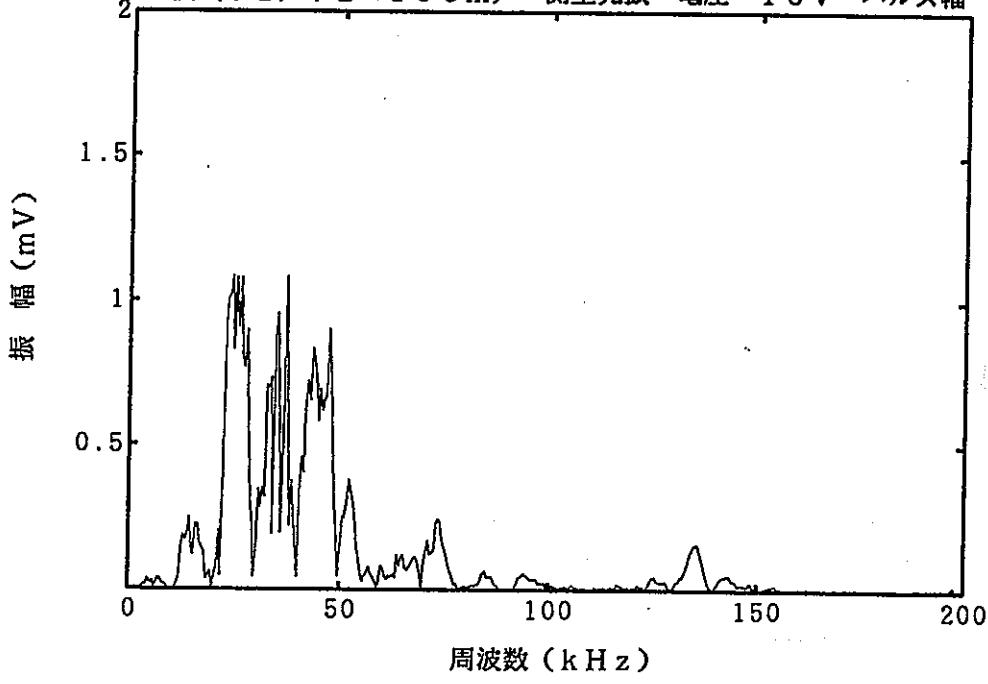
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 40V パルス幅 35 μ s MAX 40.5kHz



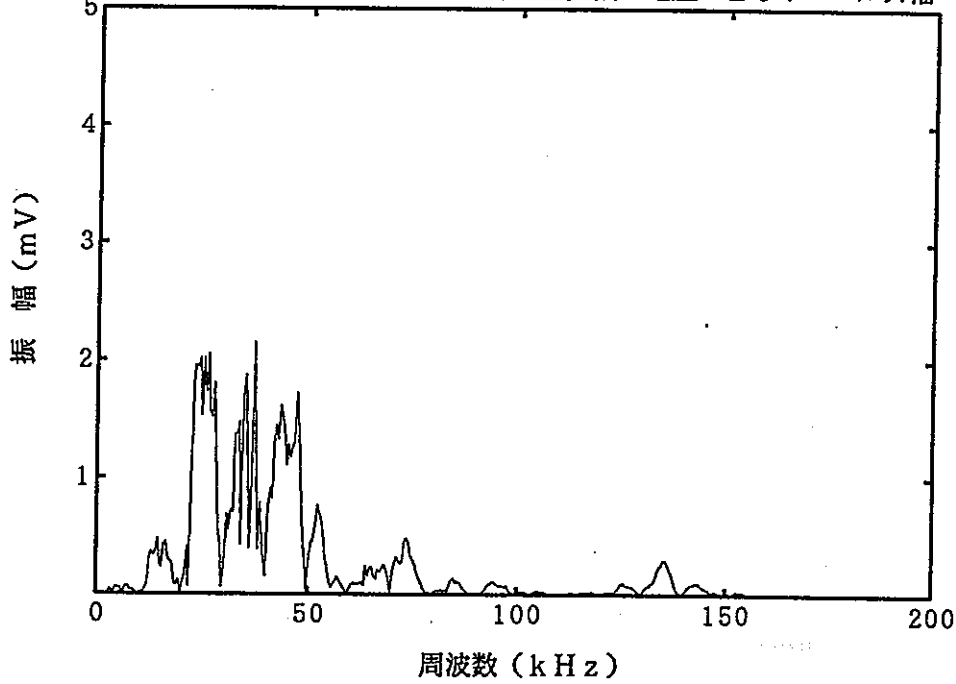
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 50V パルス幅 35 μ s MAX 40.5kHz



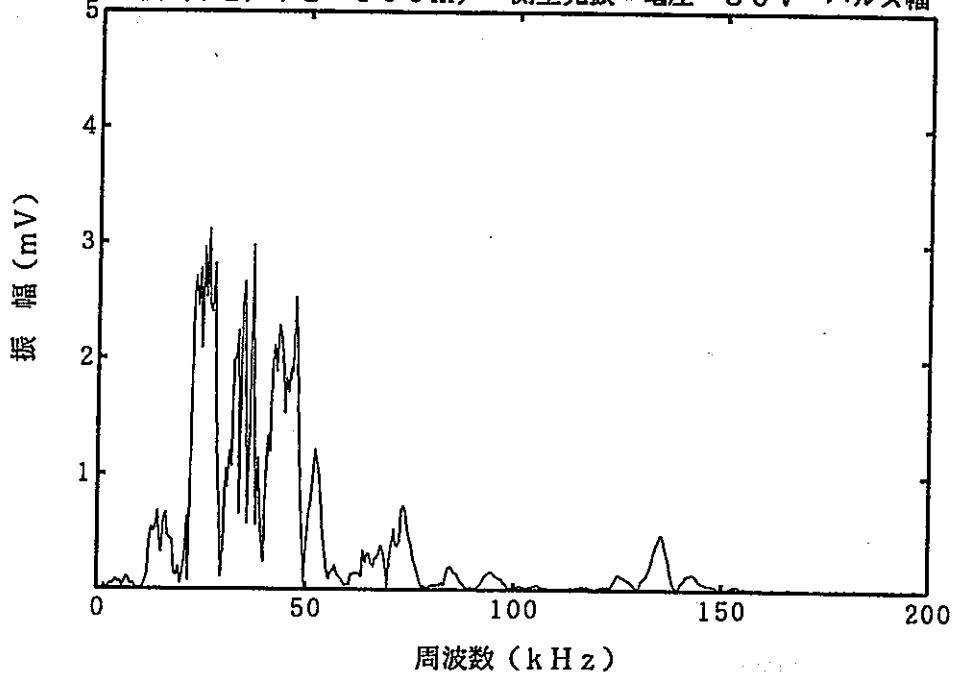
圧電素子3個 (中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 10V パルス幅 100 μ s MAX 24.4kHz



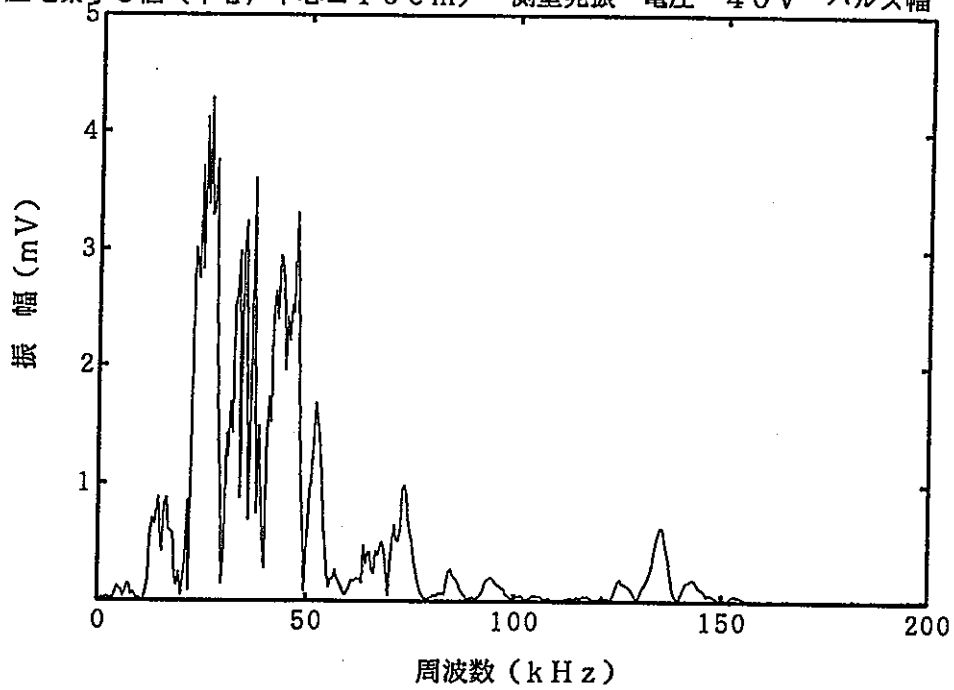
圧電素子3個 (中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 20V パルス幅 100 μ s MAX 37.1kHz



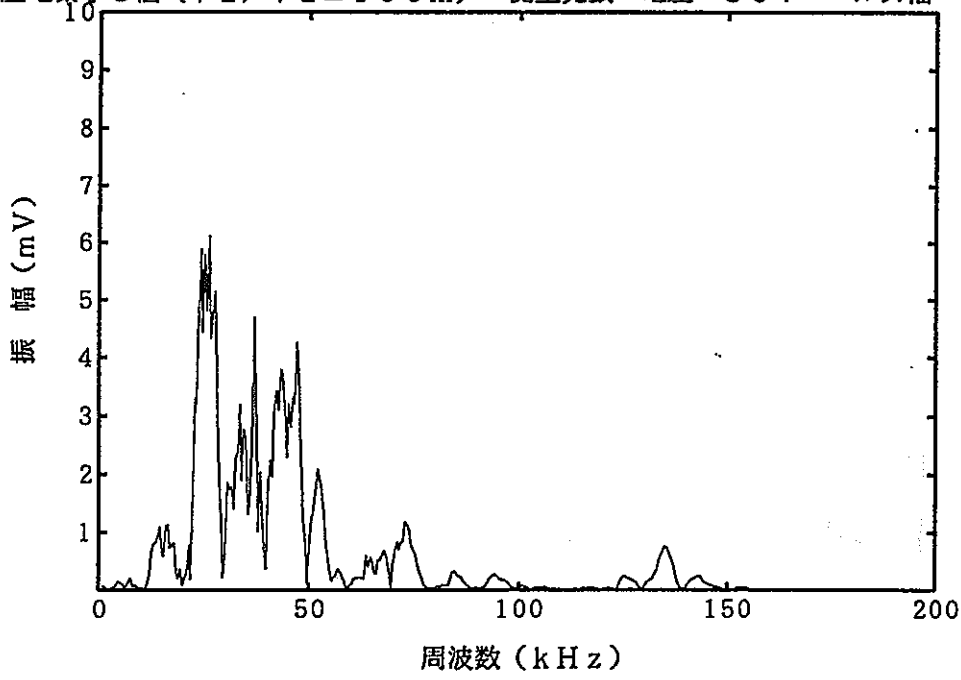
圧電素子3個 (中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 30V パルス幅 100 μ s MAX 26.4kHz



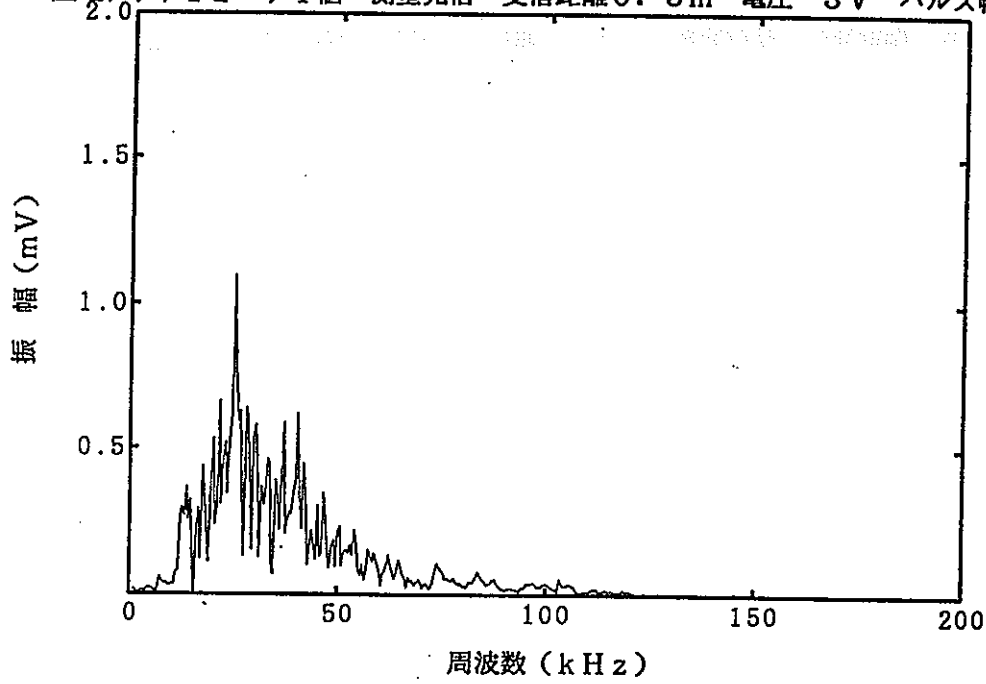
圧電素子3個 (中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 40V パルス幅 100 μ s MAX 26.4kHz



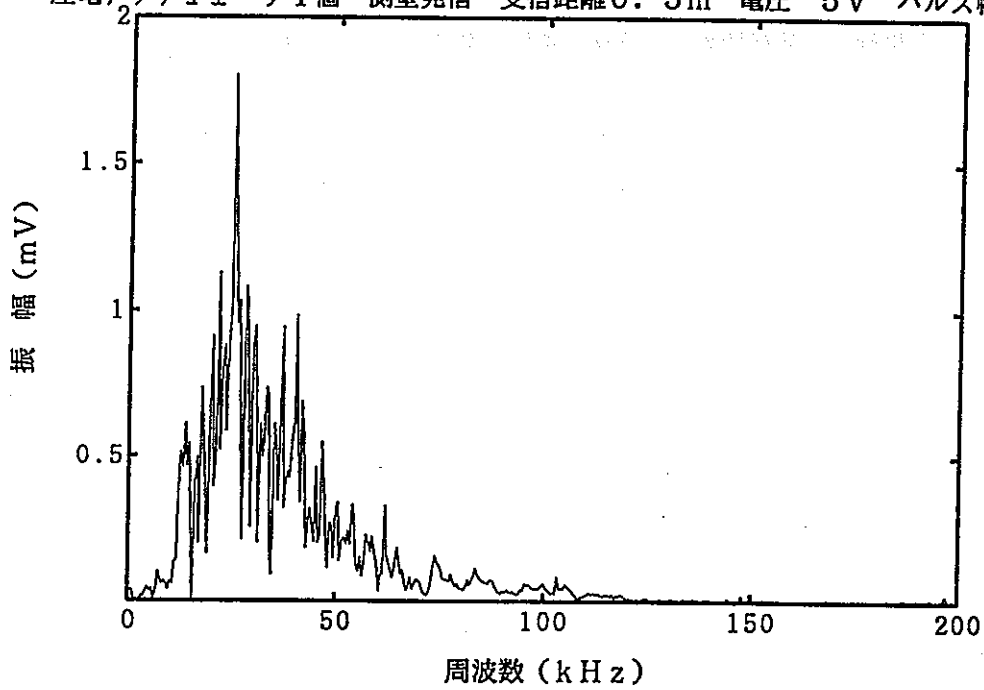
圧電素子3個(中心, 中心±10cm) 側壁発振 電圧 50V パルス幅 100μs MAX 26.4kHz



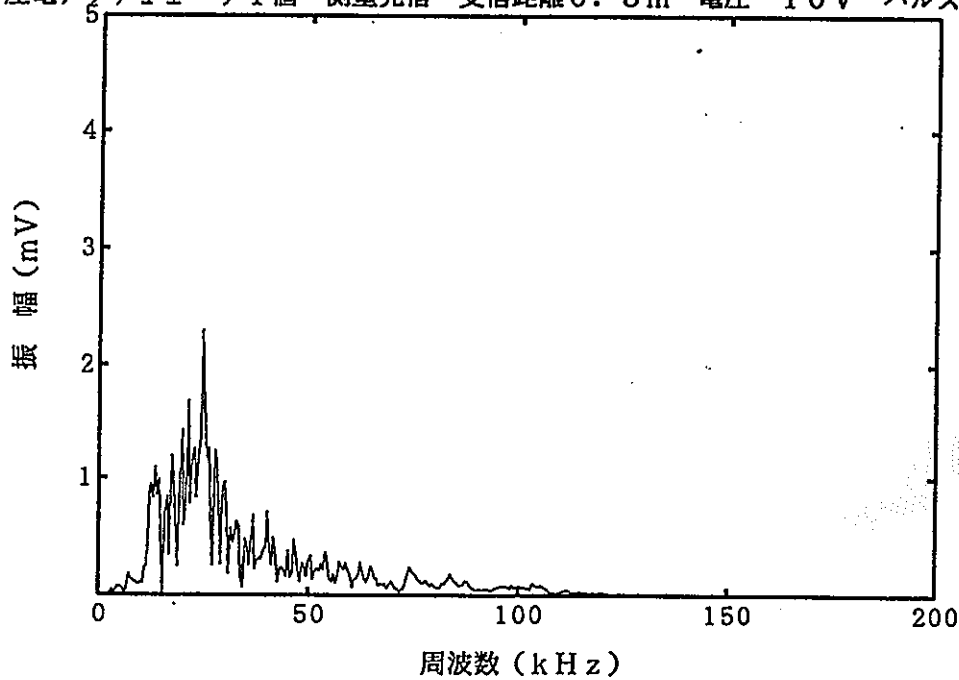
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 3V パルス幅 $5\mu s$ MAX 24.9kHz



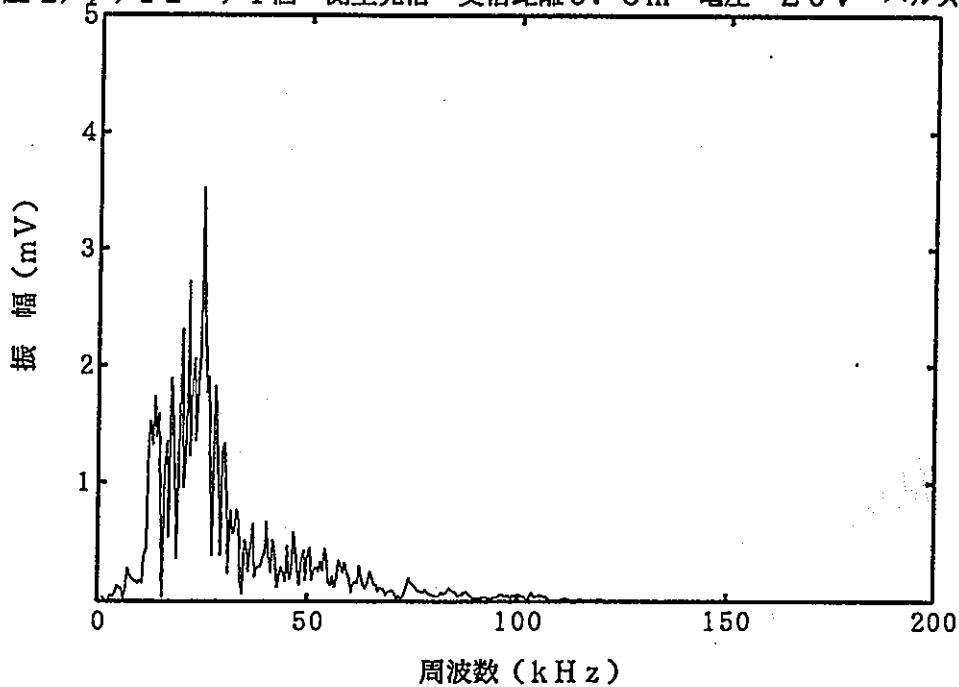
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 5V パルス幅 $5\mu s$ MAX 24.9kHz



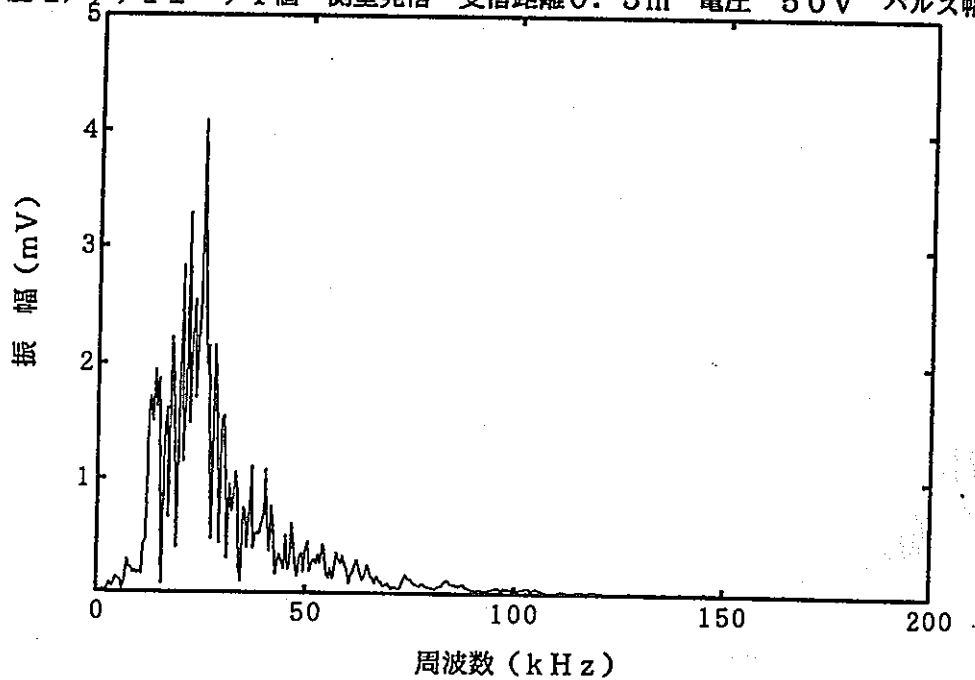
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 10V パルス幅 5 μ s MAX 24.9kHz



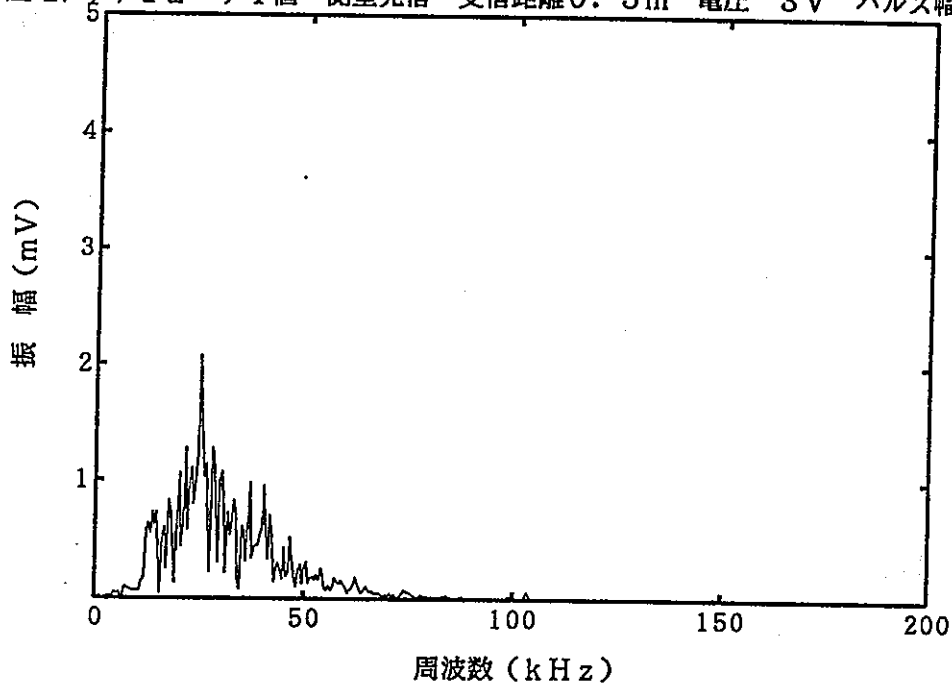
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 20V パルス幅 5 μ s MAX 24.9kHz



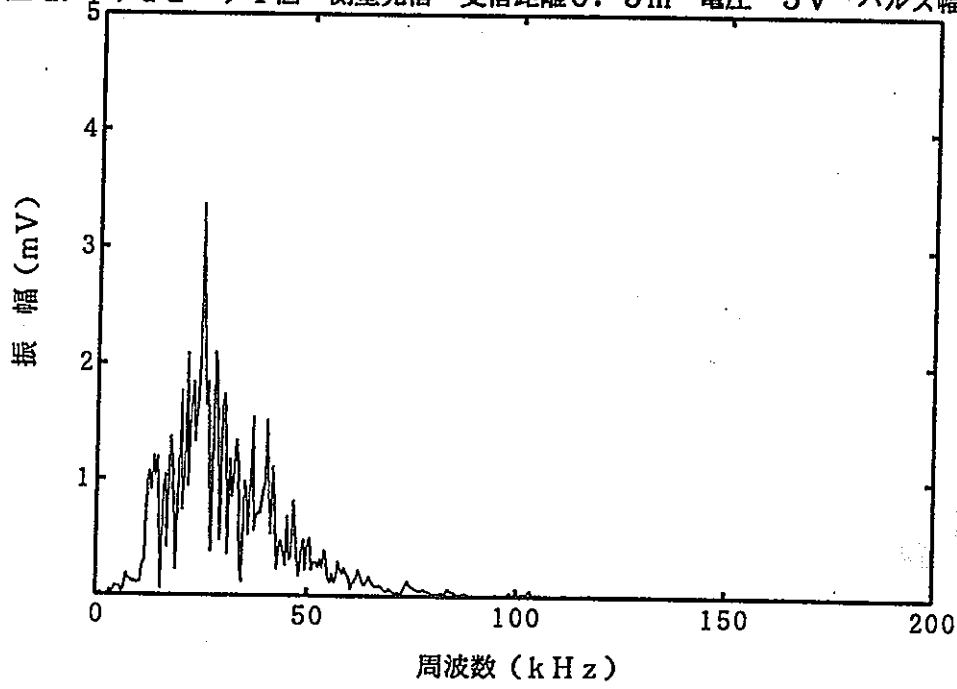
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 50V パルス幅 5 μ s MAX 24.9kHz



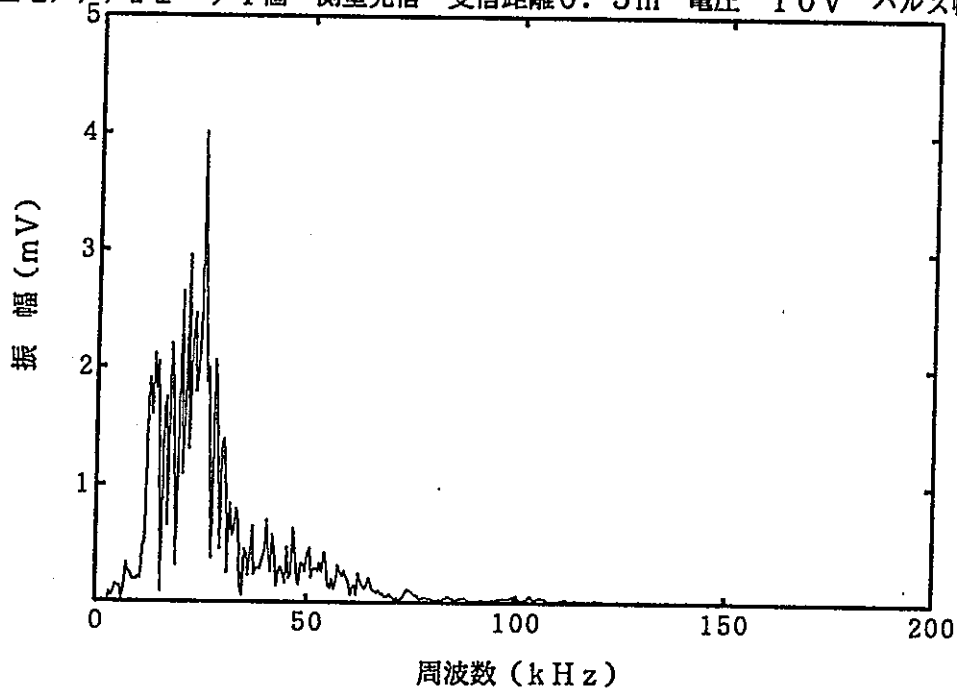
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 3V パルス幅 10 μ s MAX 24.9kHz



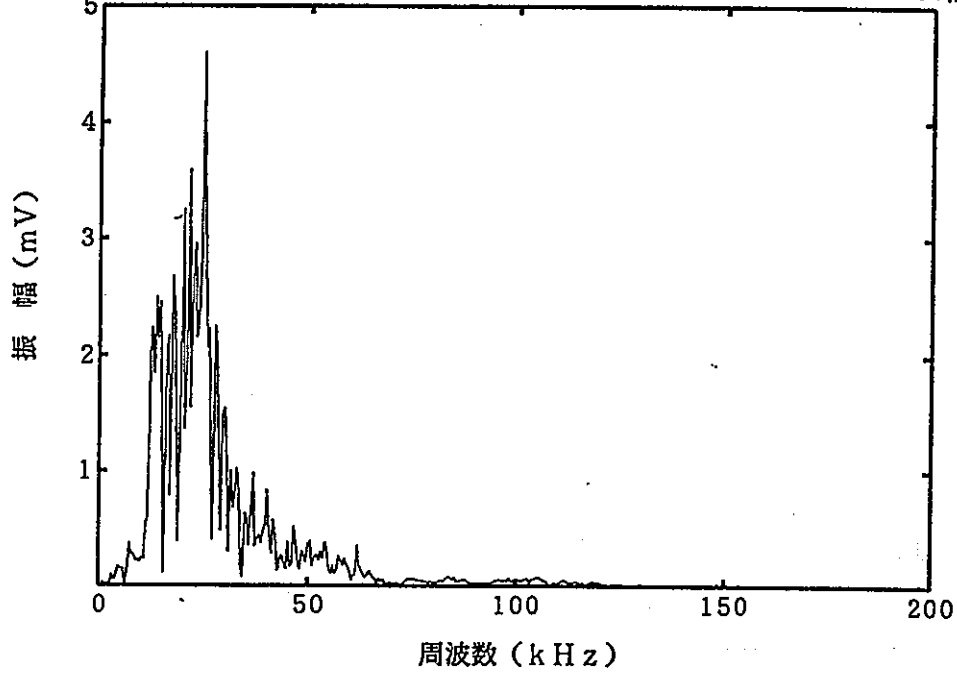
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 5V パルス幅 $10\mu\text{s}$ MAX 24.9kHz



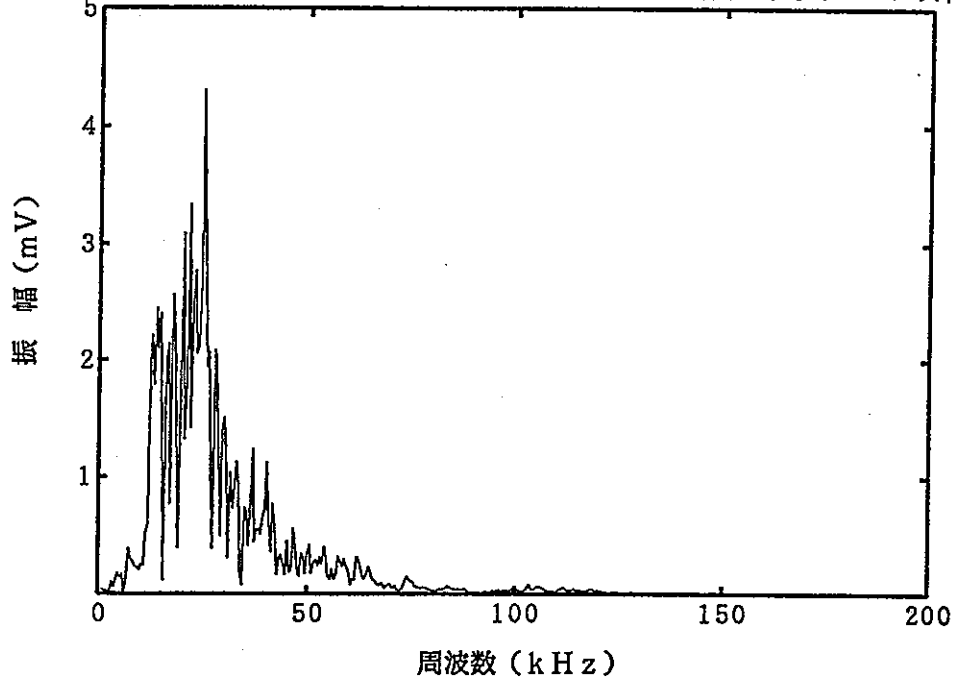
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 10V パルス幅 $10\mu\text{s}$ MAX 24.9kHz



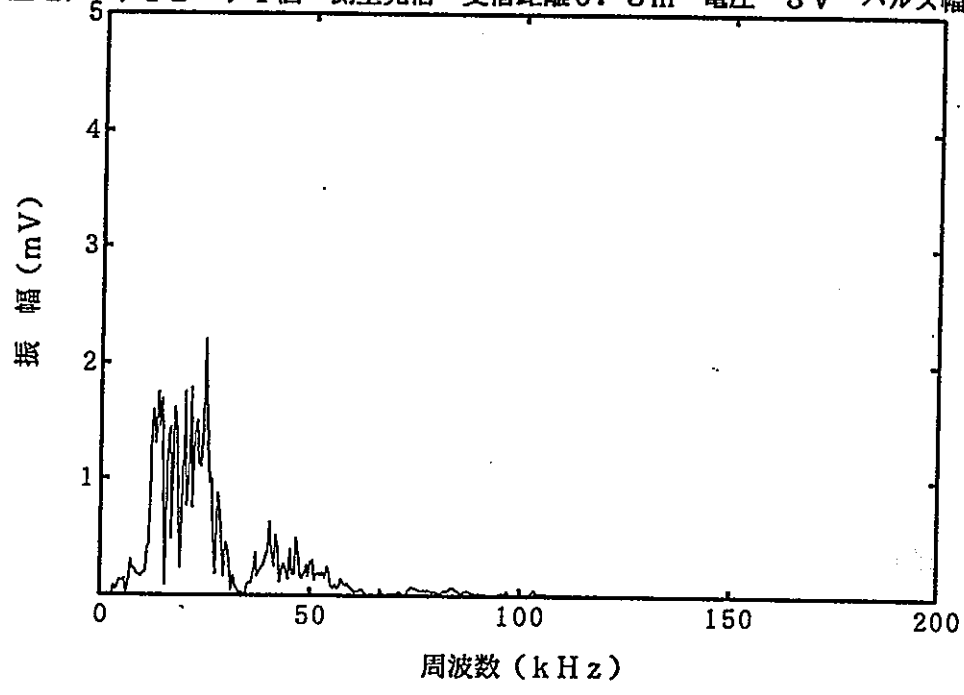
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 20V パルス幅 $10\mu\text{s}$ MAX 24.9kHz



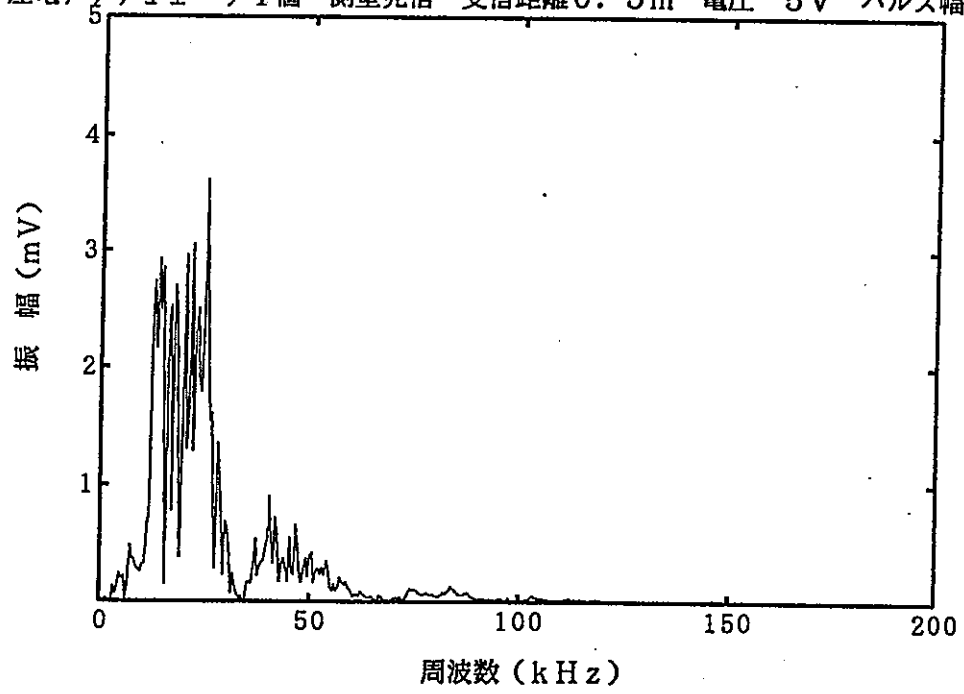
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 50V パルス幅 $10\mu\text{s}$ MAX 24.9kHz



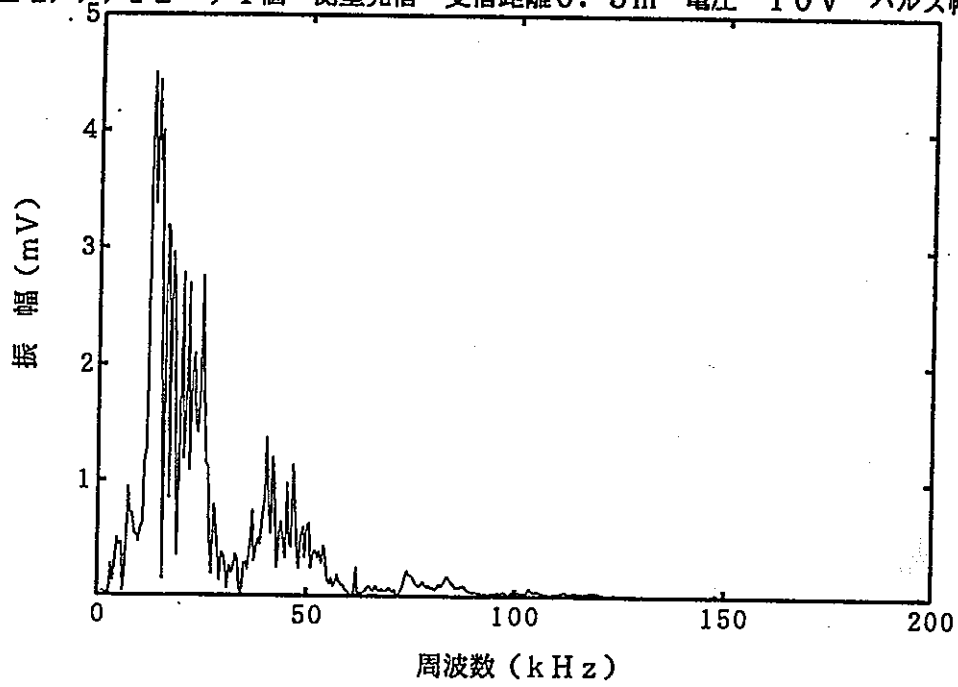
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 3V パルス幅 $30\mu\text{s}$ MAX 24.9kHz



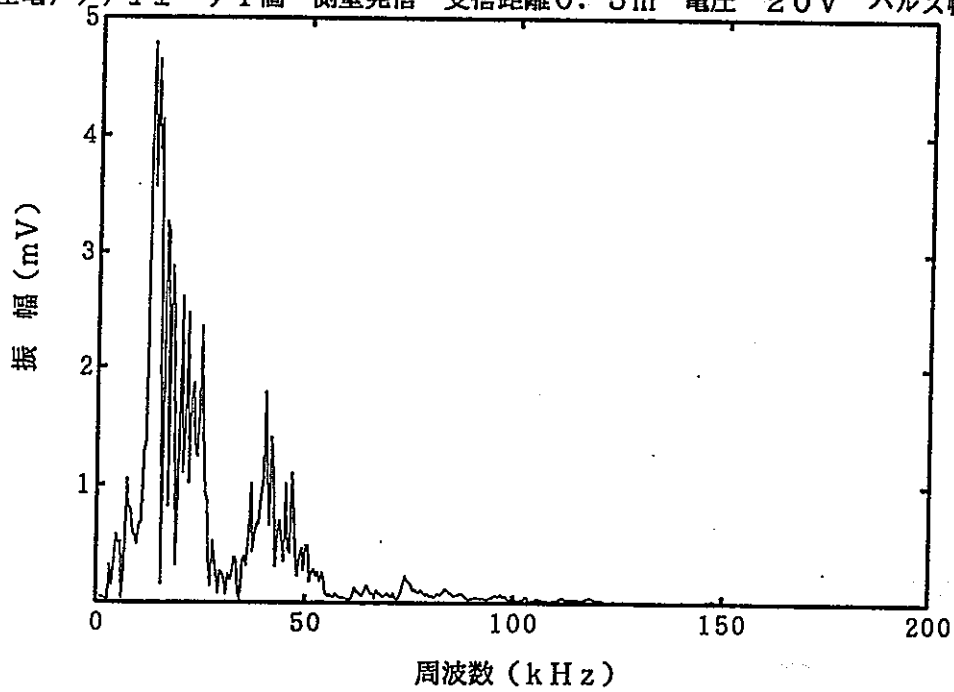
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 5V パルス幅 $30\mu\text{s}$ MAX 24.9kHz



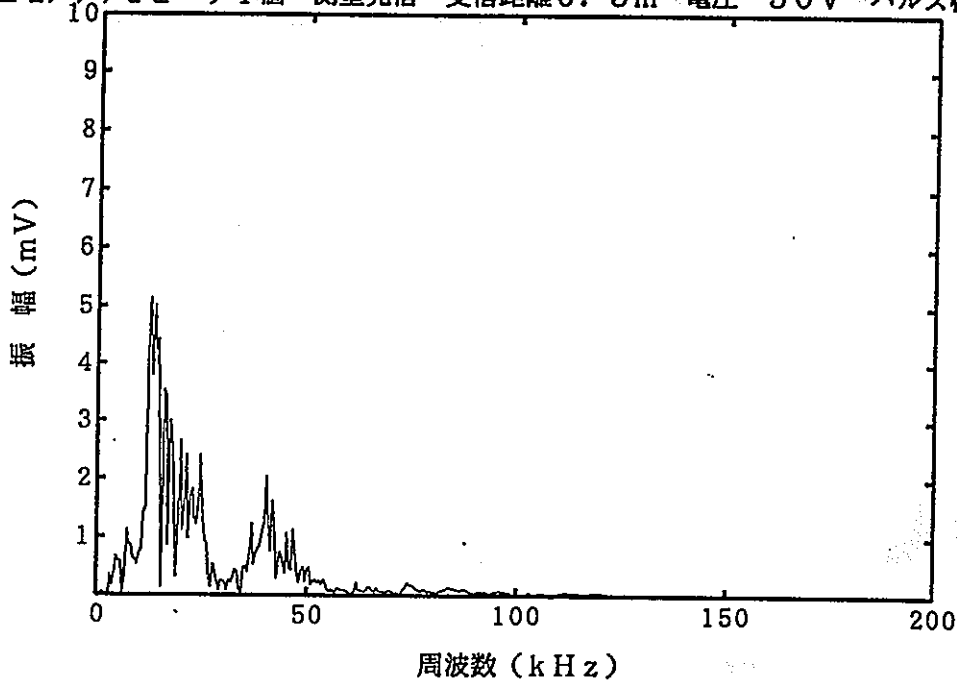
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 10V パルス幅 $30\mu\text{s}$ MAX 12.7kHz



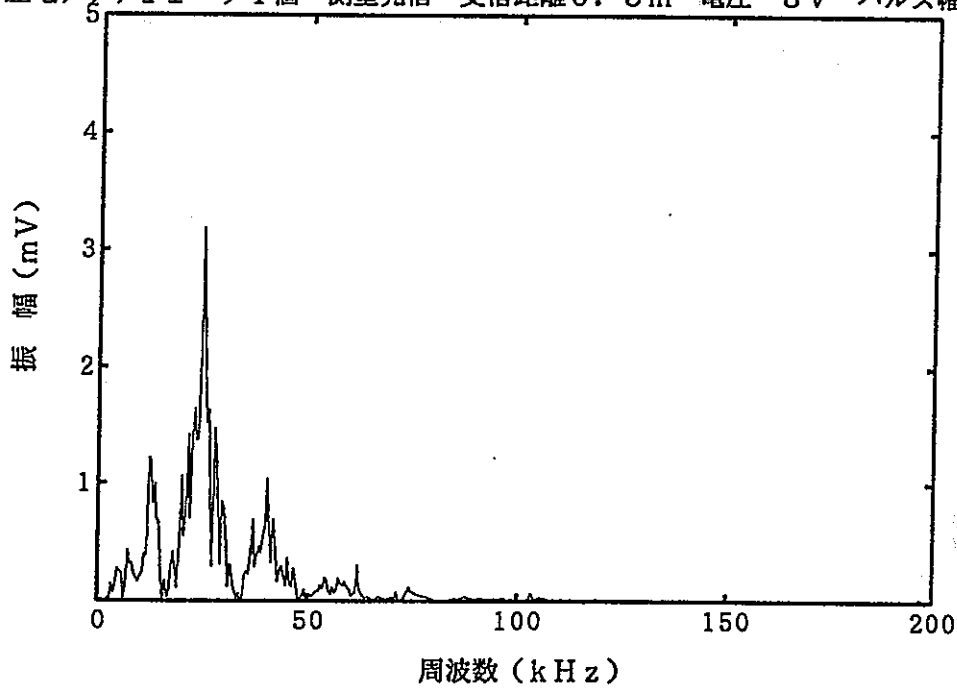
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 20V パルス幅 $30\mu\text{s}$ MAX 12.7kHz



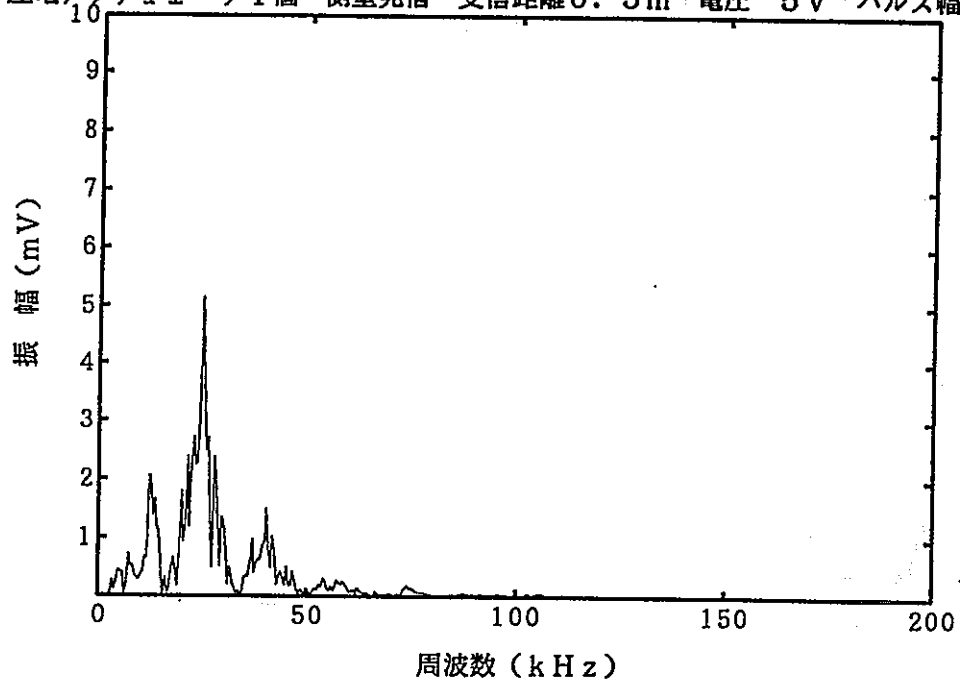
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 50V パルス幅 30 μ s MAX 12.7kHz



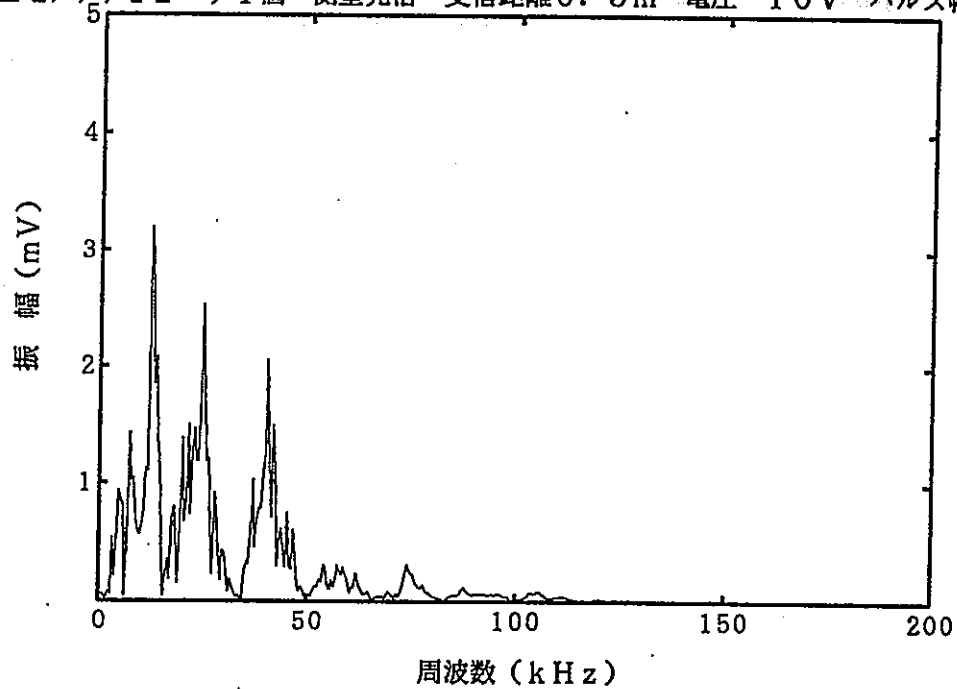
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 3V パルス幅 60 μ s MAX 24.9kHz



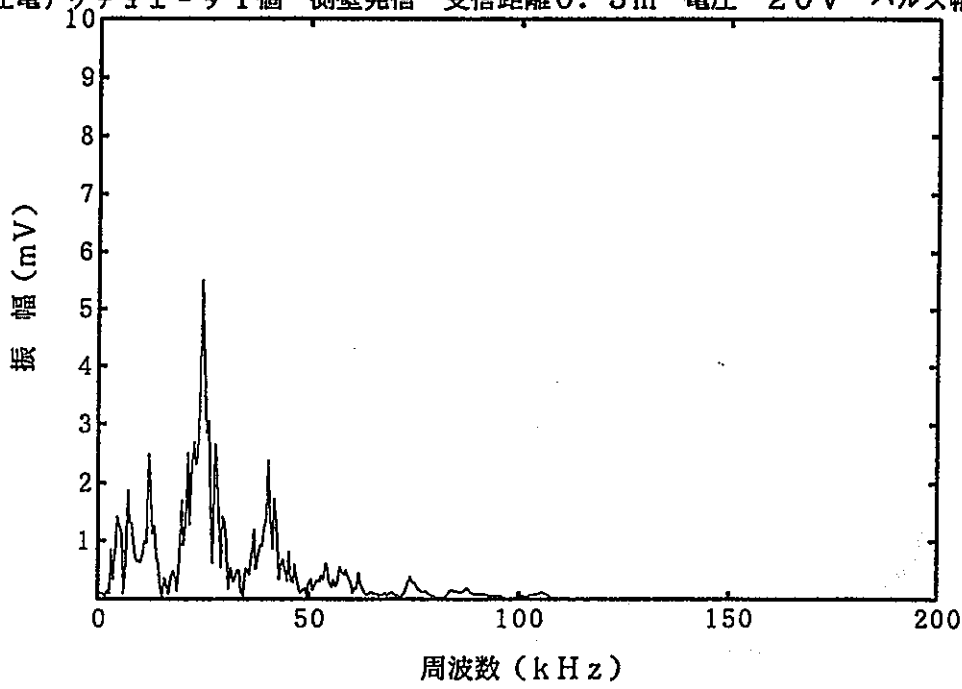
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 5V パルス幅 $60\mu s$ MAX 24.9kHz



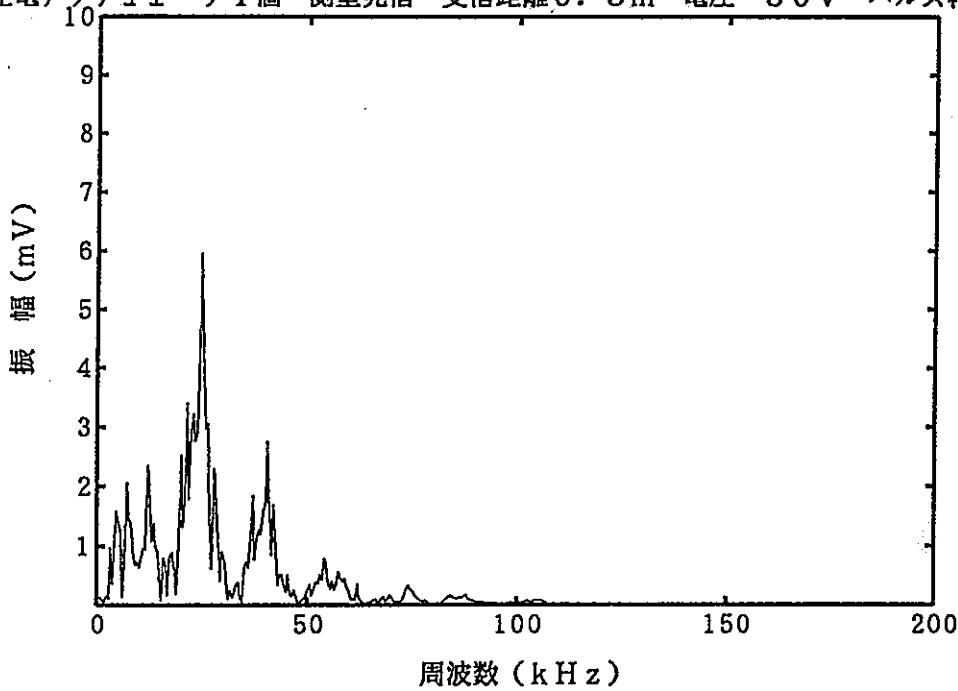
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 10V パルス幅 $60\mu s$ MAX 12.2kHz



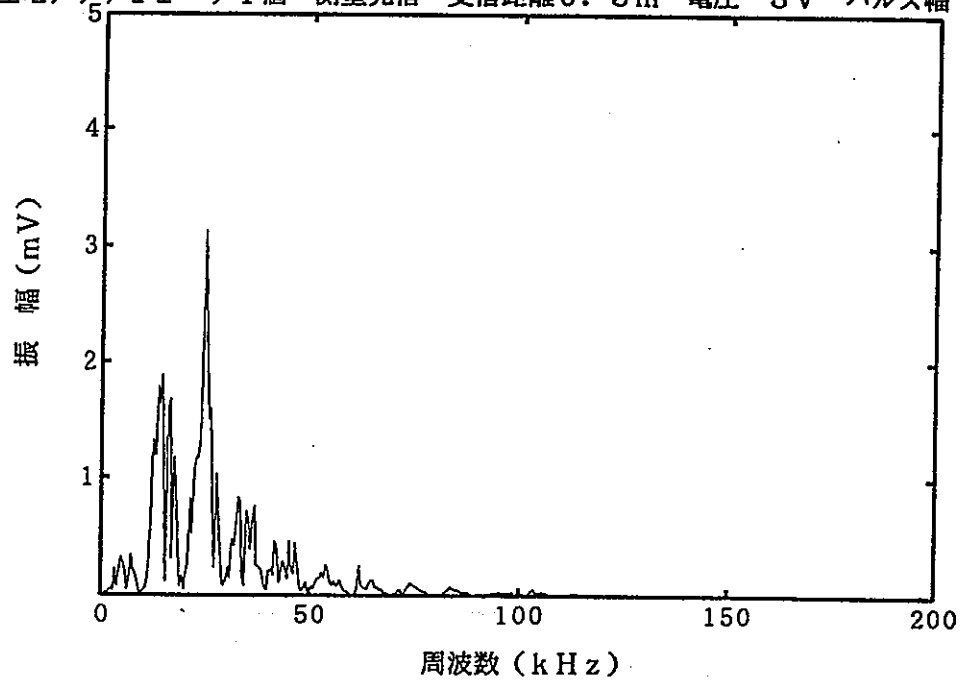
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 20V パルス幅 60 μ s MAX 24.9kHz



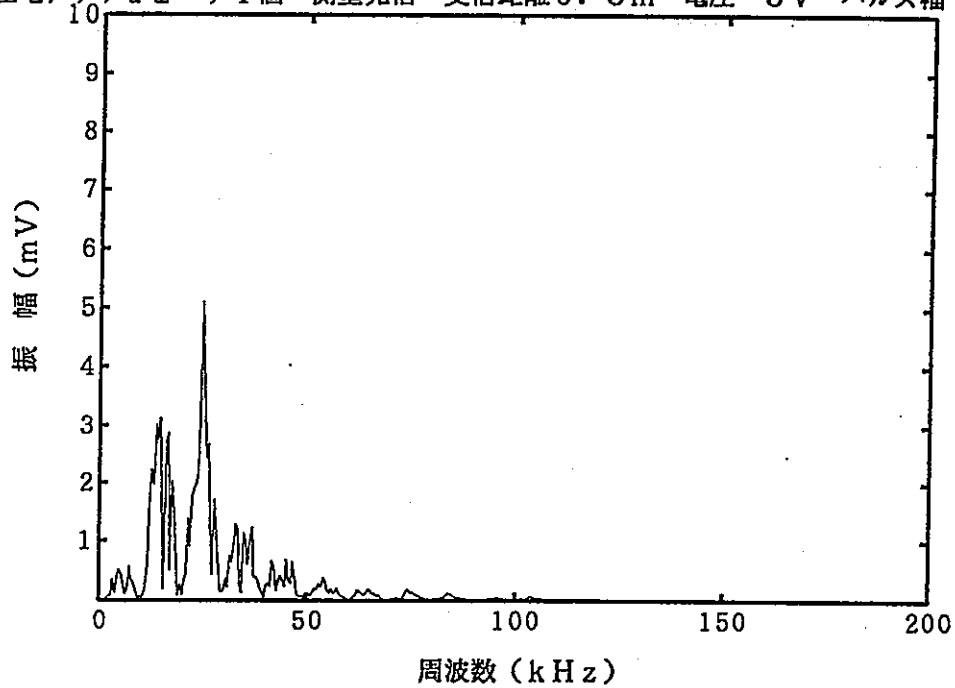
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 50V パルス幅 60 μ s MAX 24.9kHz



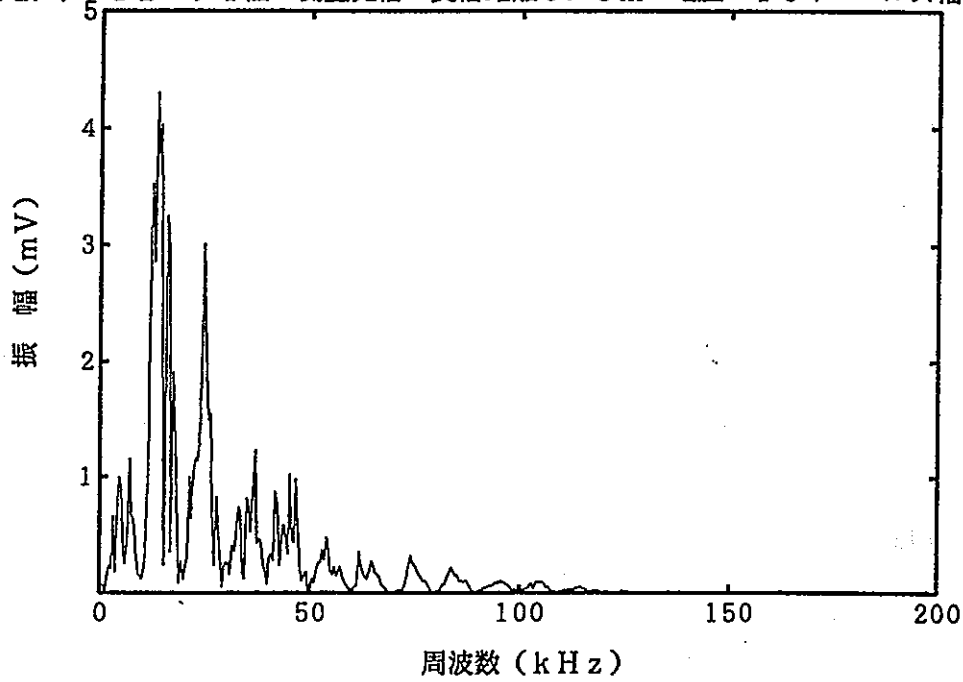
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 3V パルス幅 100 μ s MAX 24.9kHz



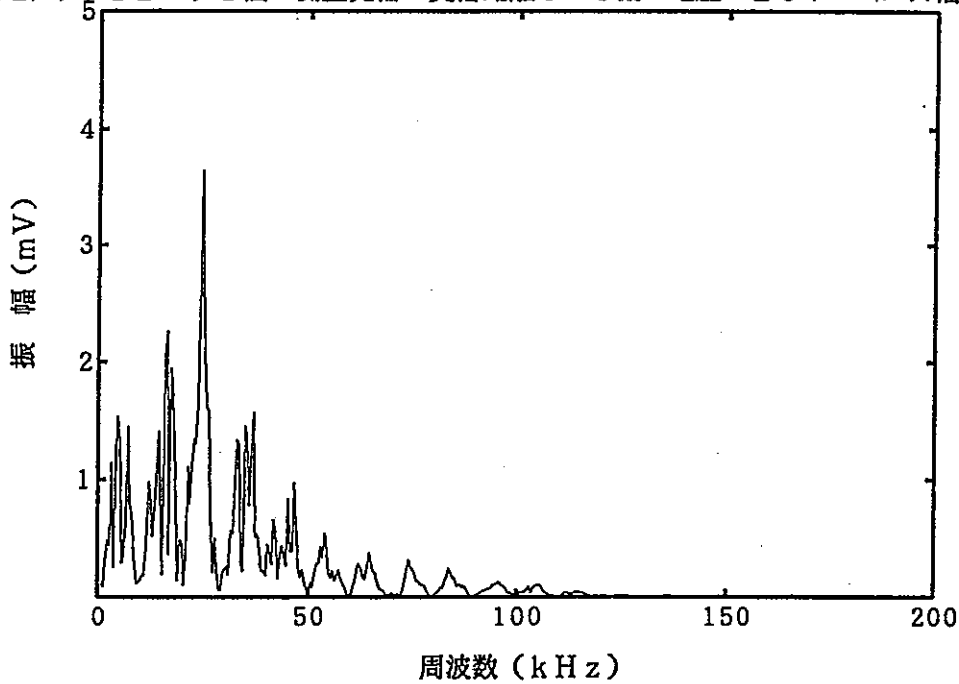
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 5V パルス幅 100 μ s MAX 24.9kHz



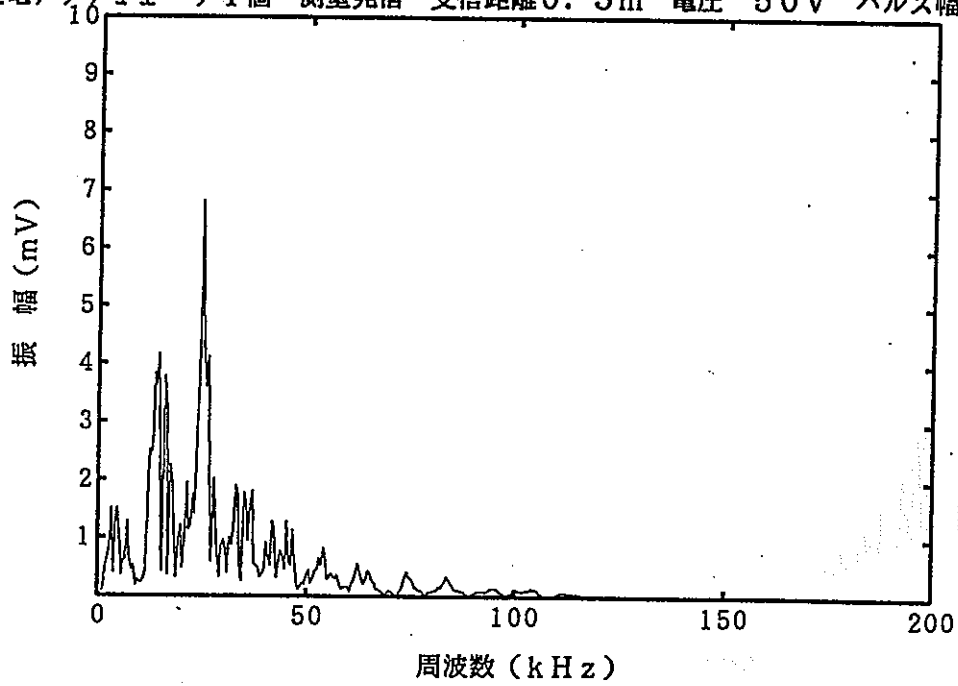
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 10V パルス幅 100 μ s MAX 13.7kHz



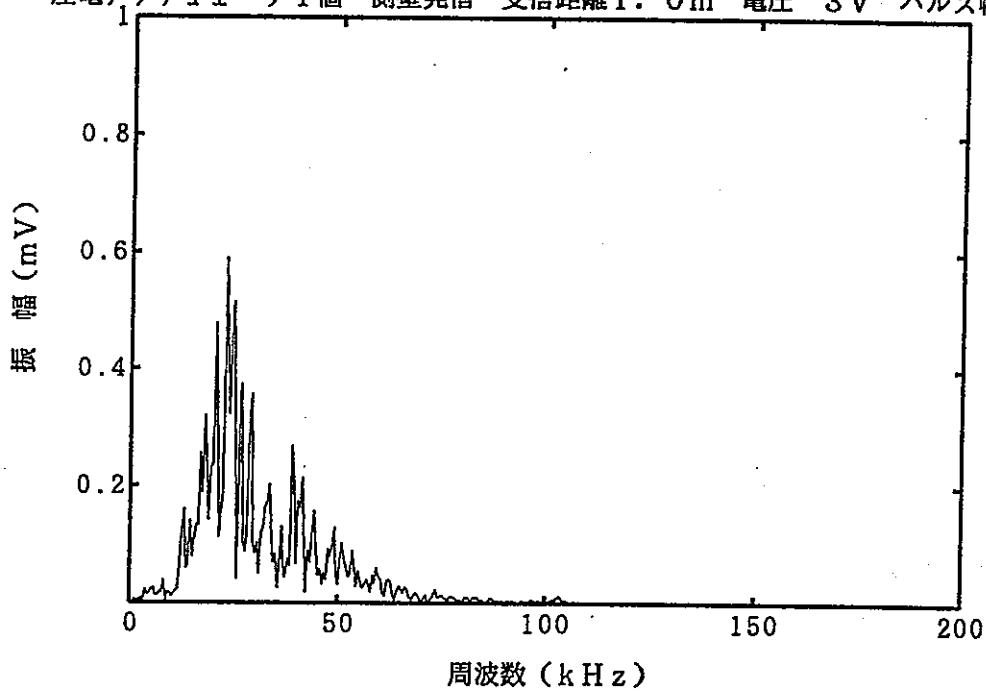
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 20V パルス幅 100 μ s MAX 24.9kHz



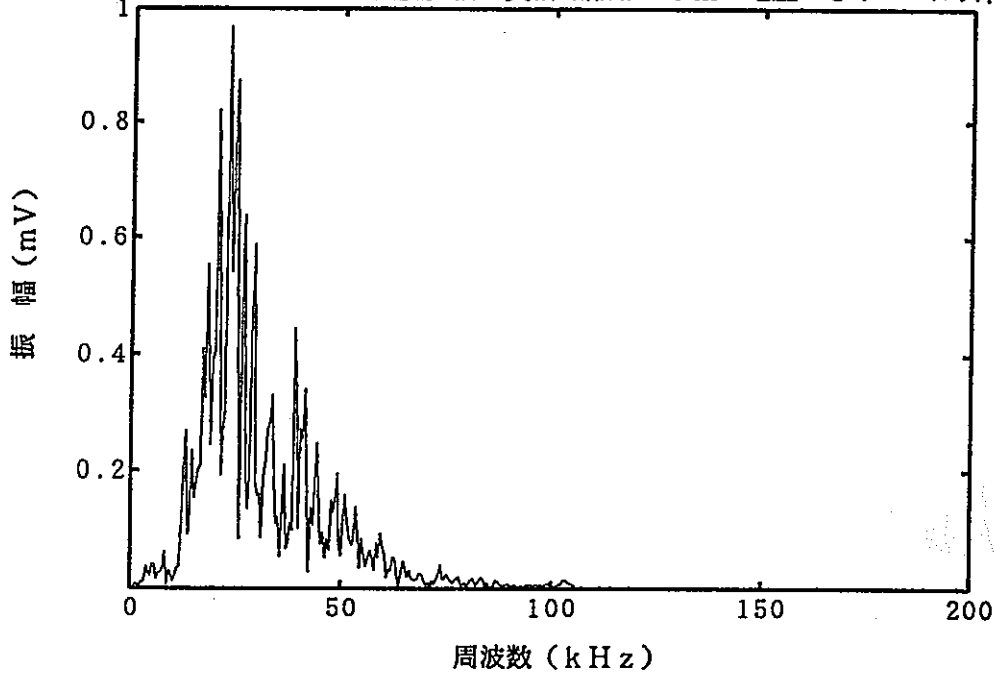
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離0.5m 電圧 50V パルス幅 100 μ s MAX 24.9kHz



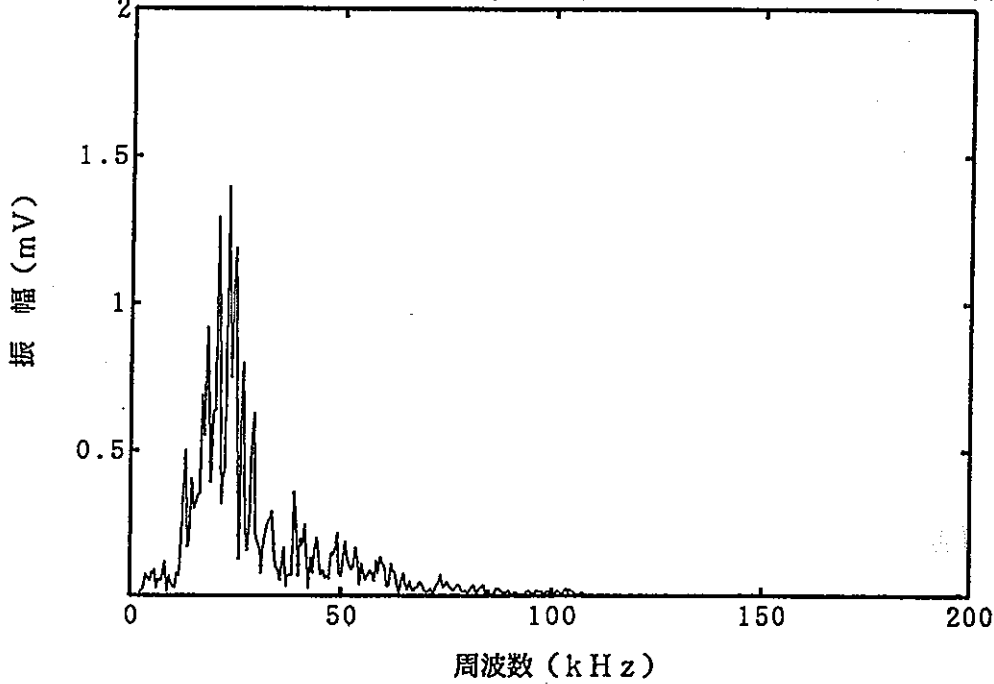
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 3V パルス幅 5 μ s MAX 22.9kHz



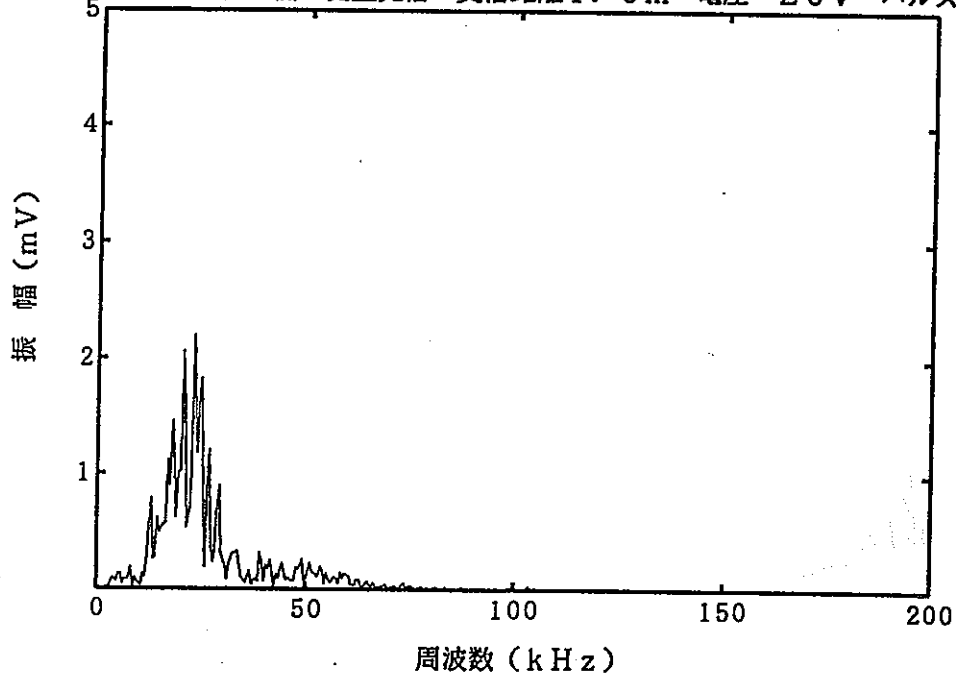
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 5V パルス幅 5 μ s MAX 22.9kHz



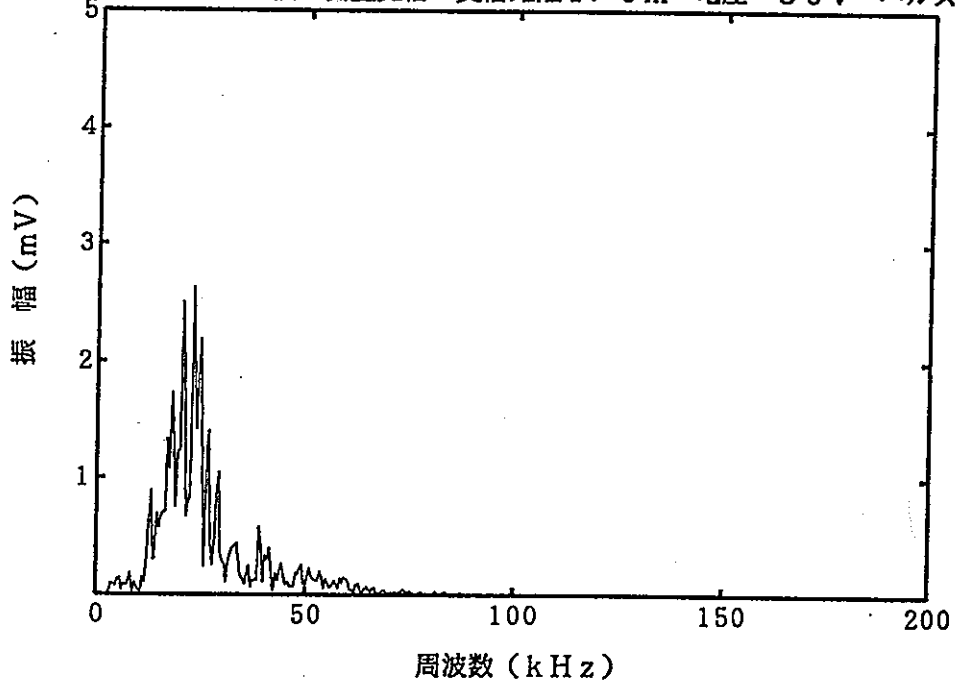
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 10V パルス幅 5 μ s MAX 22.9kHz



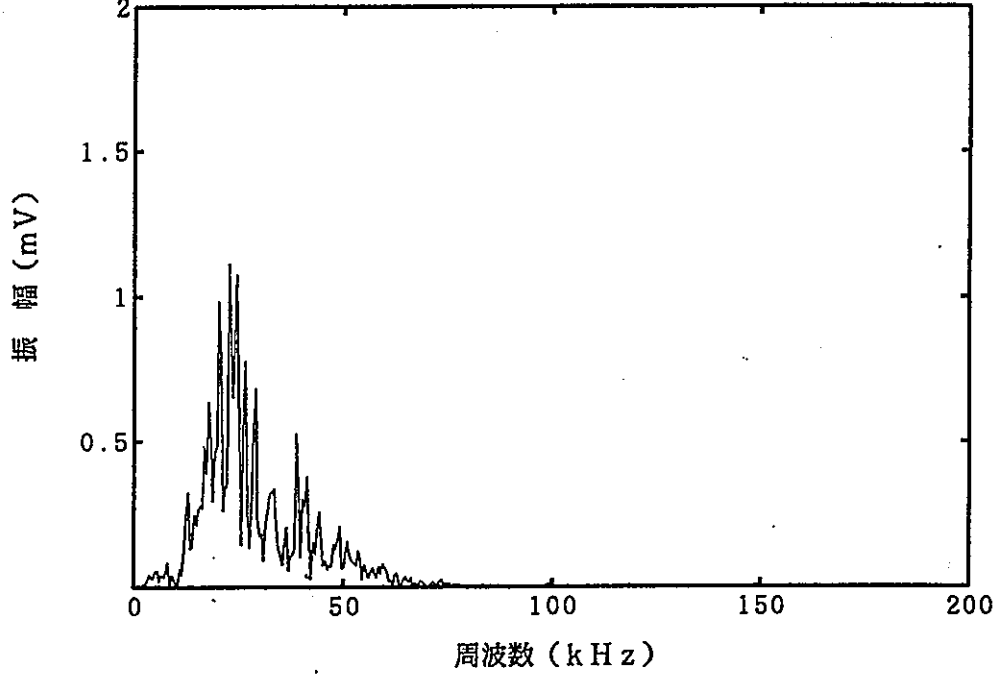
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 20V パルス幅 5 μ s MAX 22.9kHz



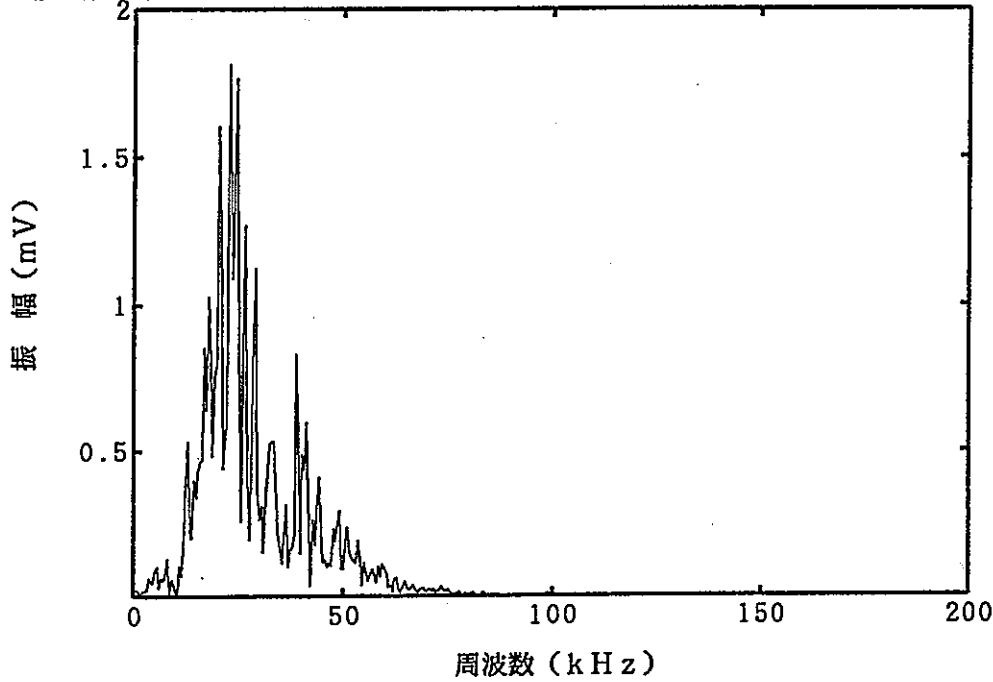
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 50V パルス幅 5 μ s MAX 22.9kHz



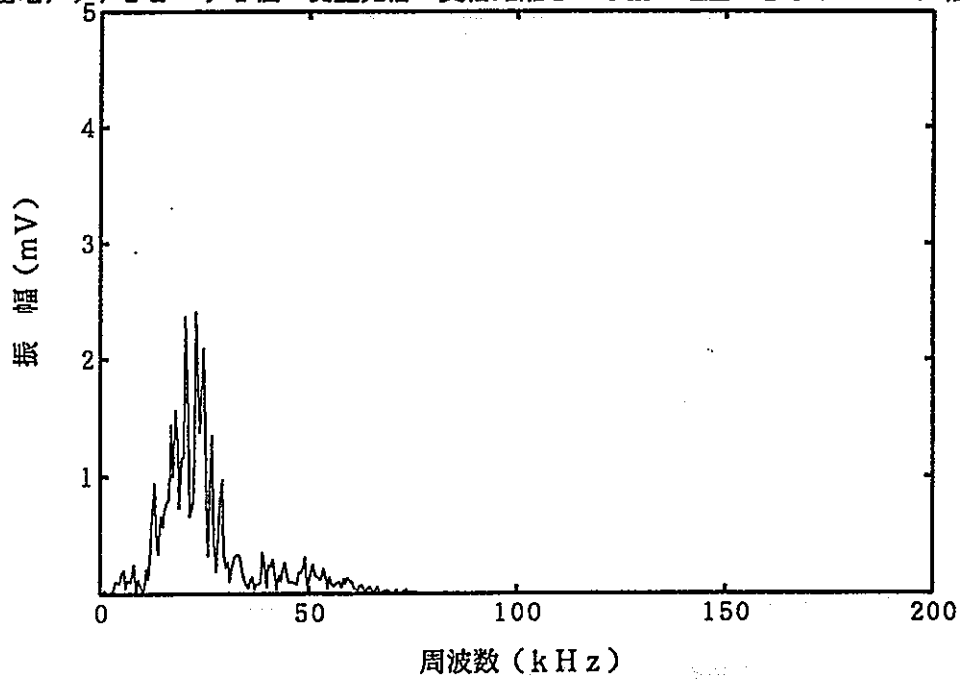
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 3V パルス幅 $10\mu\text{s}$ MAX 22.9kHz



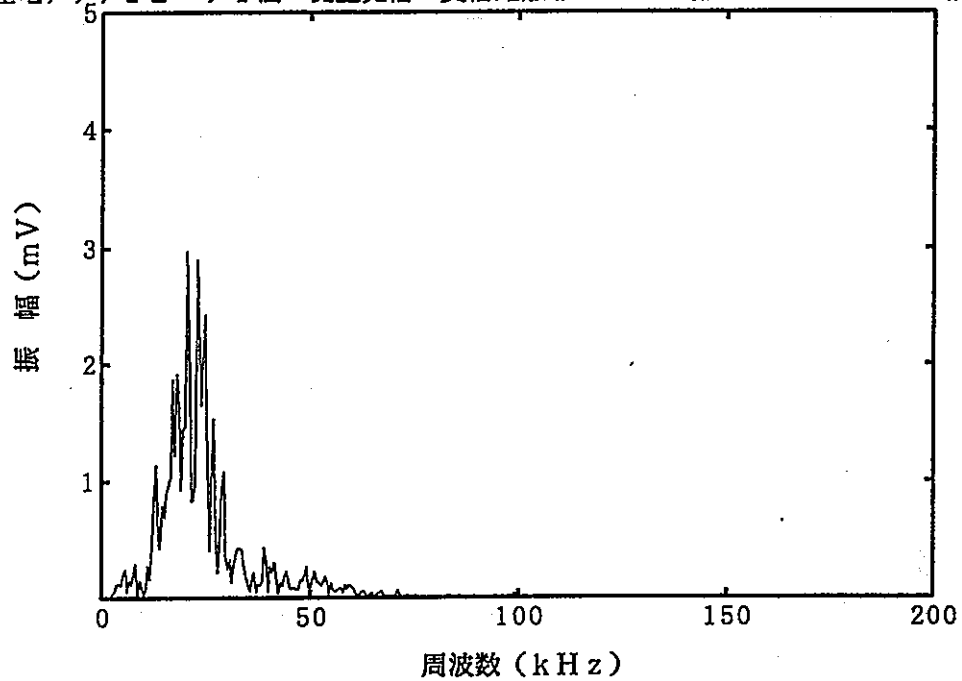
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 5V パルス幅 $10\mu\text{s}$ MAX 22.9kHz



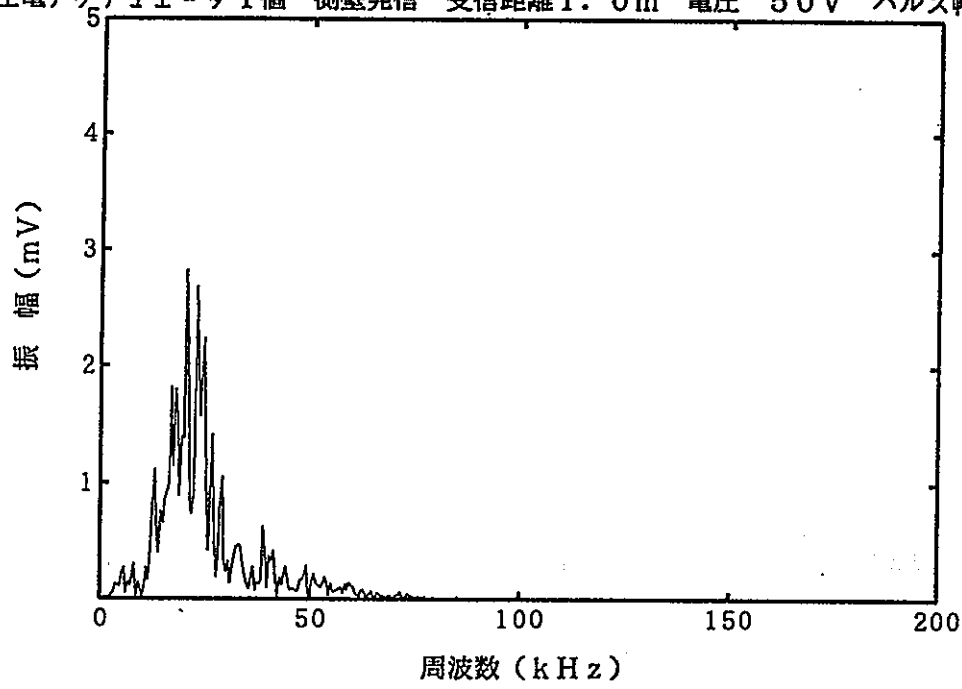
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 10V パルス幅 $10\mu\text{s}$ MAX 22.9kHz



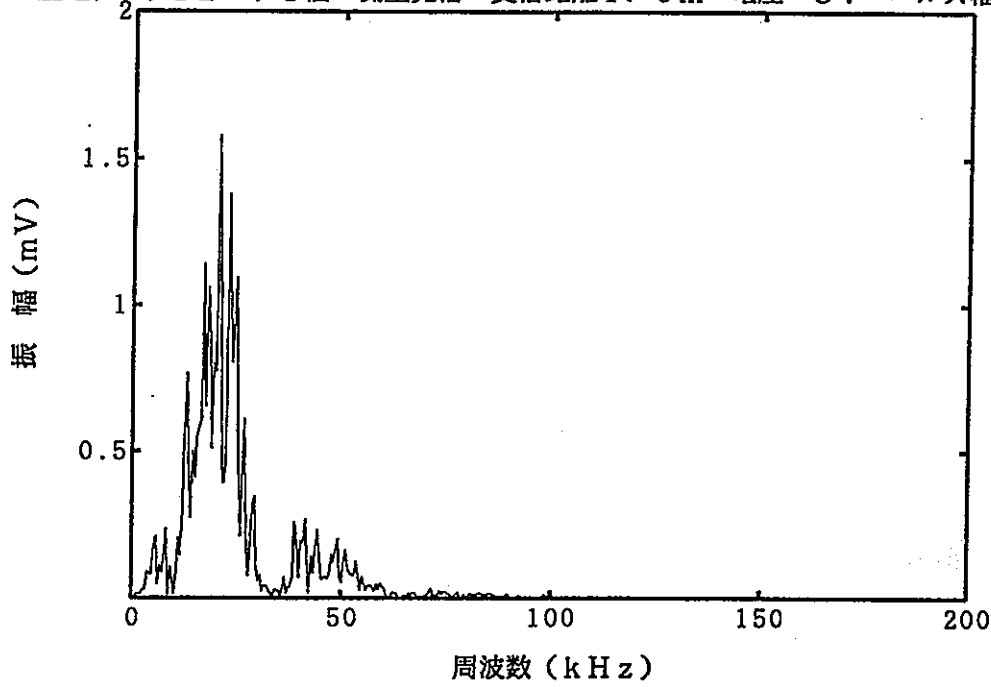
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 20V パルス幅 $10\mu\text{s}$ MAX 20.5kHz



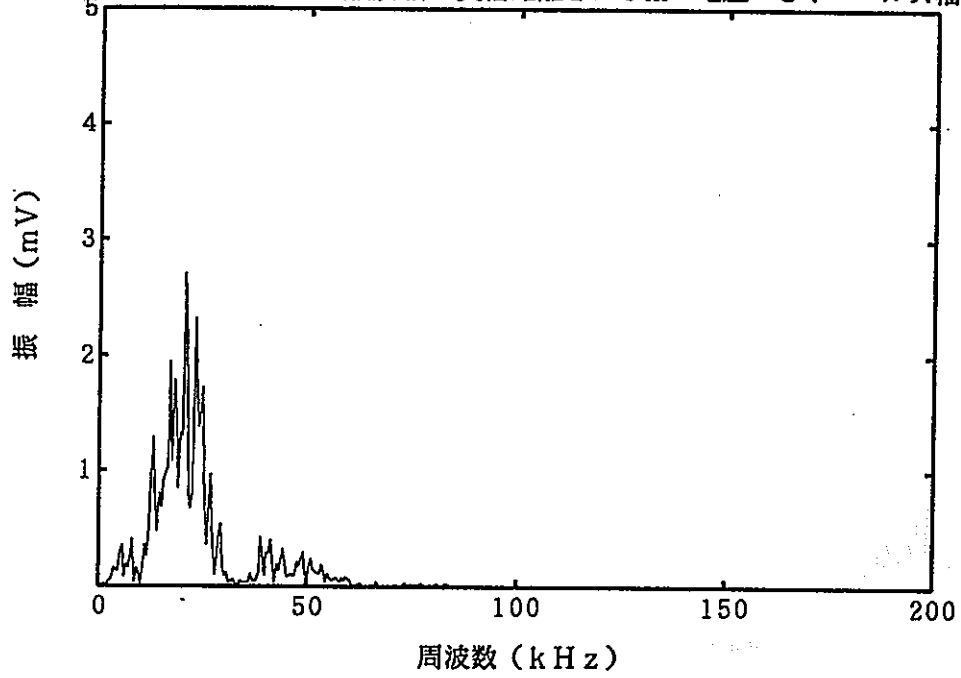
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 50V パルス幅 10 μ s MAX 20.5kHz



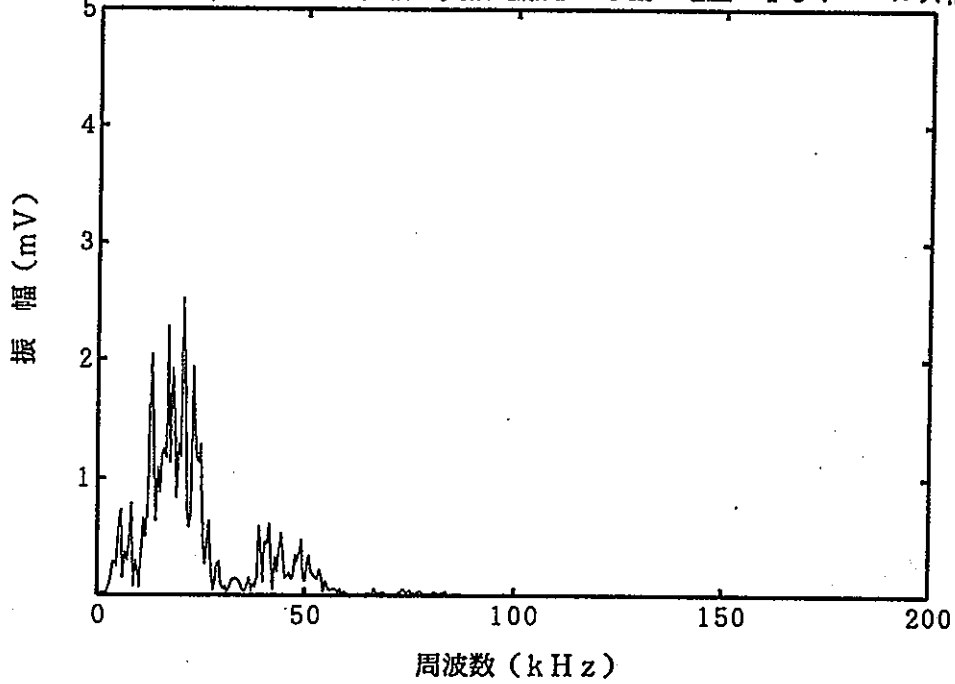
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 3V パルス幅 30 μ s MAX 20.5kHz



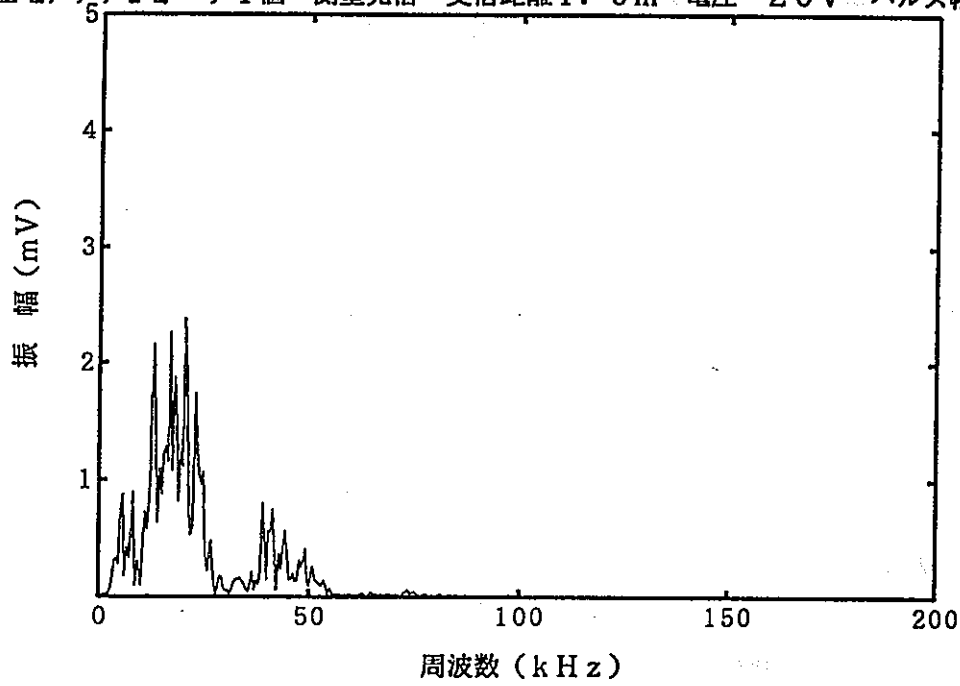
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 5V パルス幅 $30\mu\text{s}$ MAX 20.5kHz



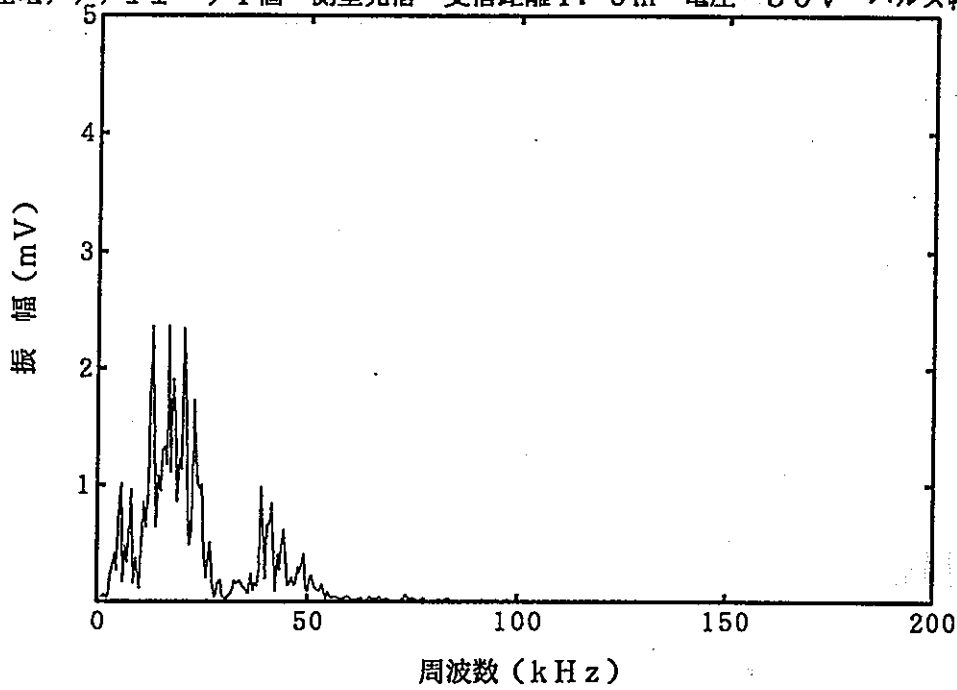
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 10V パルス幅 $30\mu\text{s}$ MAX 20.5kHz



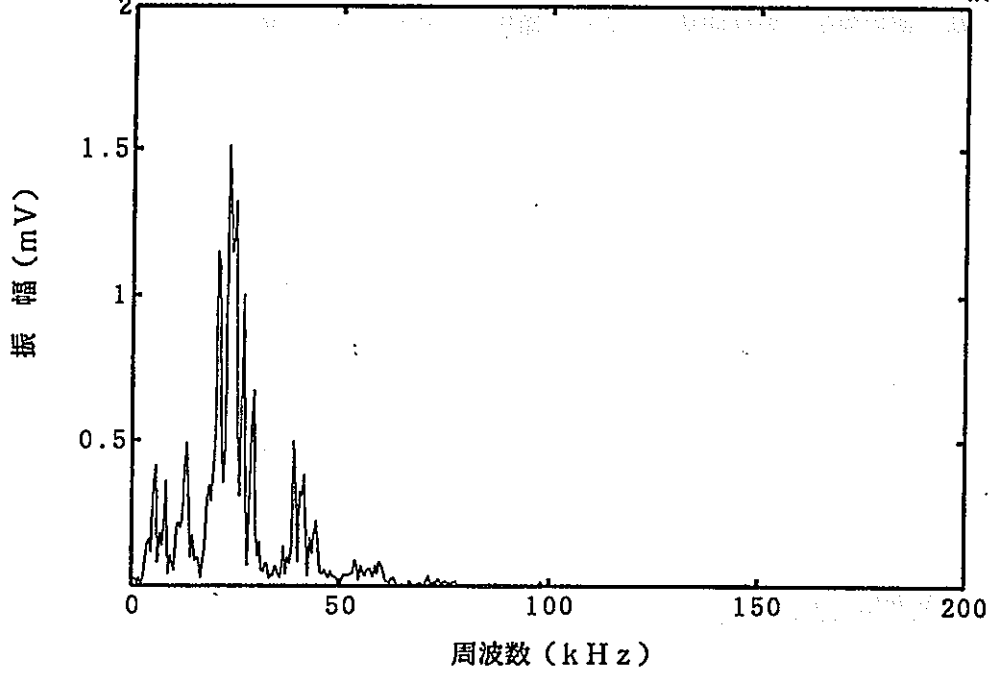
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 20V パルス幅 $30\mu\text{s}$ MAX 20.5kHz



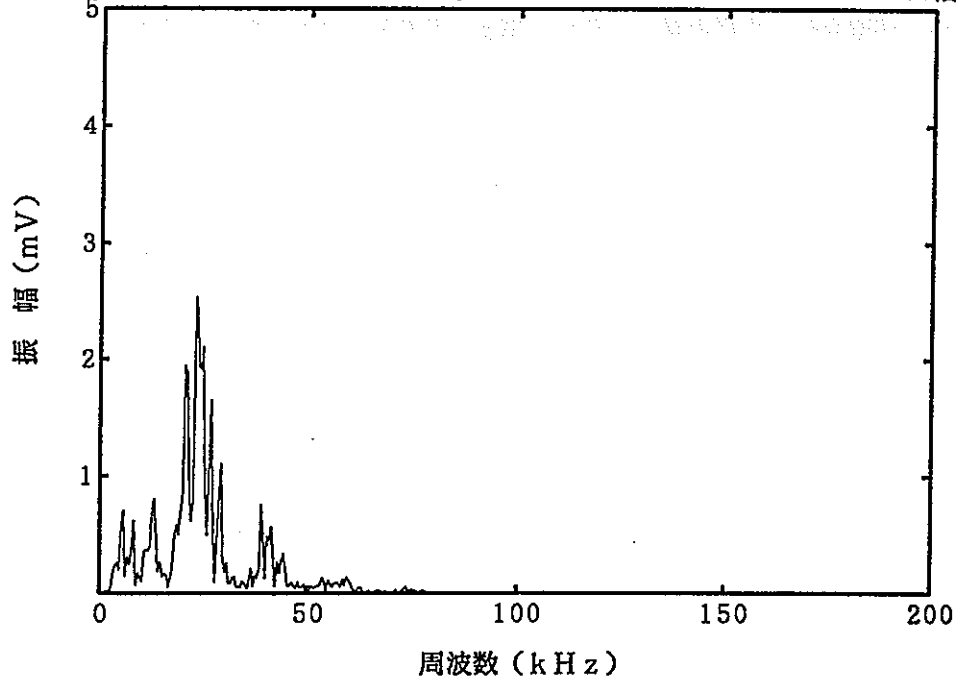
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 50V パルス幅 $30\mu\text{s}$ MAX 13.2kHz



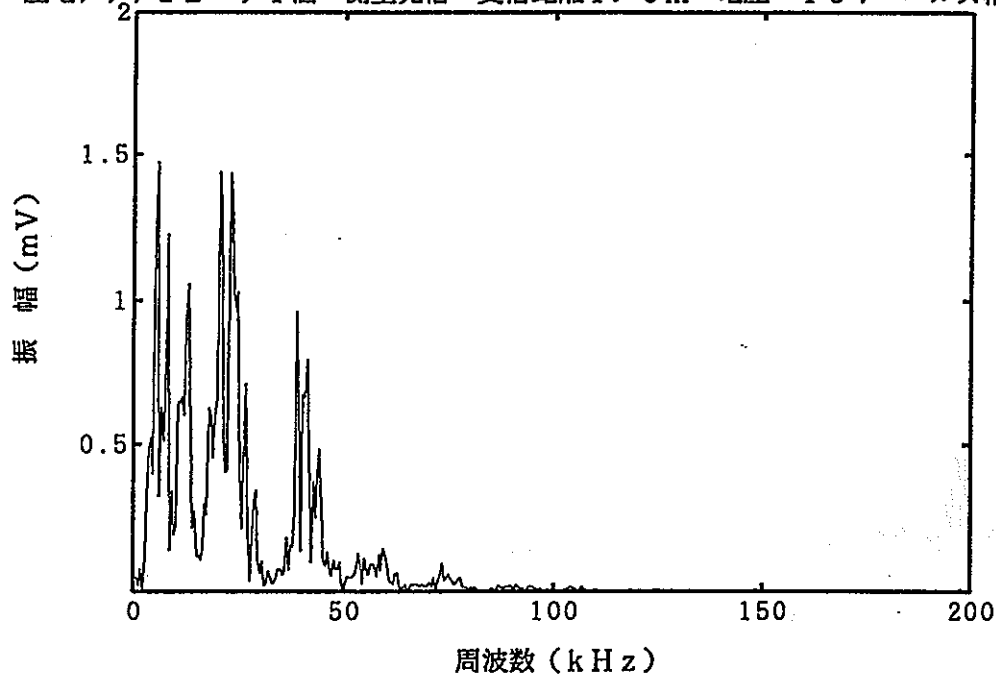
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 3V パルス幅 $60\mu\text{s}$ MAX 22.9kHz



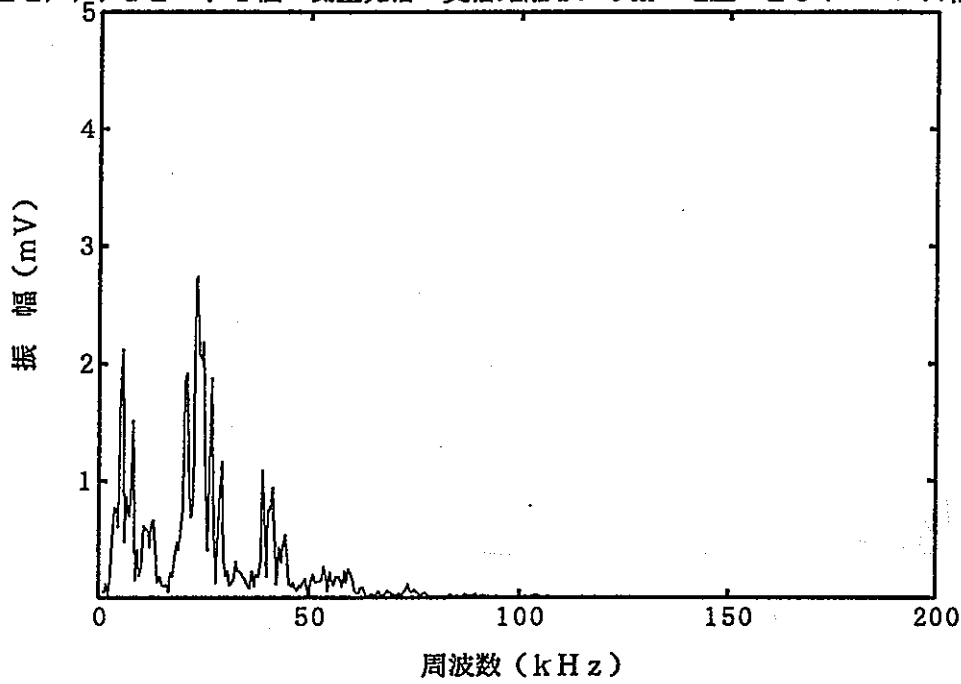
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 5V パルス幅 $60\mu\text{s}$ MAX 22.9kHz



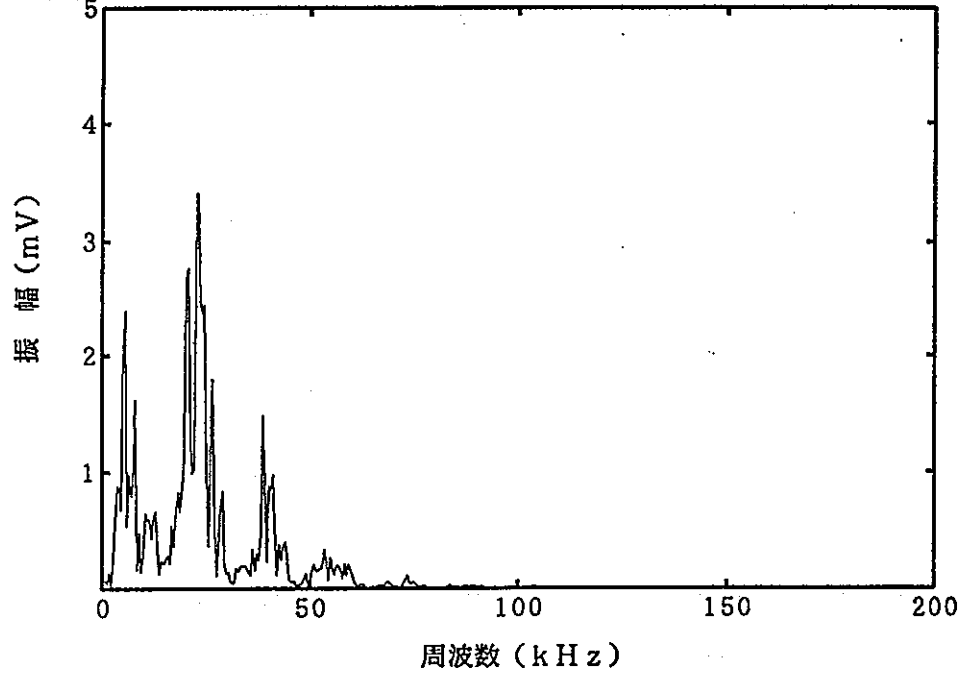
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 10V パルス幅 60 μ s MAX 5.9kHz



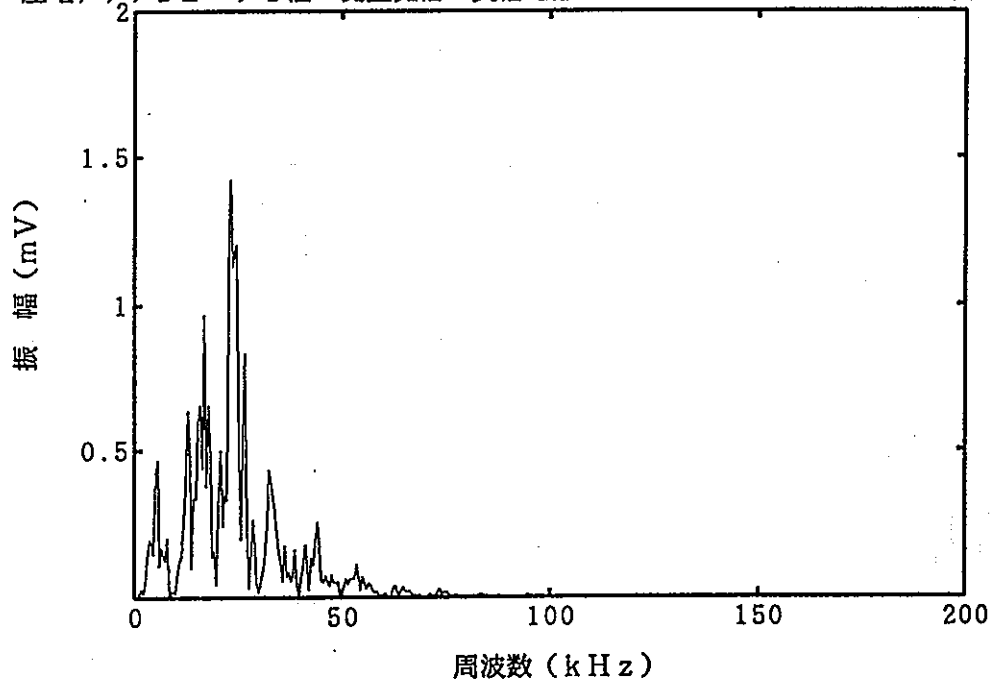
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 20V パルス幅 60 μ s MAX 23.4kHz



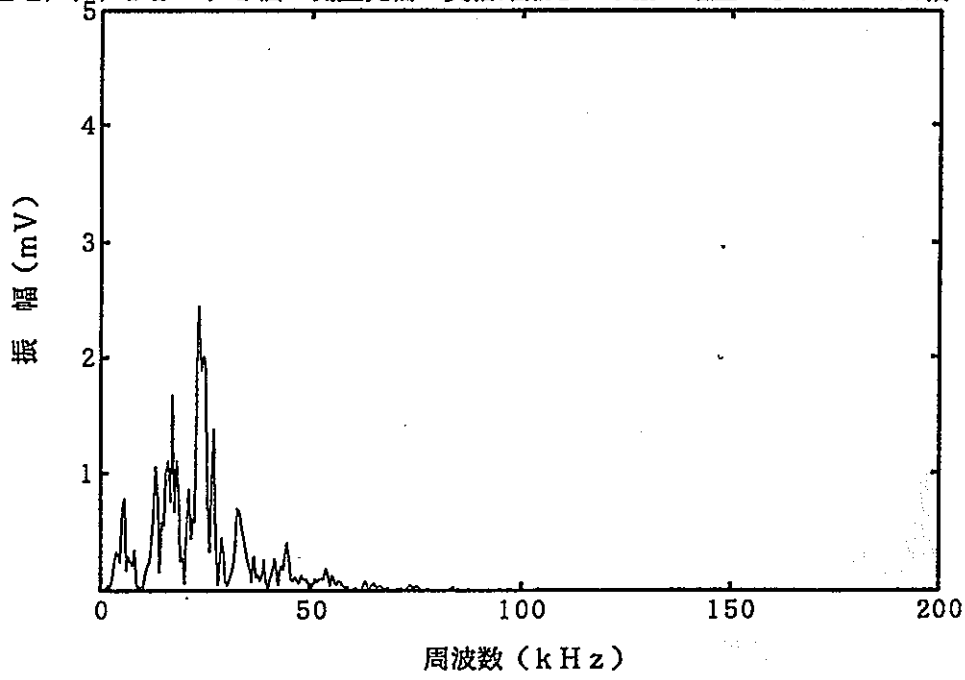
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 50V パルス幅 $60\mu\text{s}$ MAX 22.9kHz



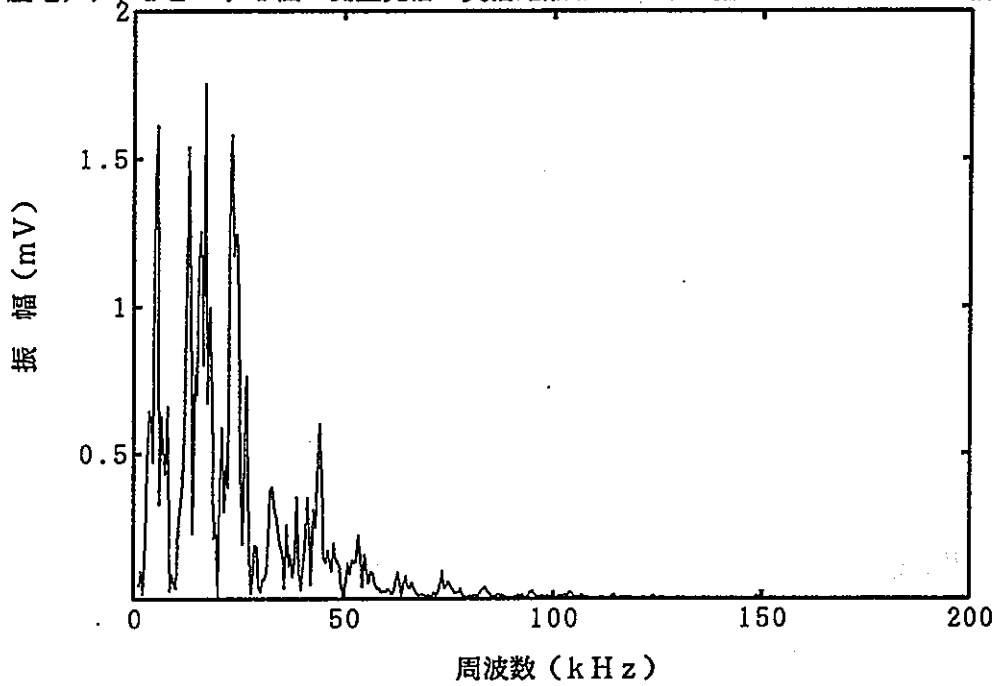
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 3V パルス幅 $100\mu\text{s}$ MAX 23.4kHz



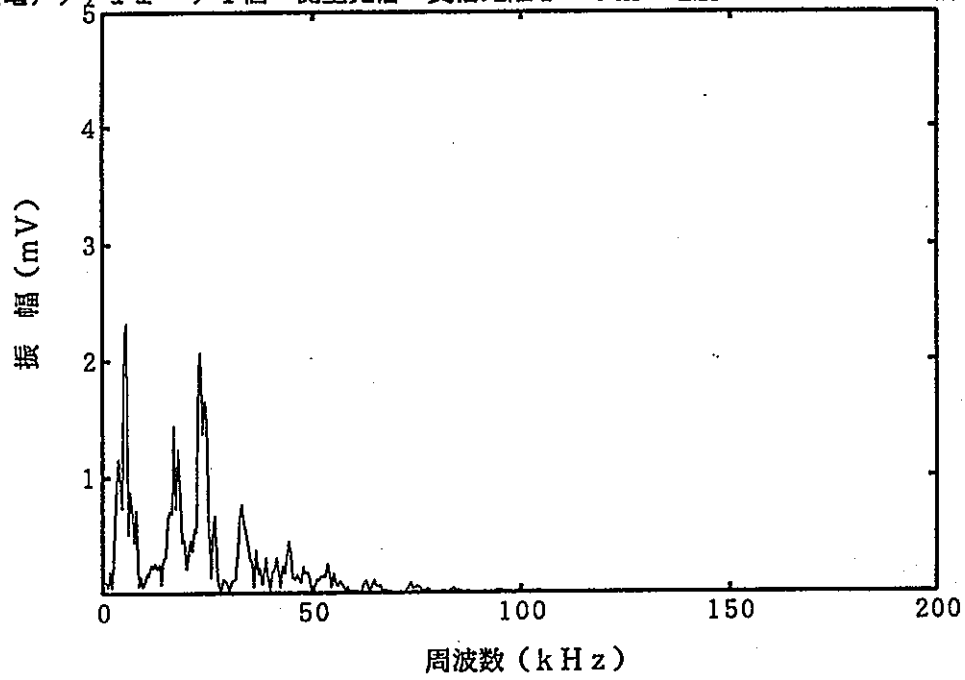
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 5V パルス幅 100 μ s MAX 23.4kHz



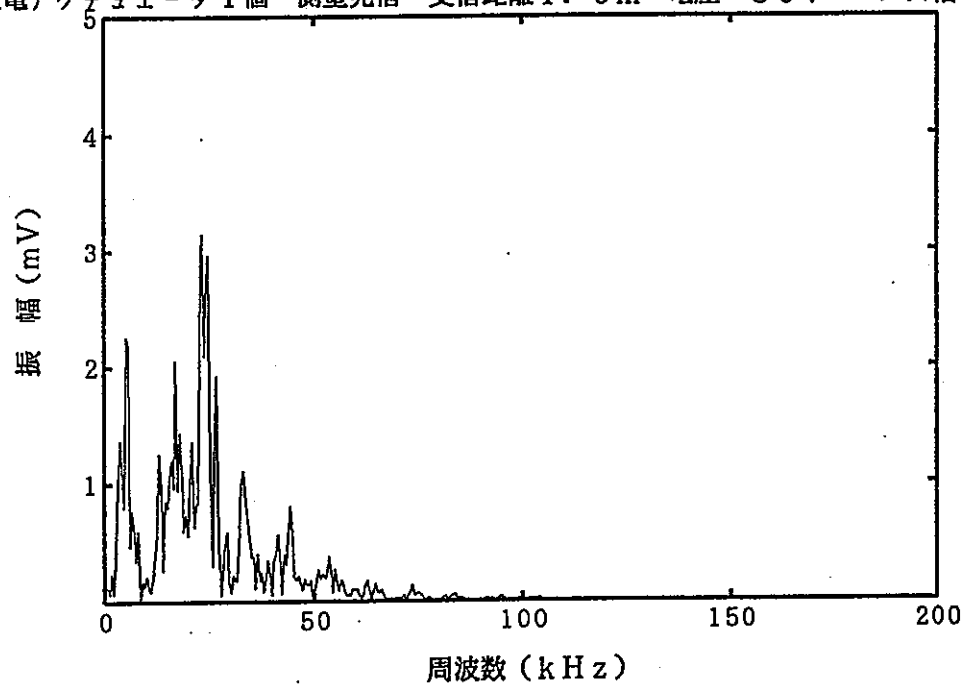
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 10V パルス幅 100 μ s MAX 17.1kHz



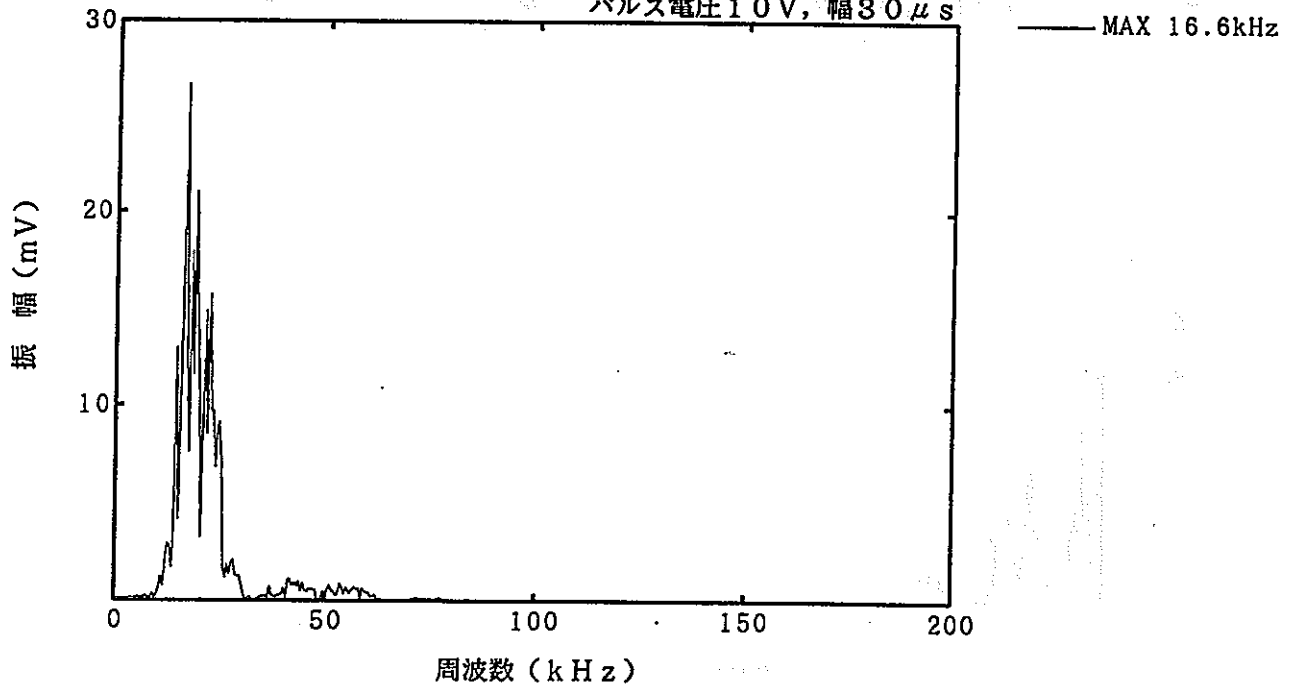
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 20V パルス幅 100 μ s MAX 5.9kHz



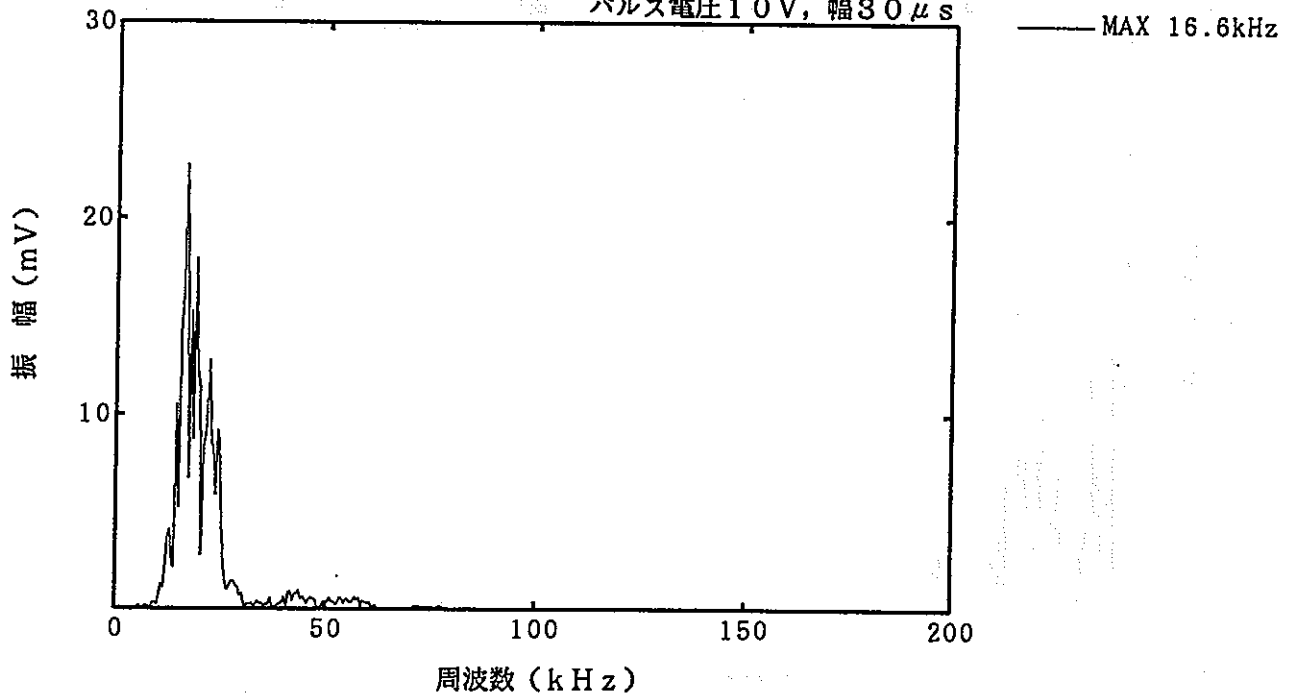
圧電アクチュエータ1個 側壁発信 受信距離1.0m 電圧 50V パルス幅 100 μ s MAX 23.4kHz

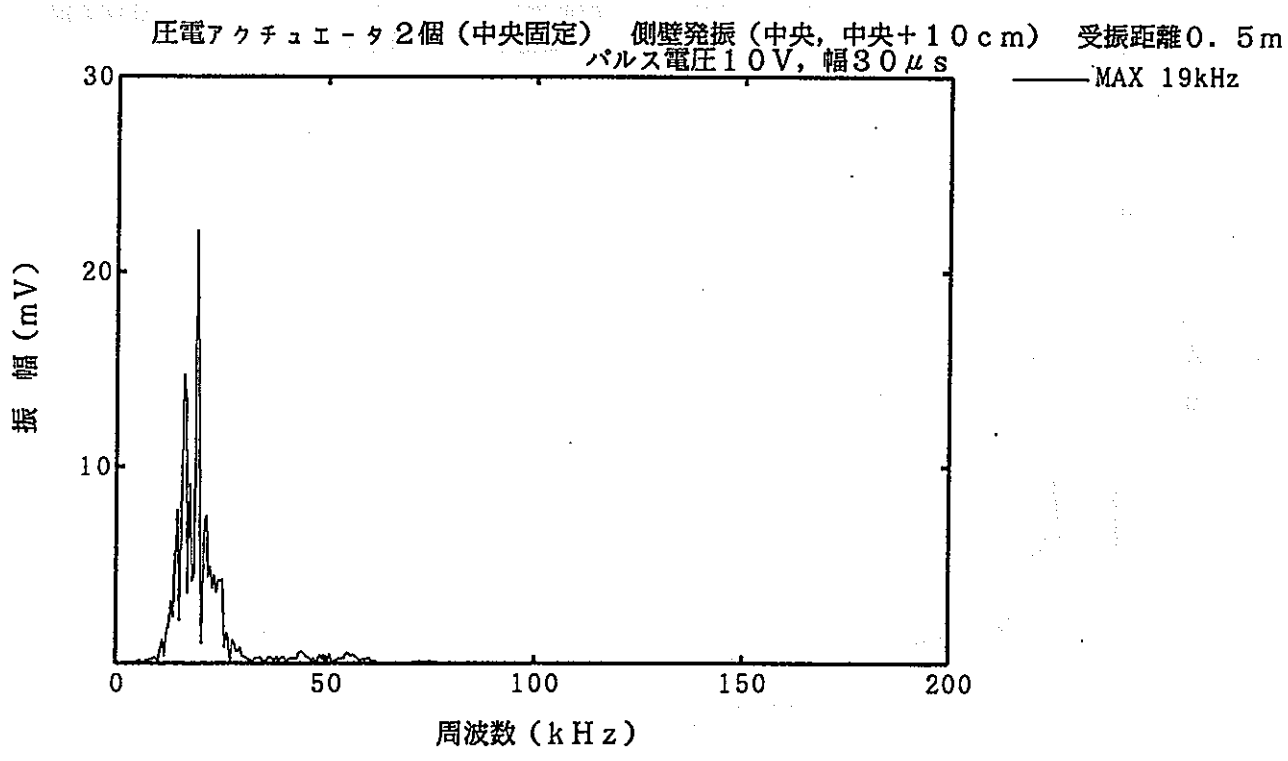
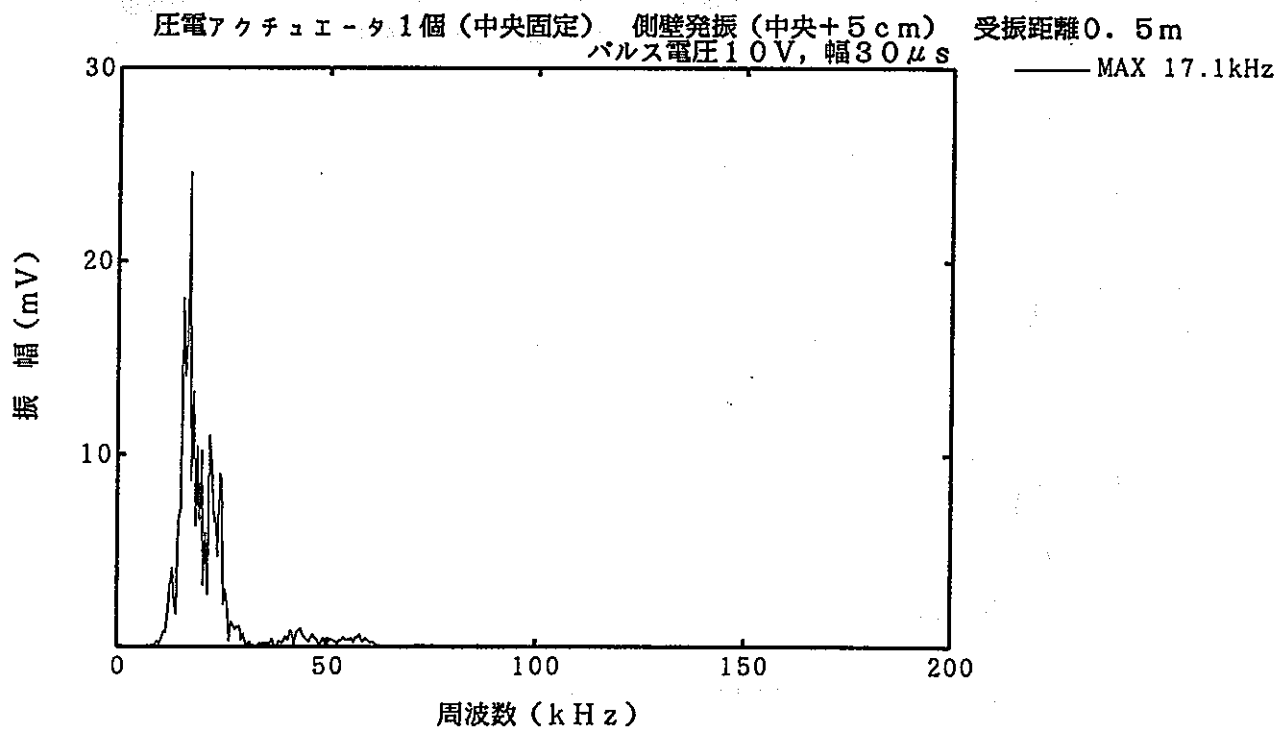


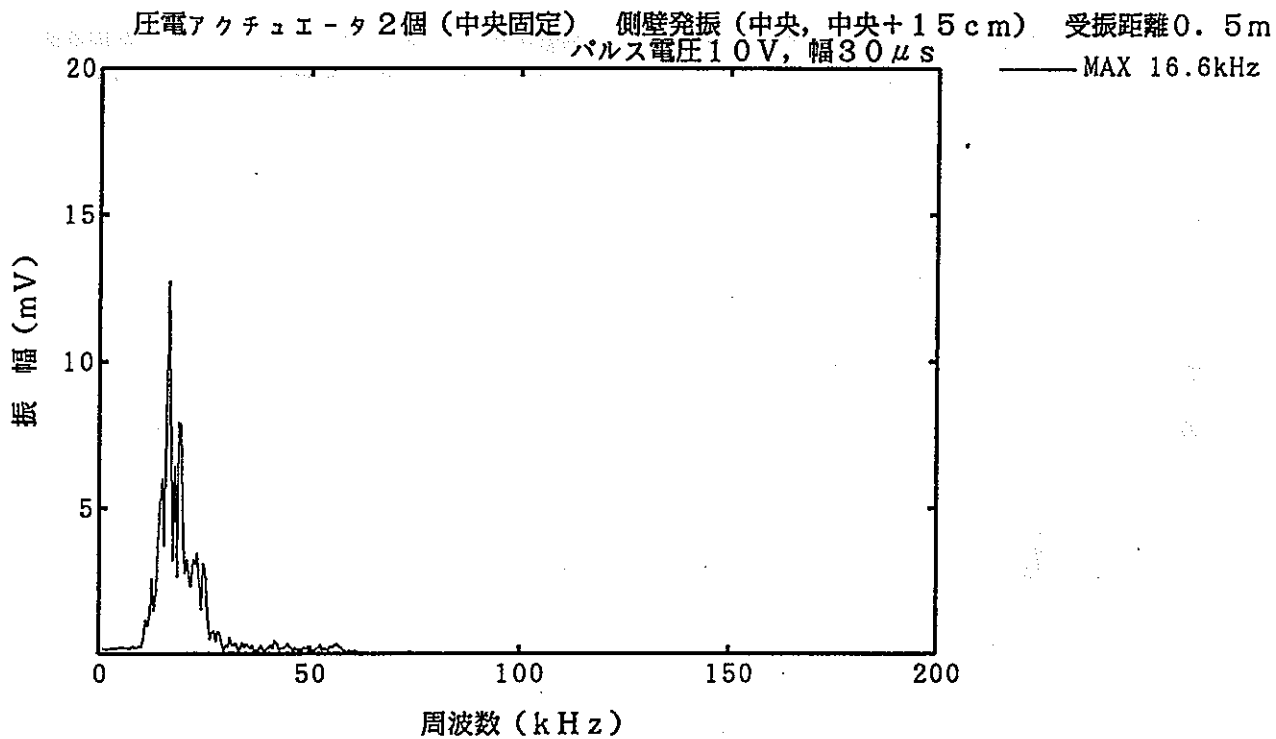
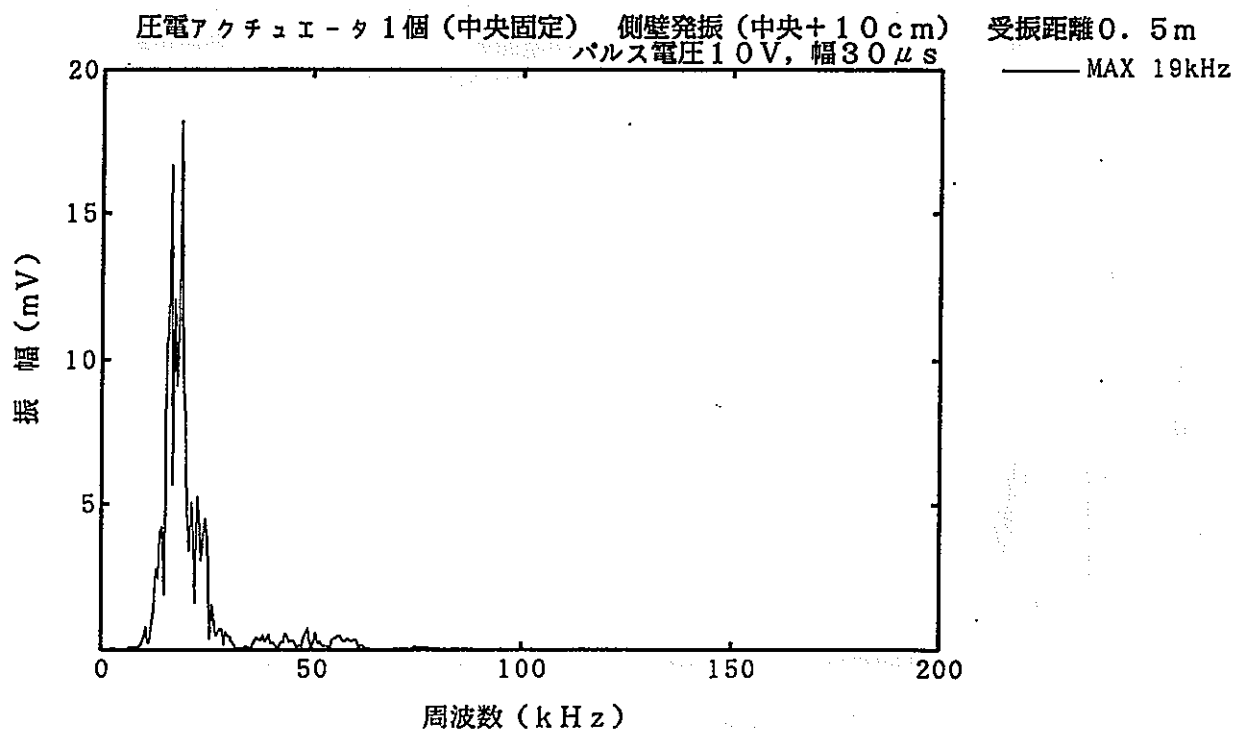
圧電アクチュエータ 1 個 (中央固定) 側壁発振 (中央+0 cm) 受振距離 0.5 m
パルス電圧 10 V, 幅 30 μ s

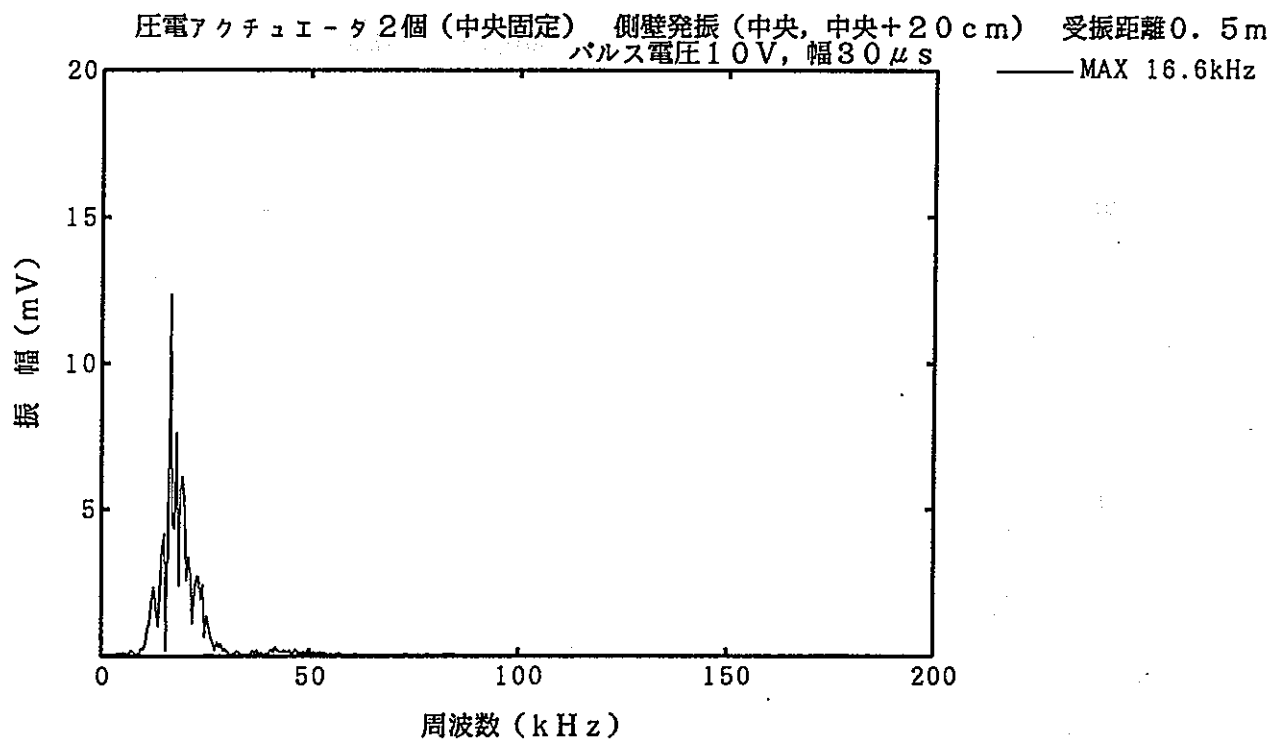
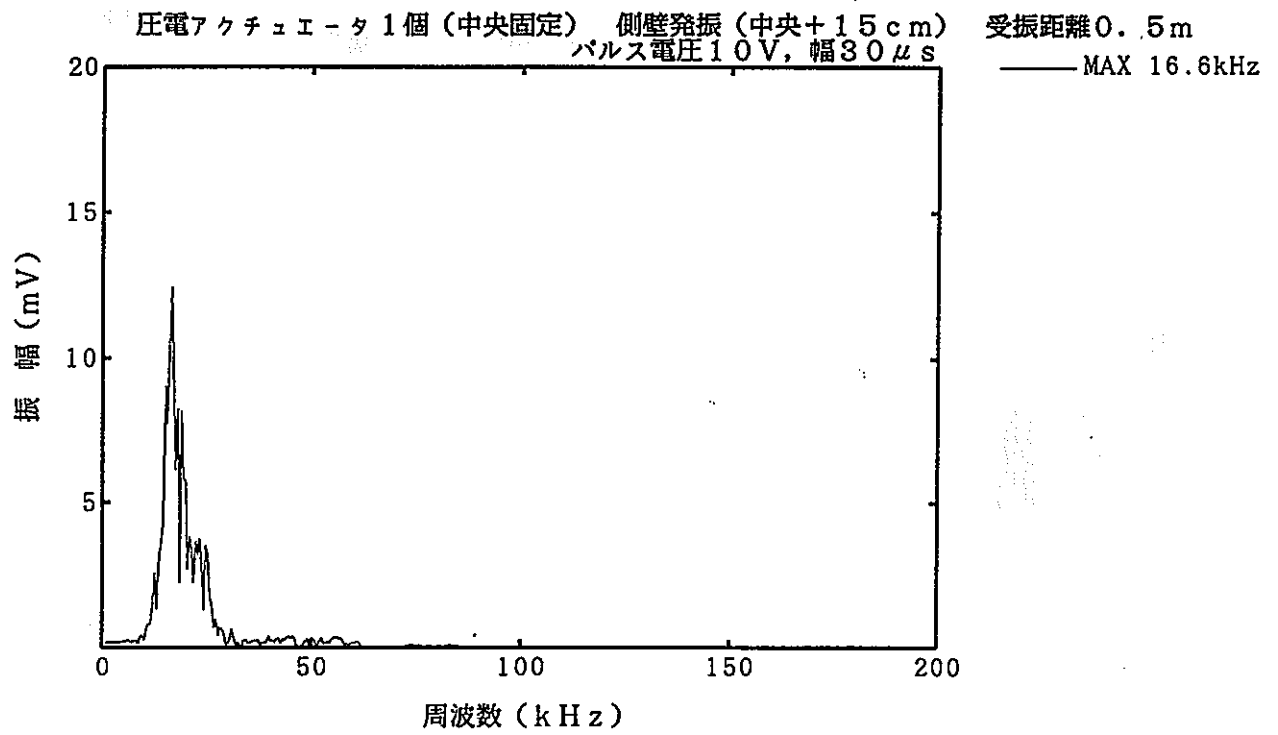


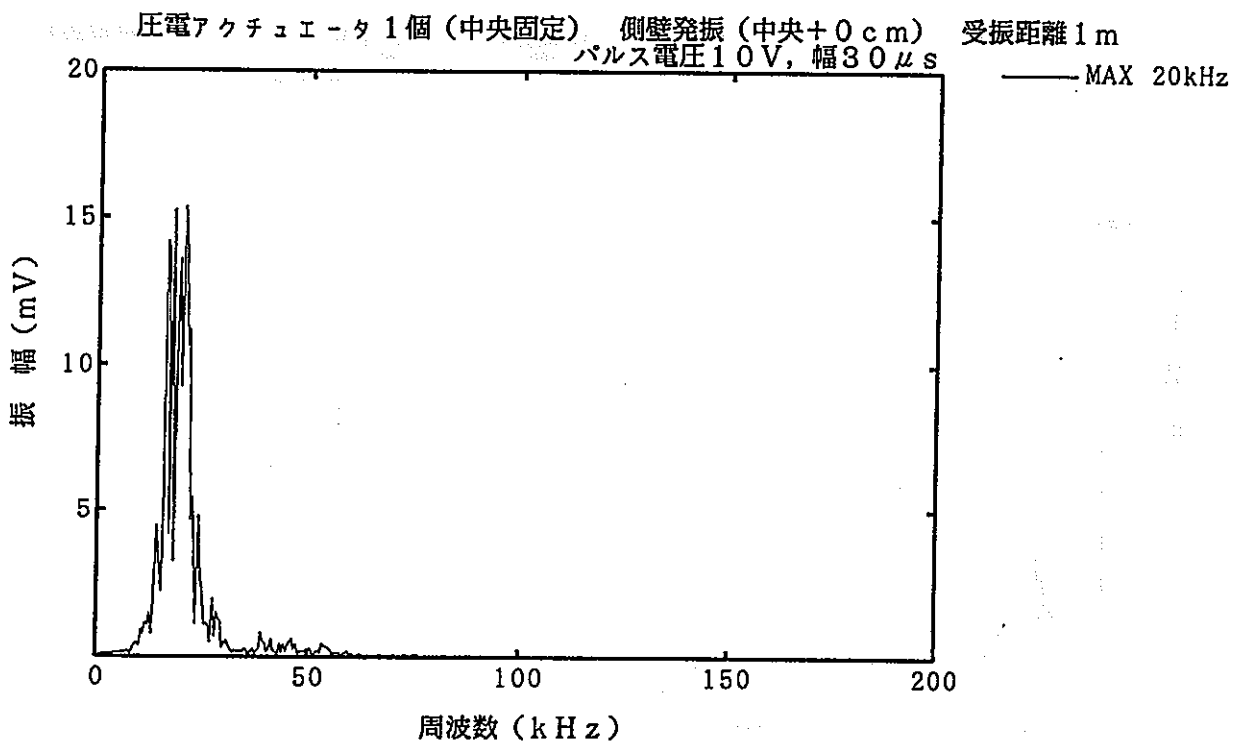
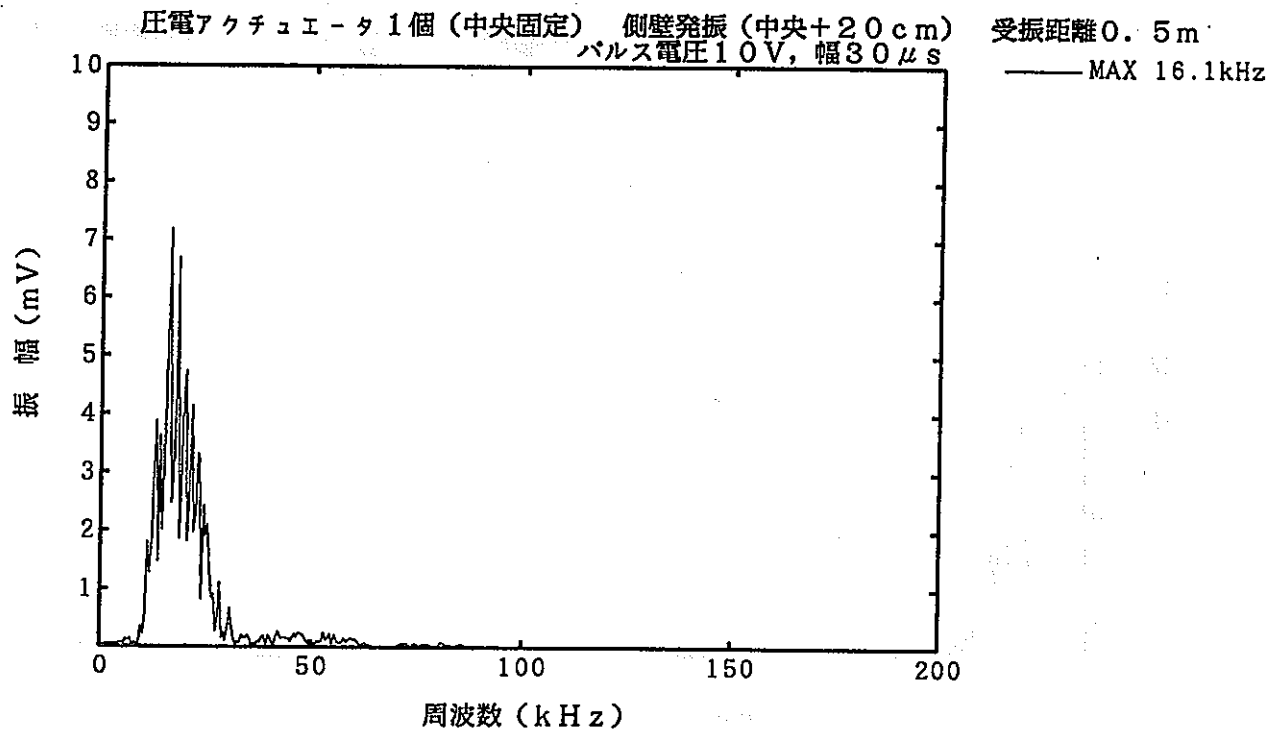
圧電アクチュエータ 2 個 (中央固定) 側壁発振 (中央, 中央+5 cm) 受振距離 0.5 m
パルス電圧 10 V, 幅 30 μ s

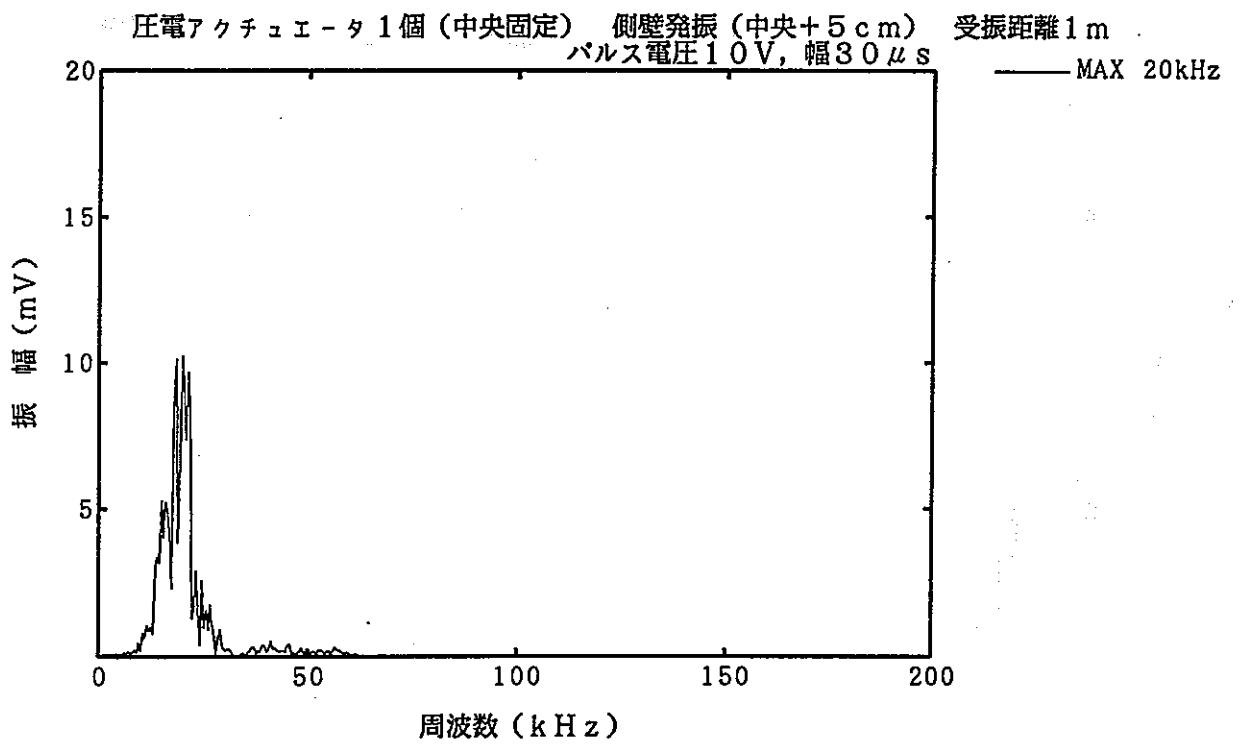
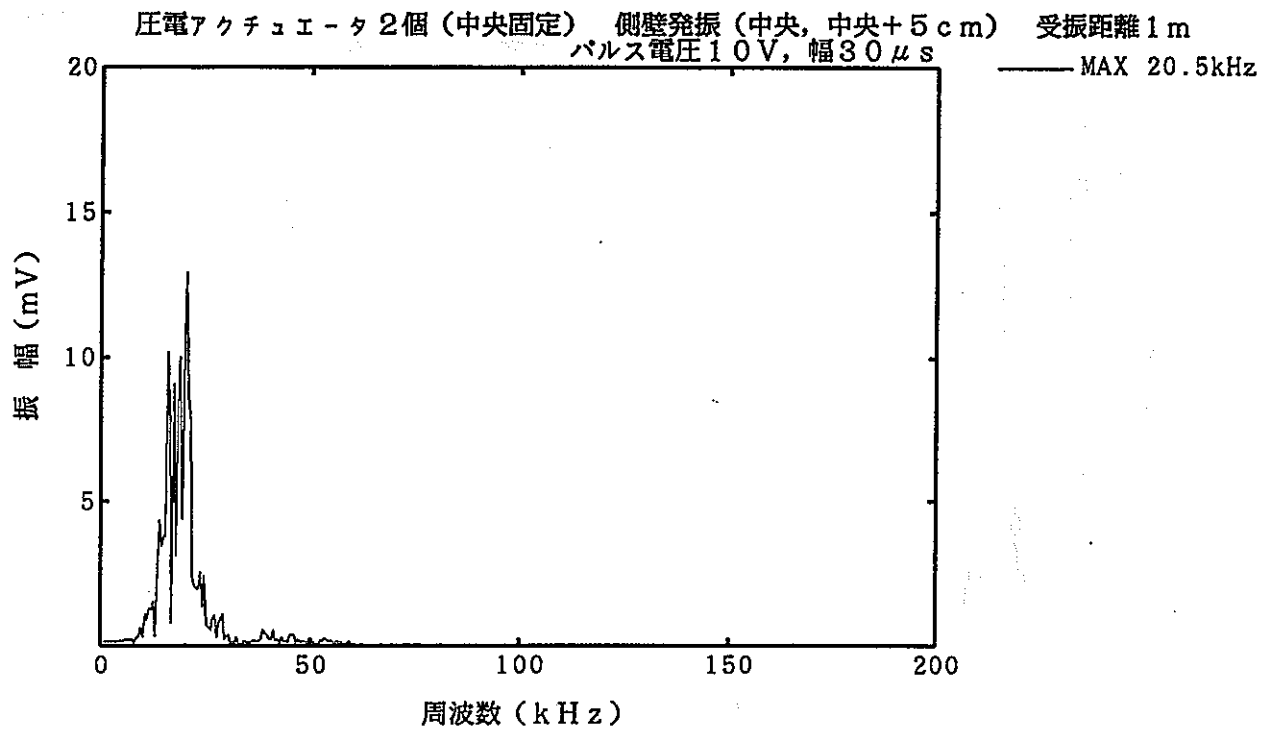




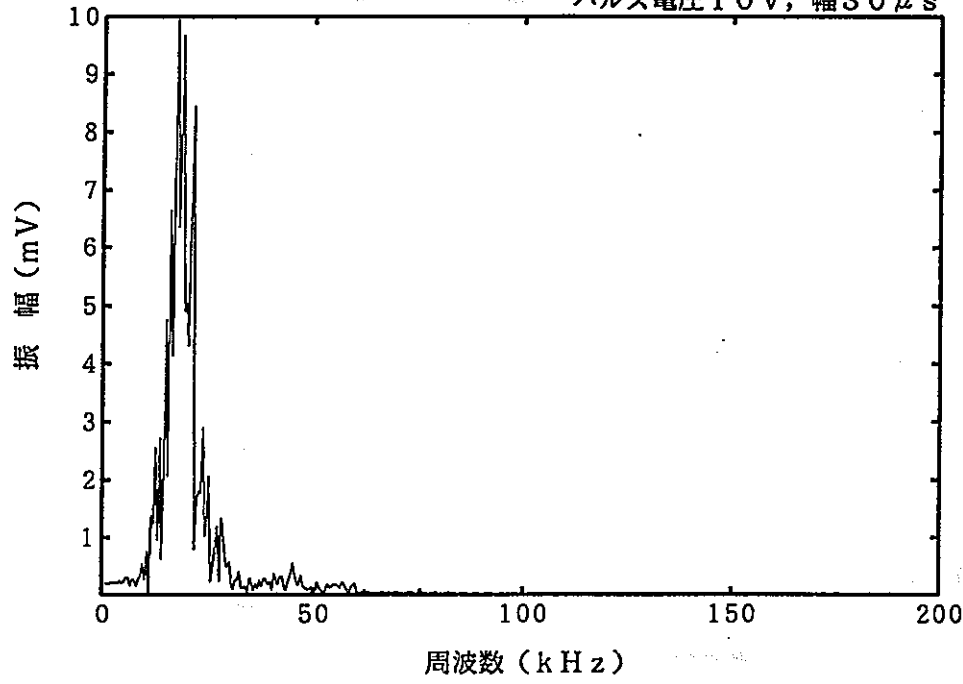




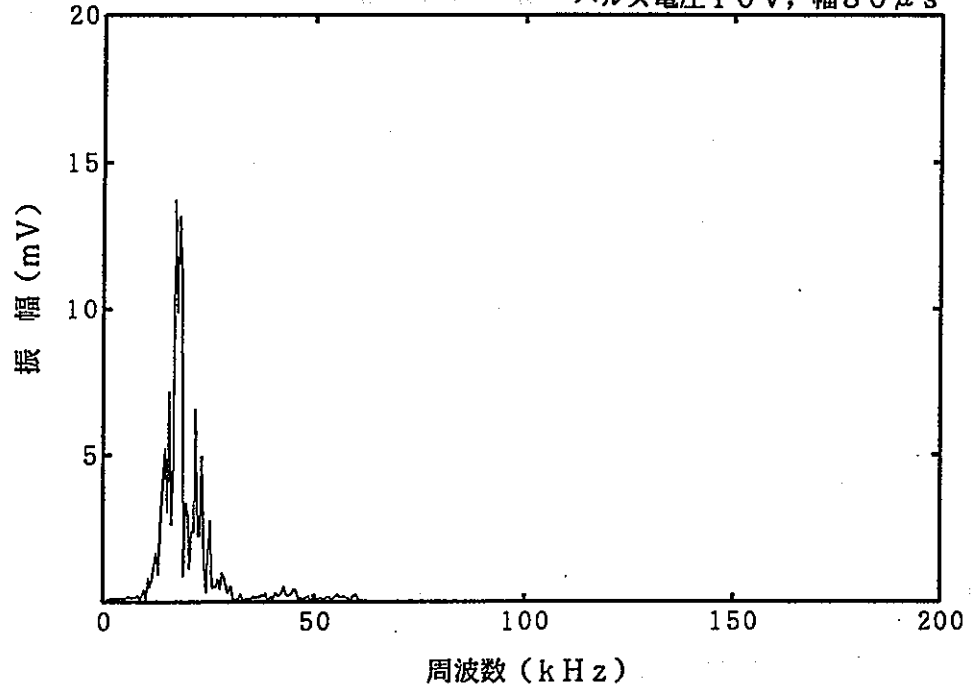


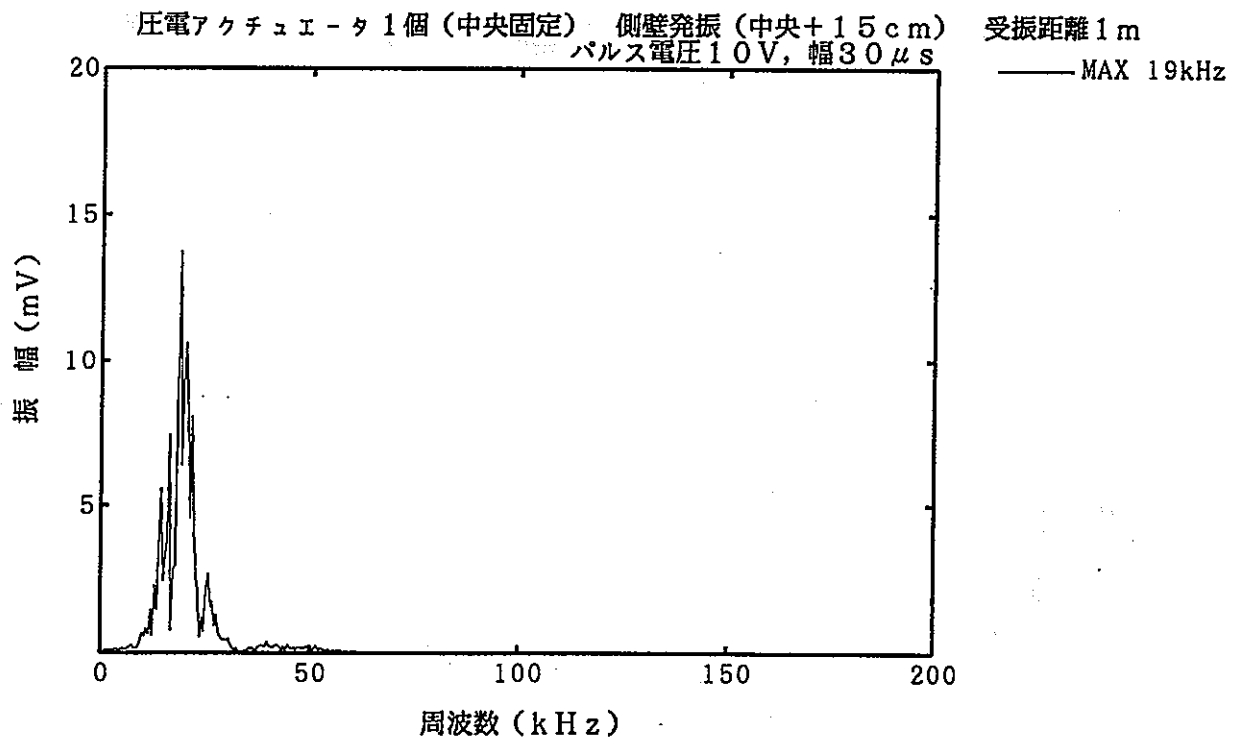
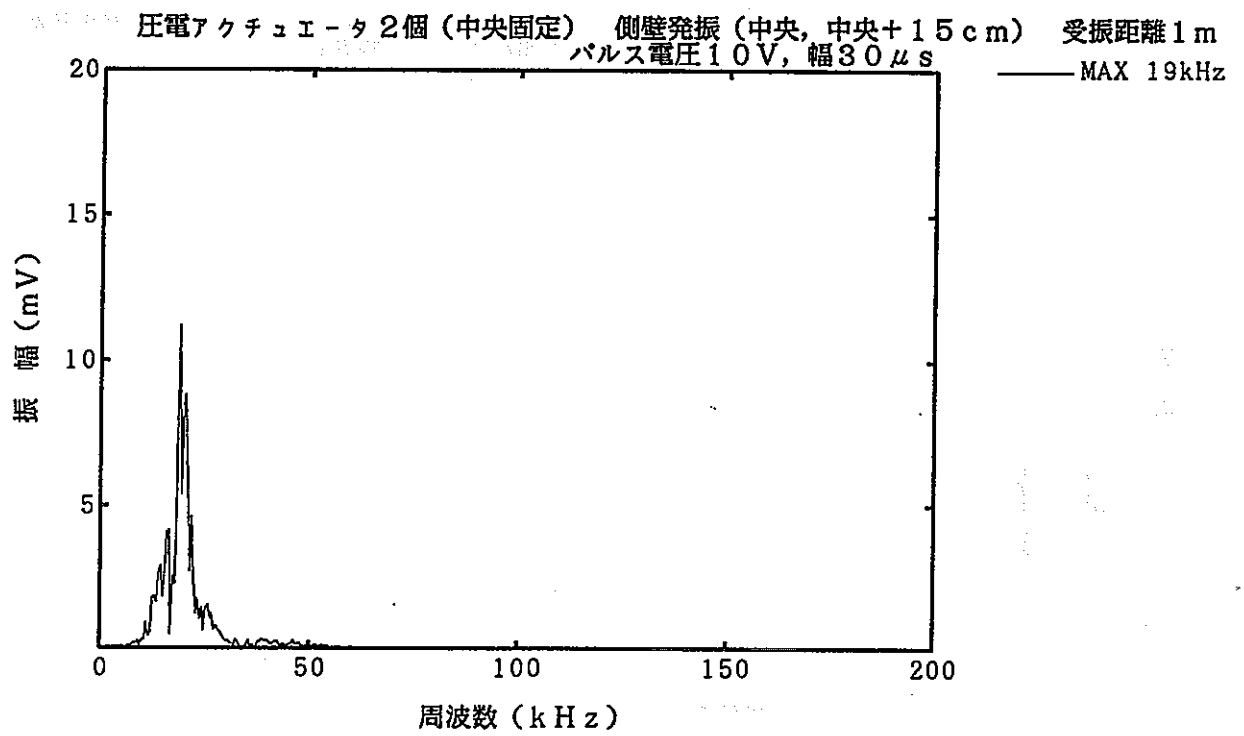


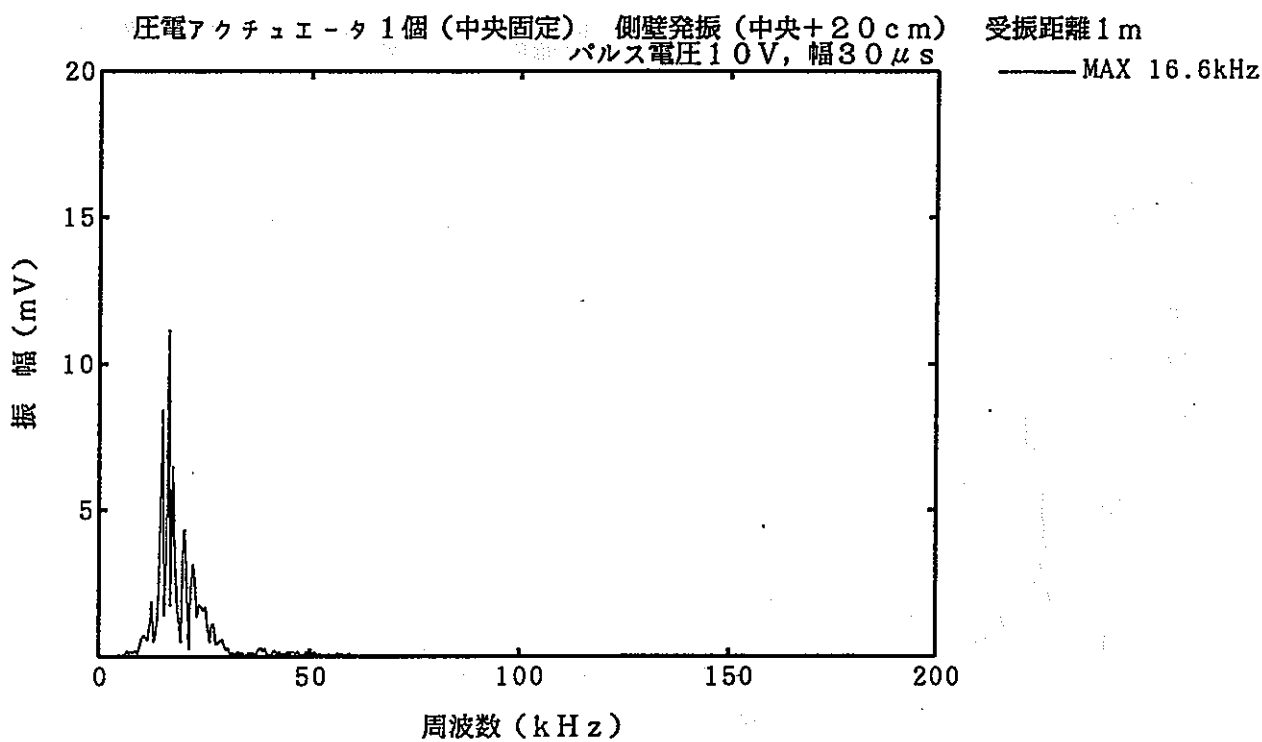
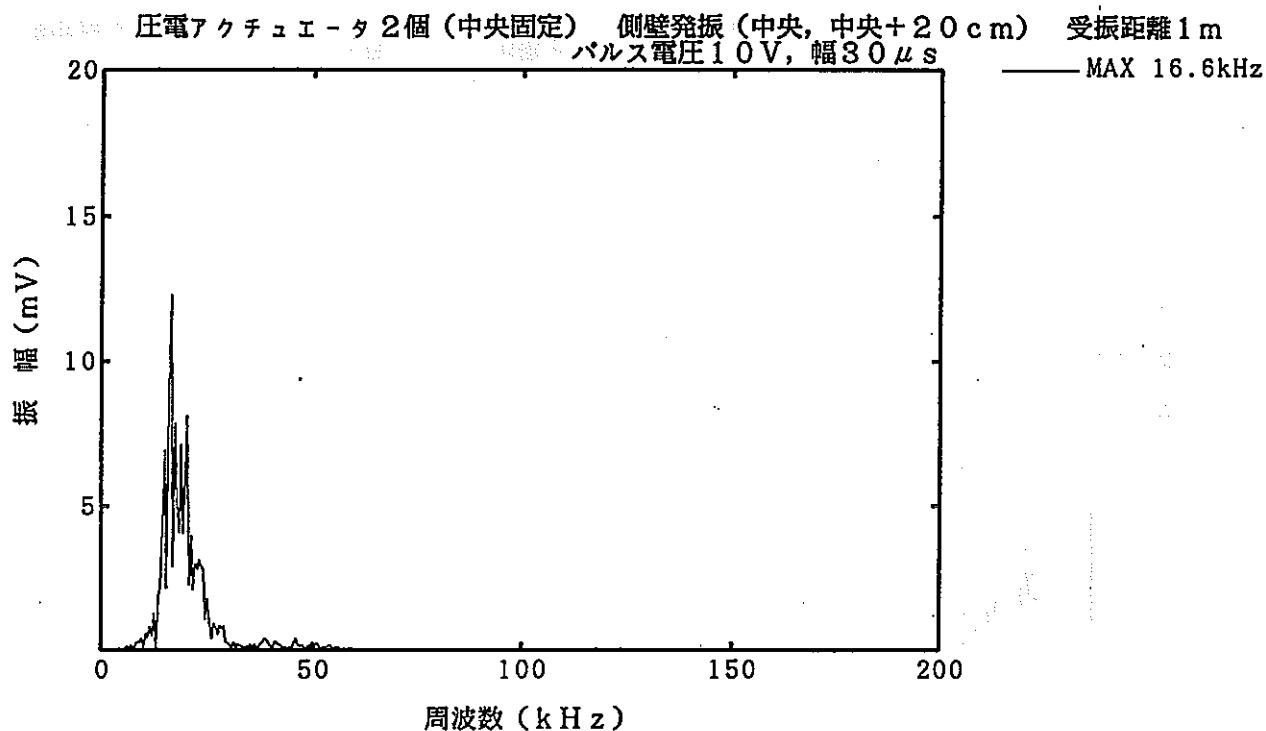
圧電アクチュエータ 2 個 (中央固定) 側壁発振 (中央, 中央+10 cm) 受振距離 1 m
パルス電圧 10 V, 幅 30 μ s



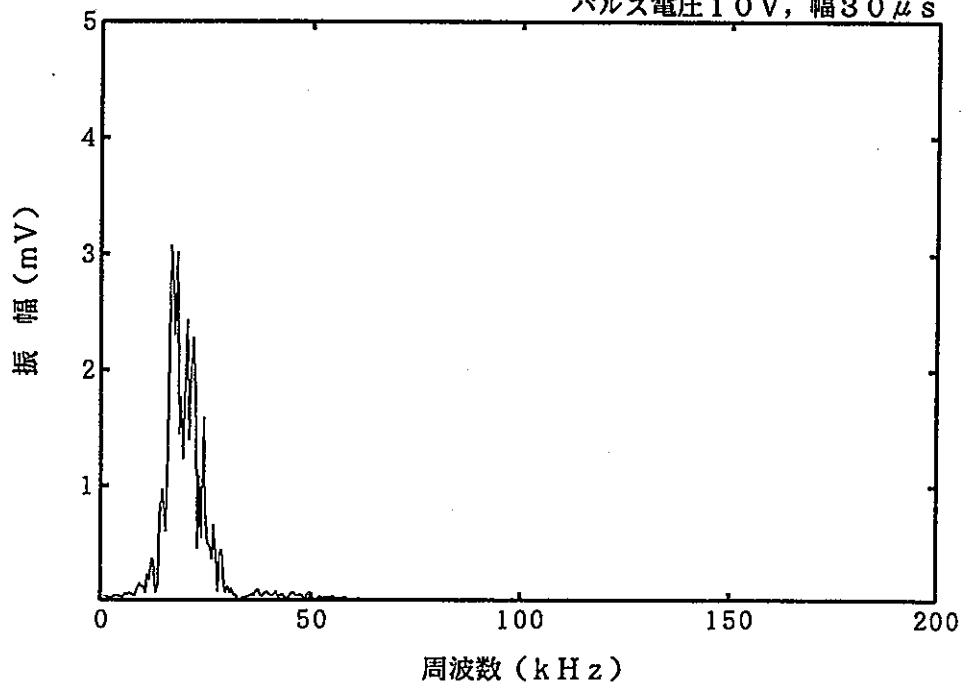
圧電アクチュエータ 1 個 (中央固定) 側壁発振 (中央+10 cm) 受振距離 1 m
パルス電圧 10 V, 幅 30 μ s



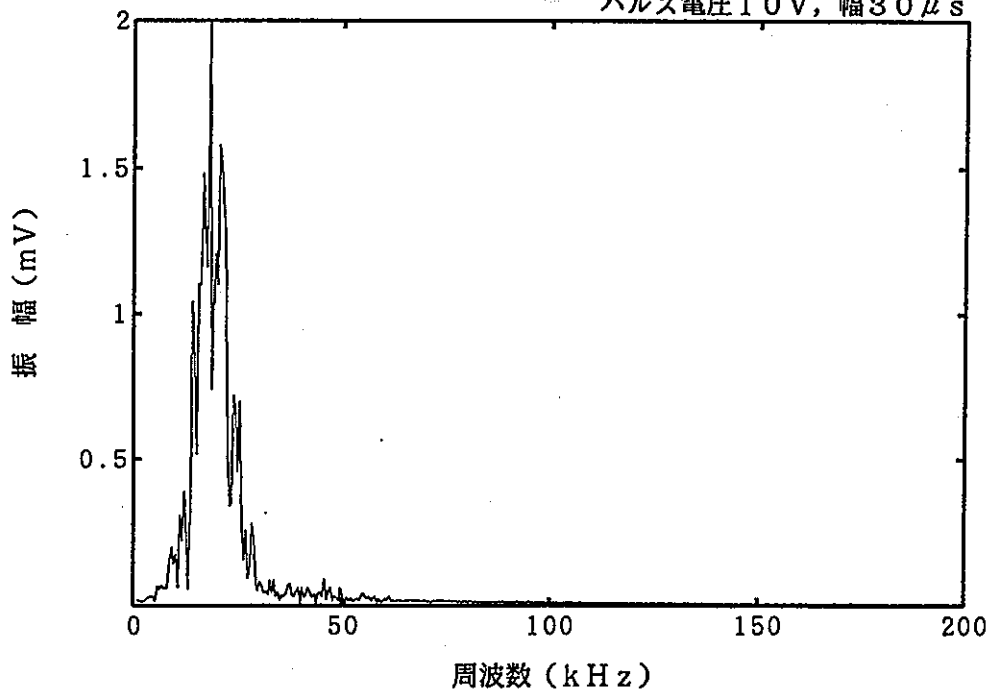




圧電アクチュエータ1個(中央固定) 側壁発振(中央+0cm) 受振距離1.5m
パルス電圧10V, 幅30 μ s



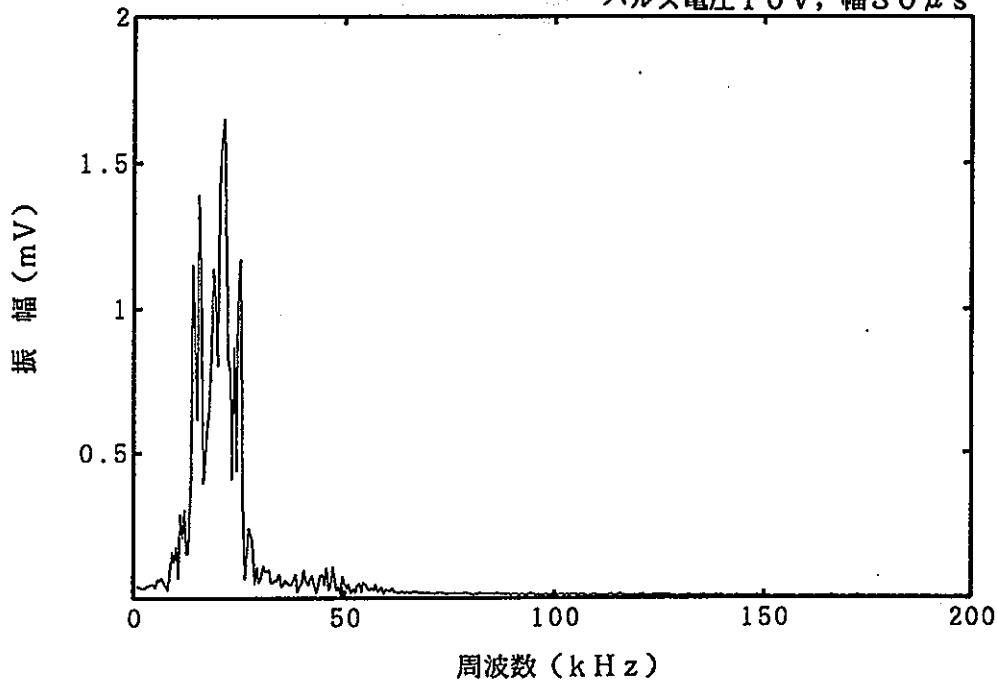
圧電アクチュエータ2個(中央固定) 側壁発振(中央, 中央+5cm) 受振距離1.5m
パルス電圧10V, 幅30 μ s



圧電アクチュエータ 1 個 (中央固定) 側壁発振 (中央+5 cm) 受振距離 1.5 m

パルス電圧 10 V, 幅 30 μ s

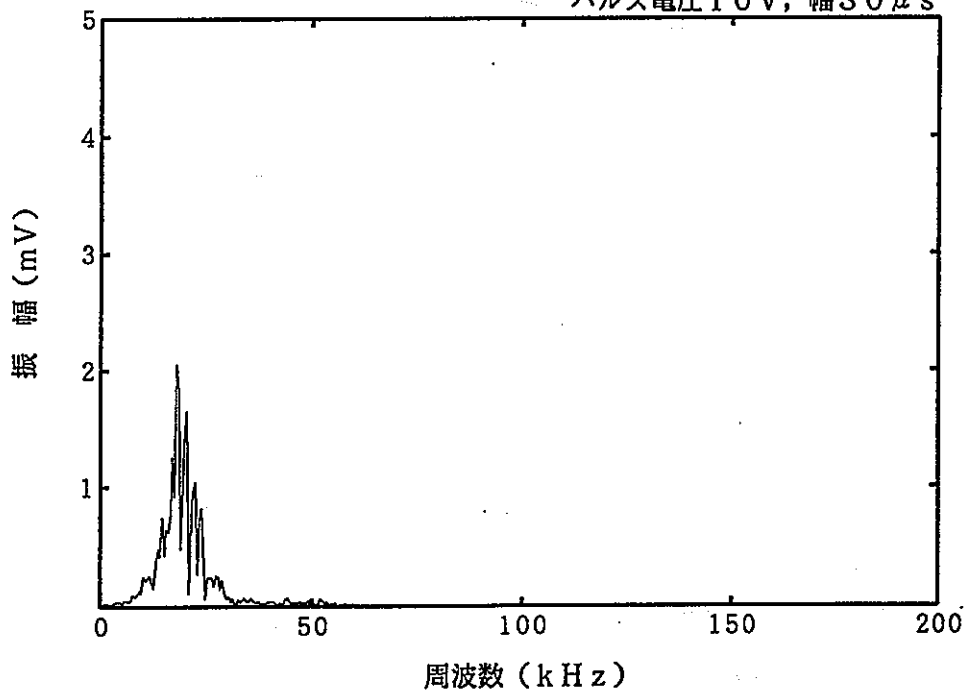
MAX 21.5 kHz



圧電アクチュエータ 2 個 (中央固定) 側壁発振 (中央, 中央+10 cm) 受振距離 1.5 m

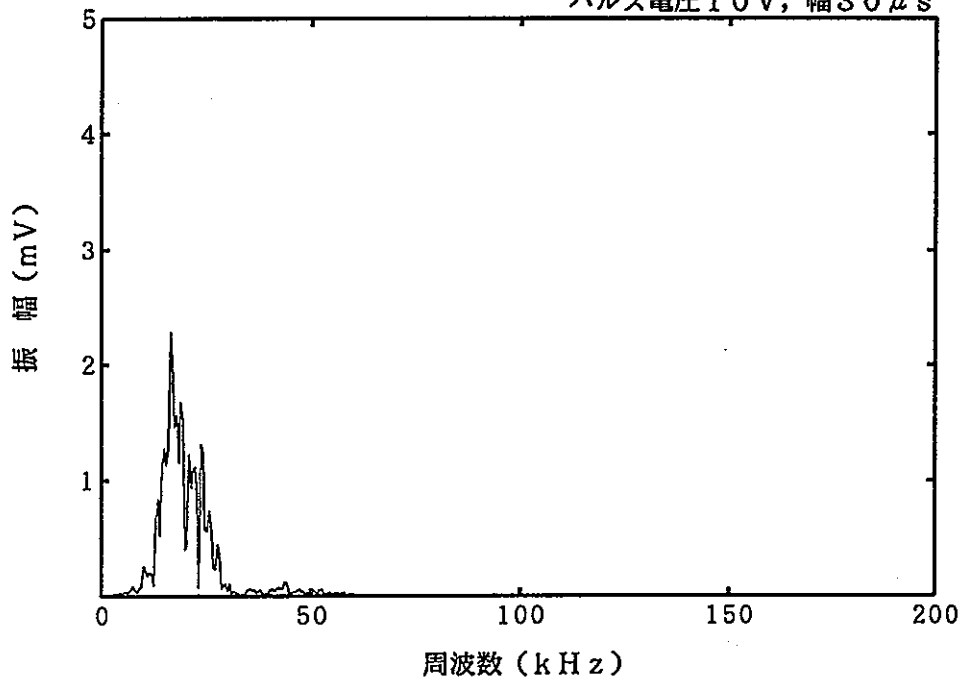
パルス電圧 10 V, 幅 30 μ s

MAX 18.1 kHz



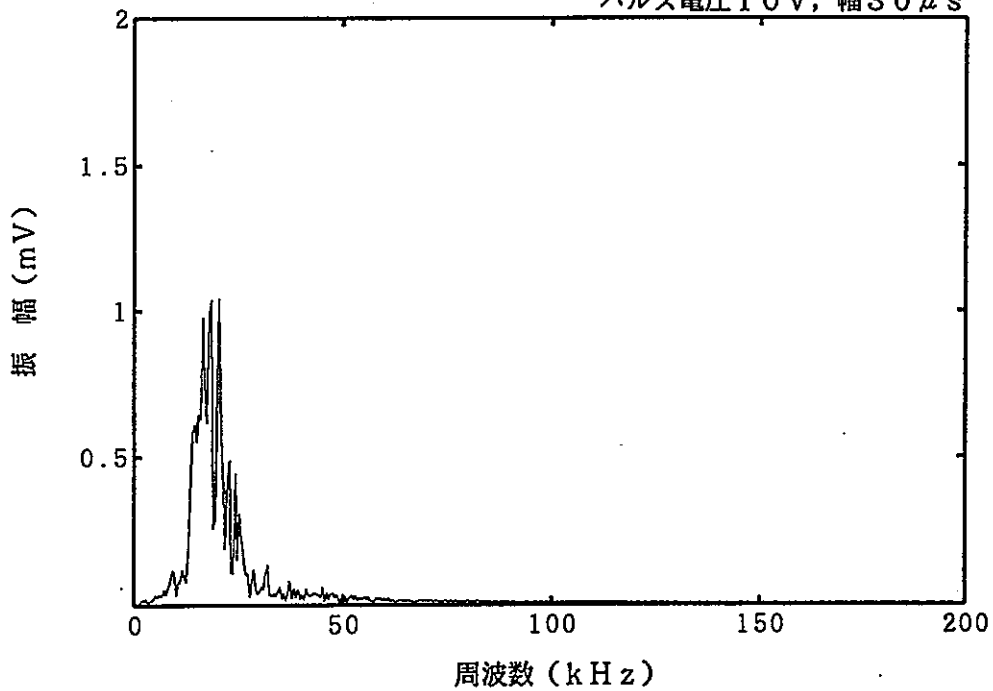
圧電アクチュエータ1個(中央固定) 側壁発振(中央+10cm)
パルス電圧10V, 幅30 μ s

受振距離1.5m
—— MAX 16.6kHz



圧電アクチュエータ2個(中央固定) 側壁発振(中央, 中央+15cm)
パルス電圧10V, 幅30 μ s

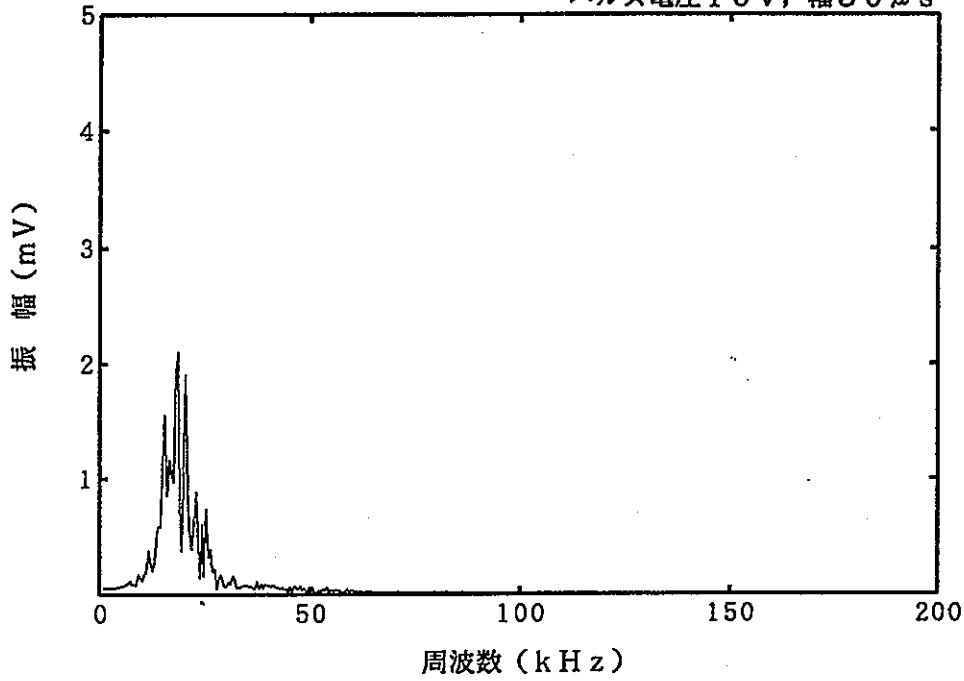
受振距離1.5m
—— MAX 20.5kHz



圧電アクチュエータ 1 個 (中央固定) 側壁発振 (中央+15 cm)
パルス電圧 10 V, 幅 30 μ s

受振距離 1.5 m

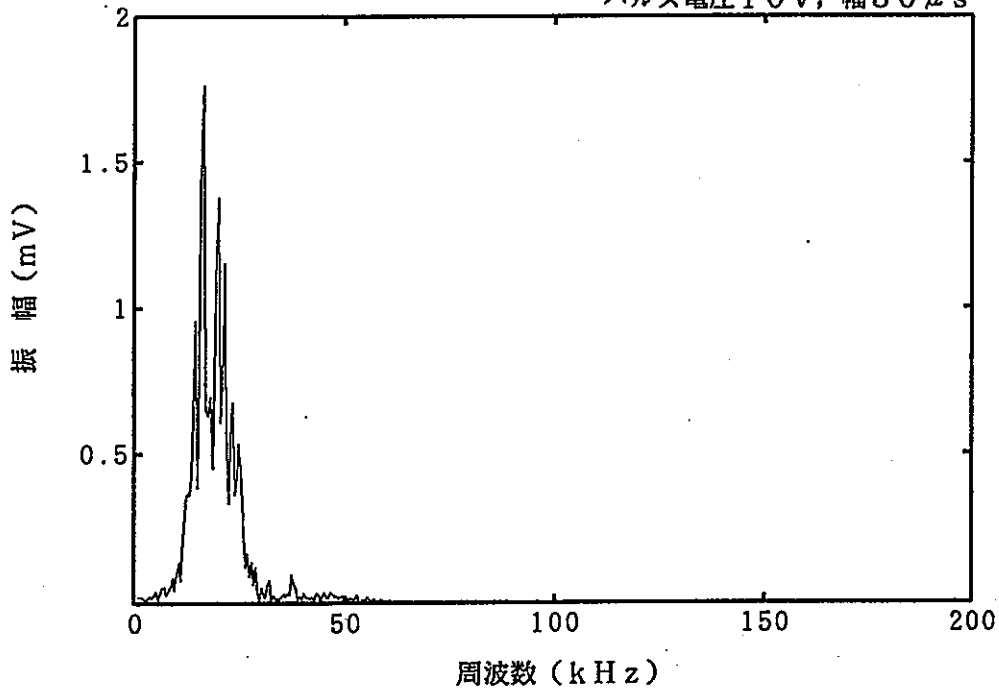
MAX 18.6 kHz



圧電アクチュエータ 2 個 (中央固定) 側壁発振 (中央, 中央+20 cm)
パルス電圧 10 V, 幅 30 μ s

受振距離 1.5 m

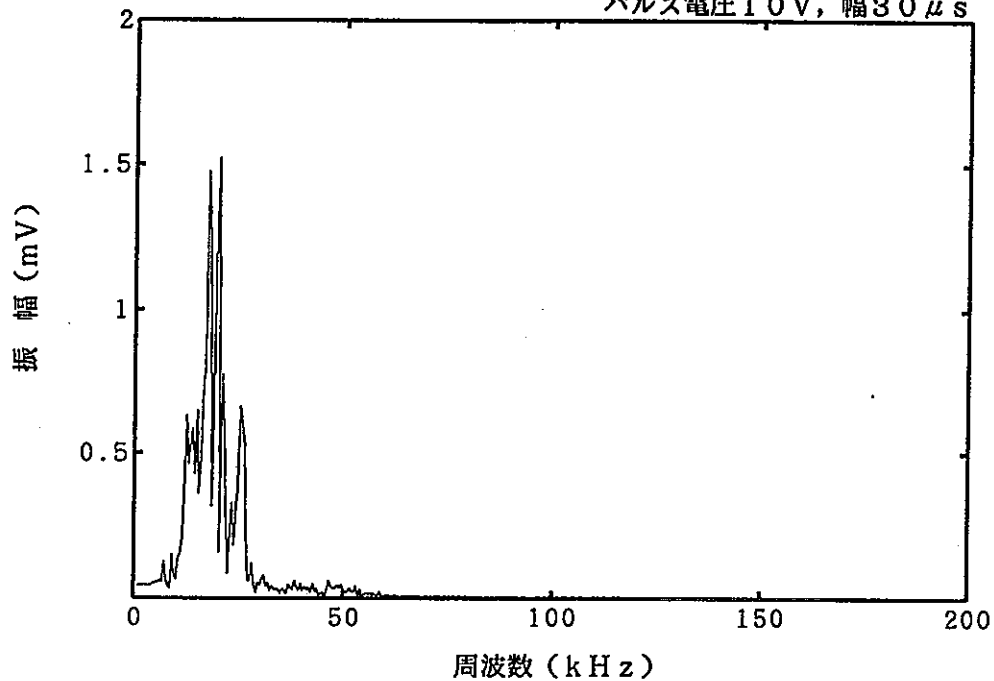
MAX 16.6 kHz

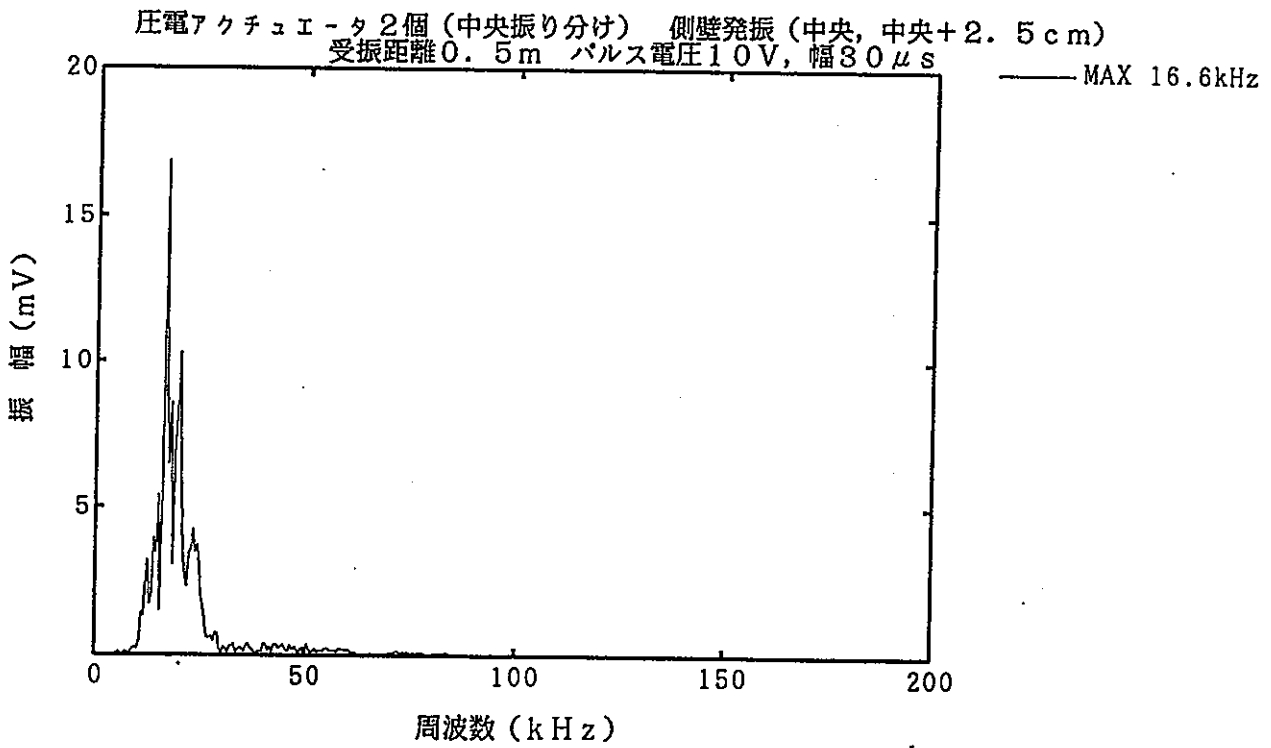
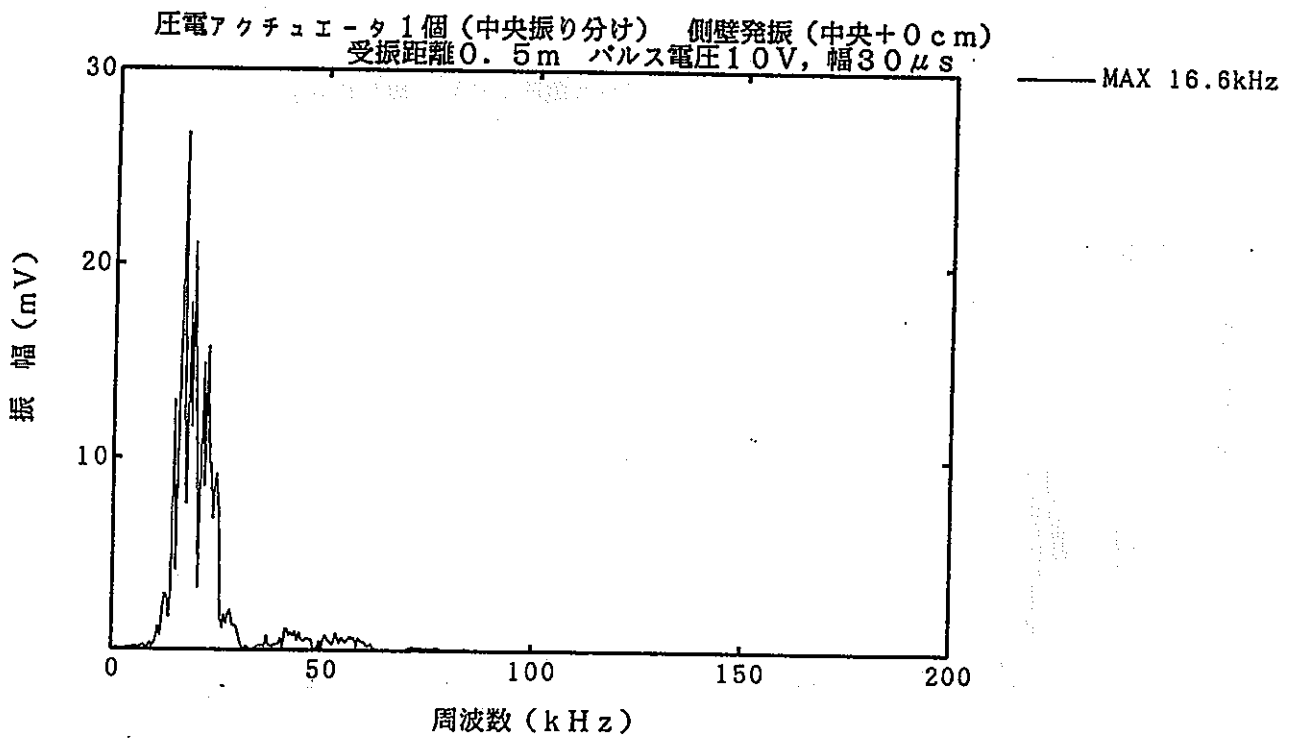


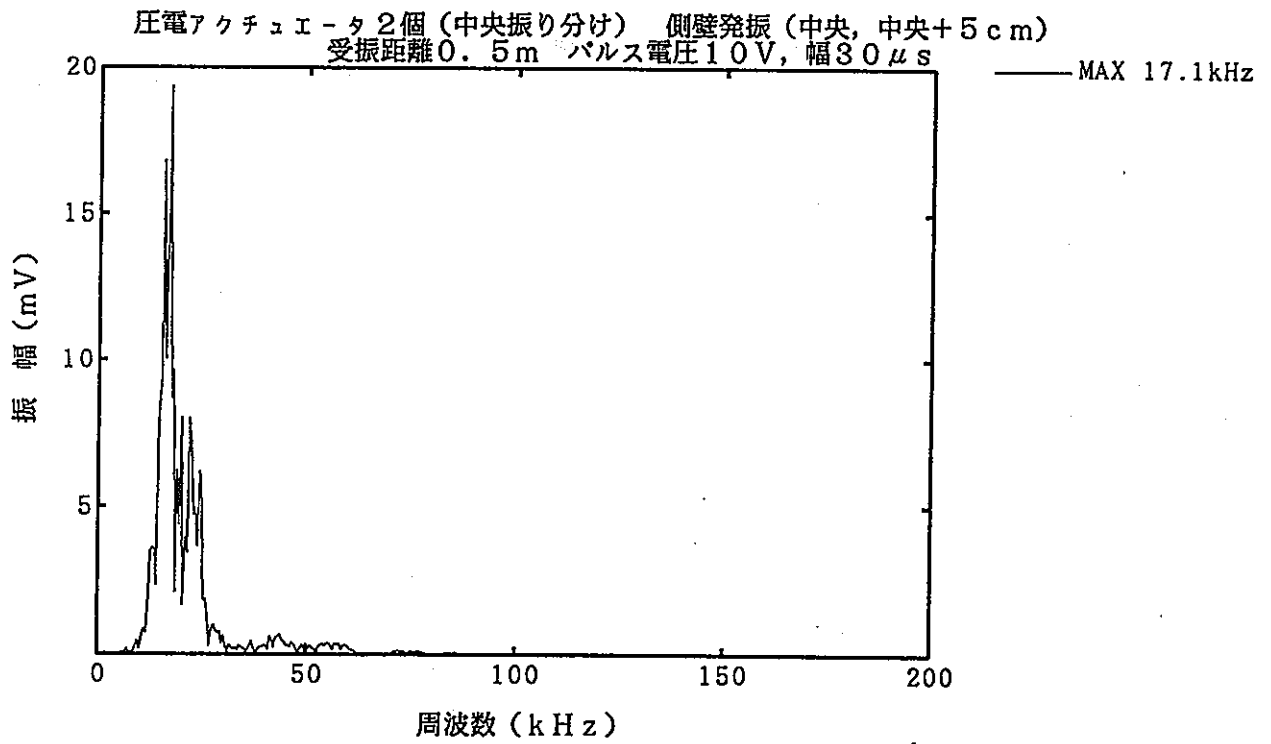
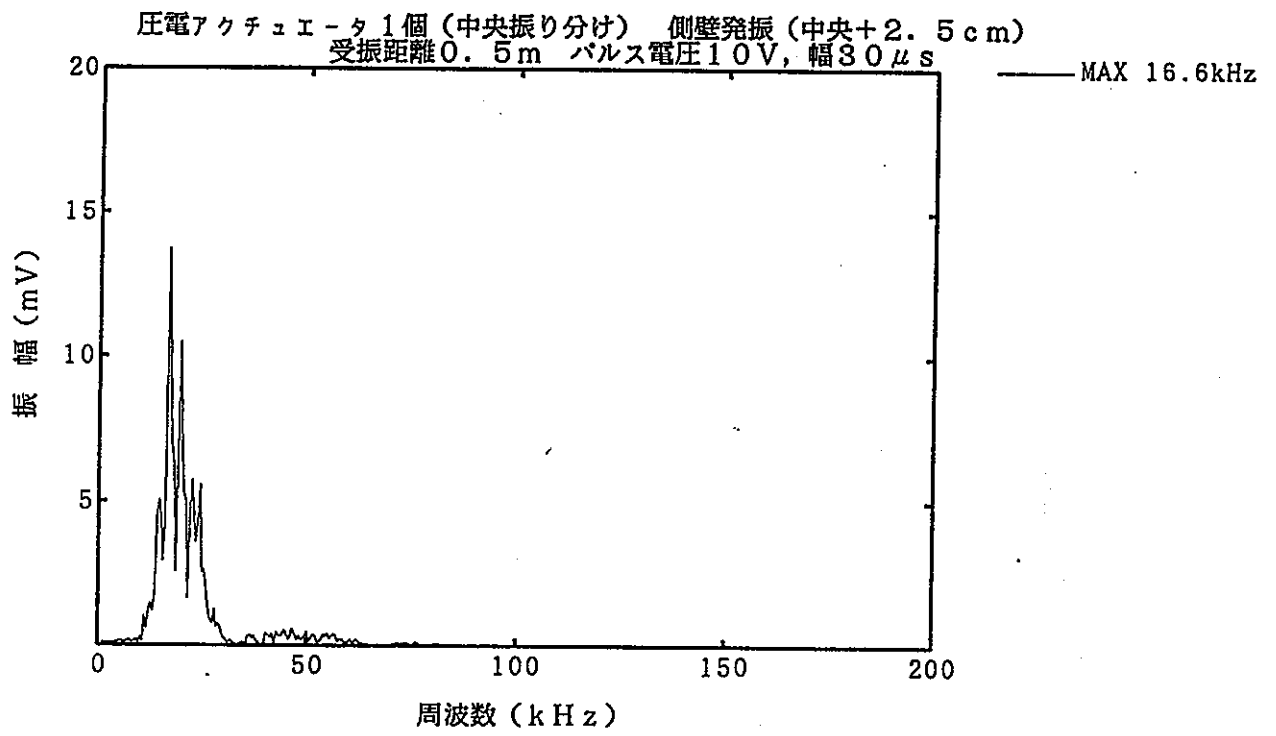
圧電アクチュエータ 1 個 (中央固定) 側壁発振 (中央 + 20 cm)
パルス電圧 10 V, 幅 30 μ s

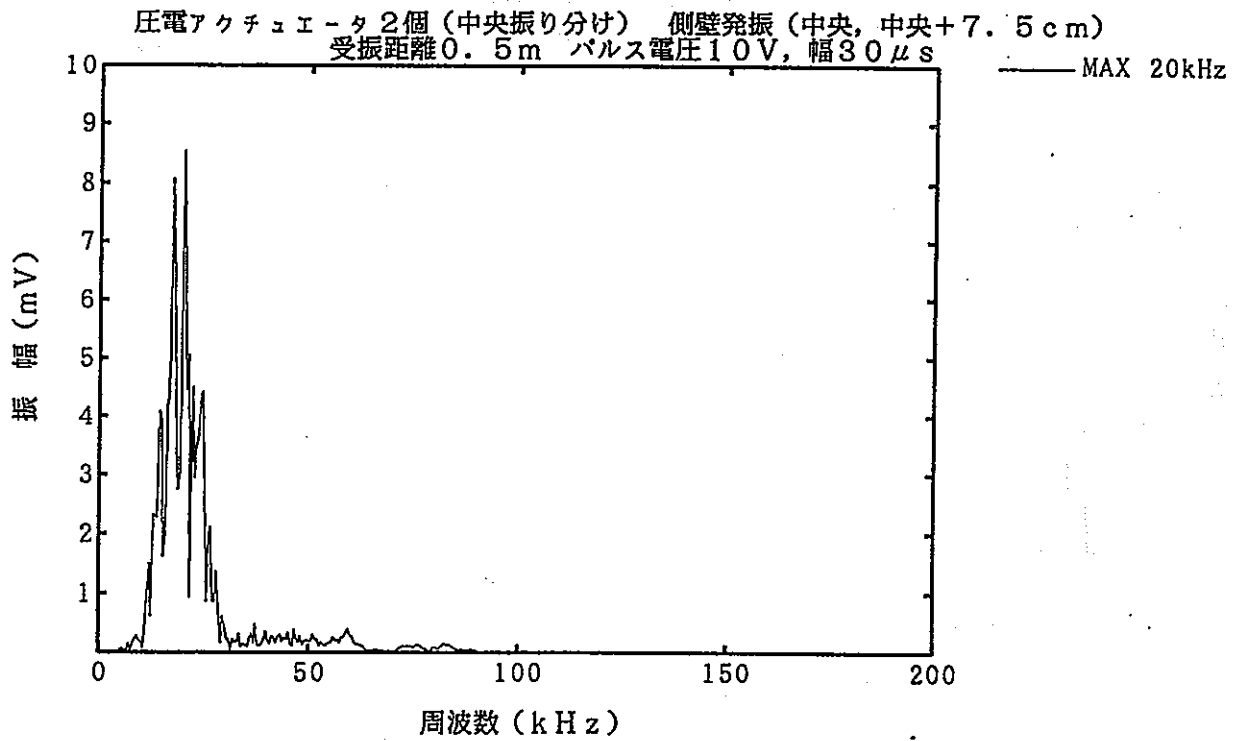
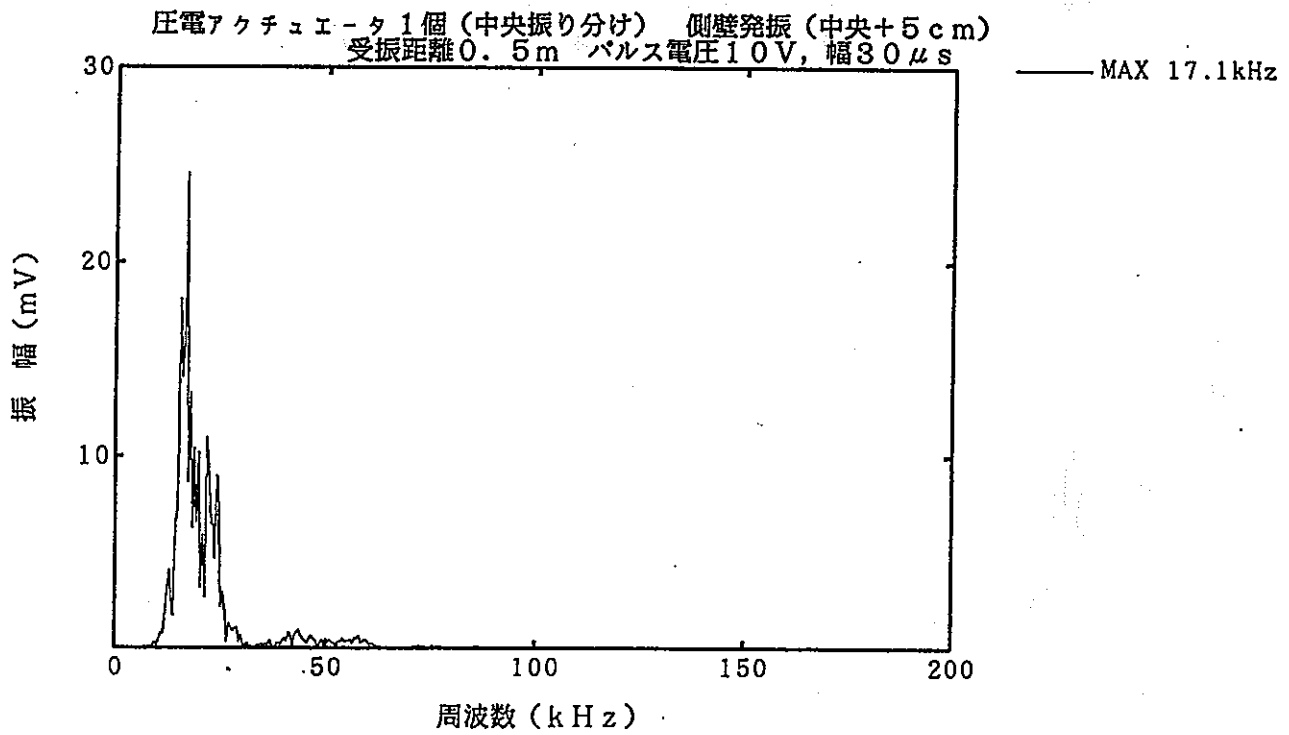
受振距離 1.5 m

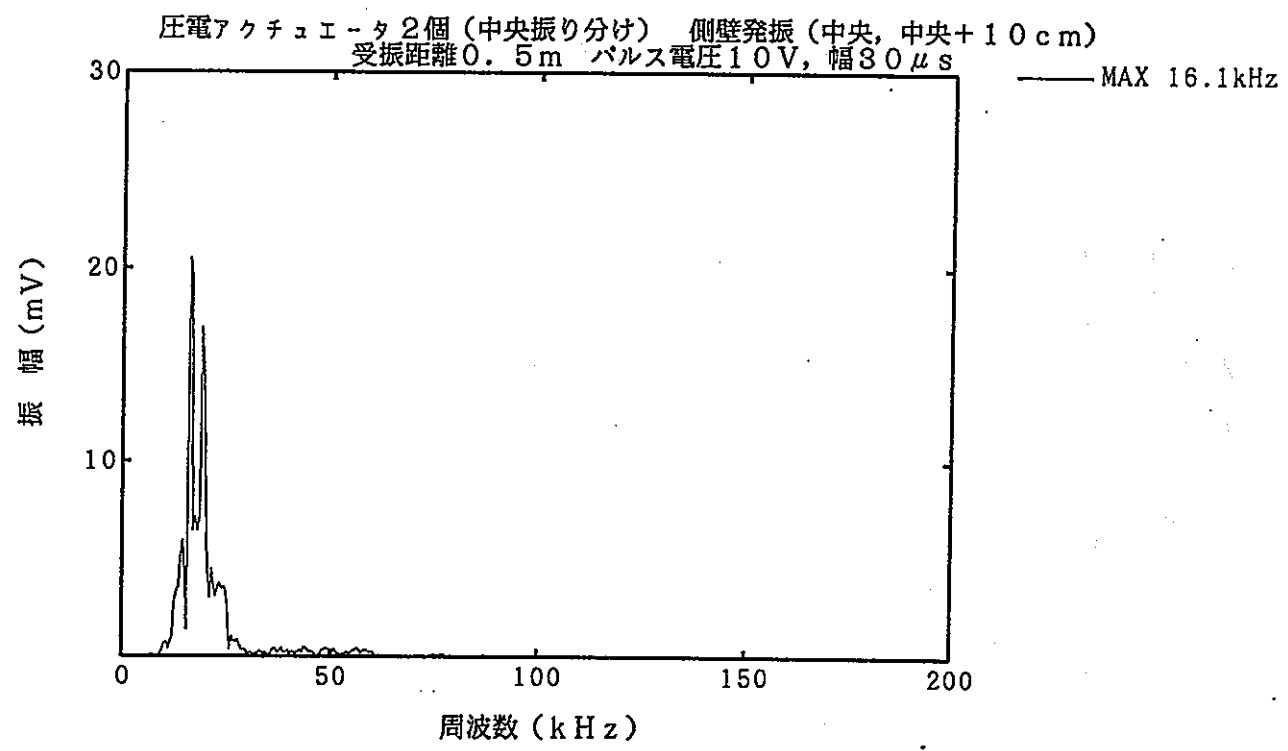
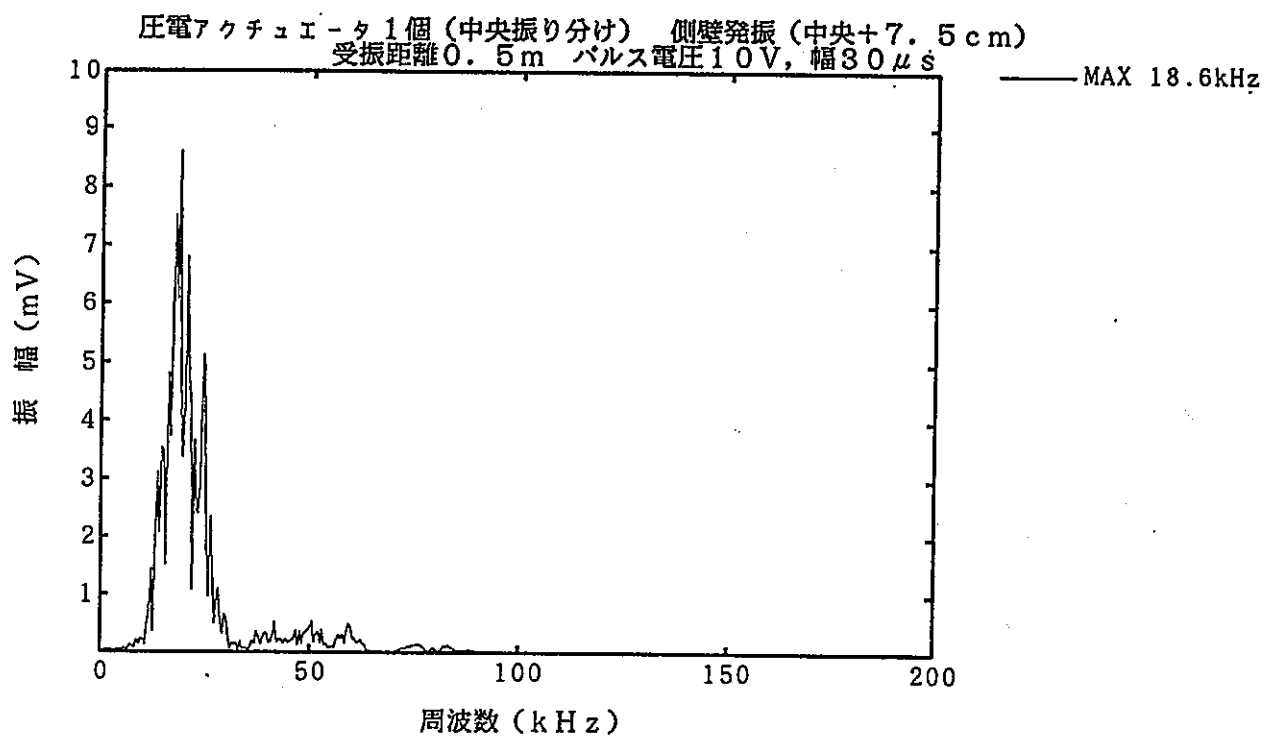
MAX 20kHz



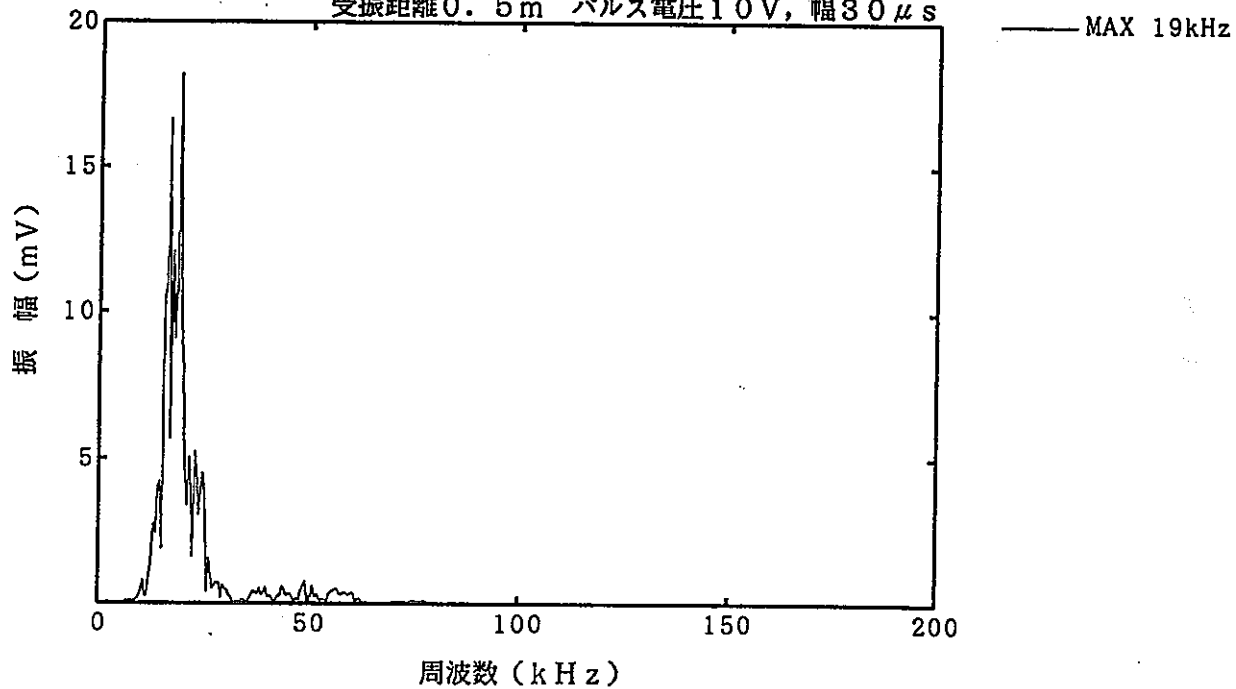




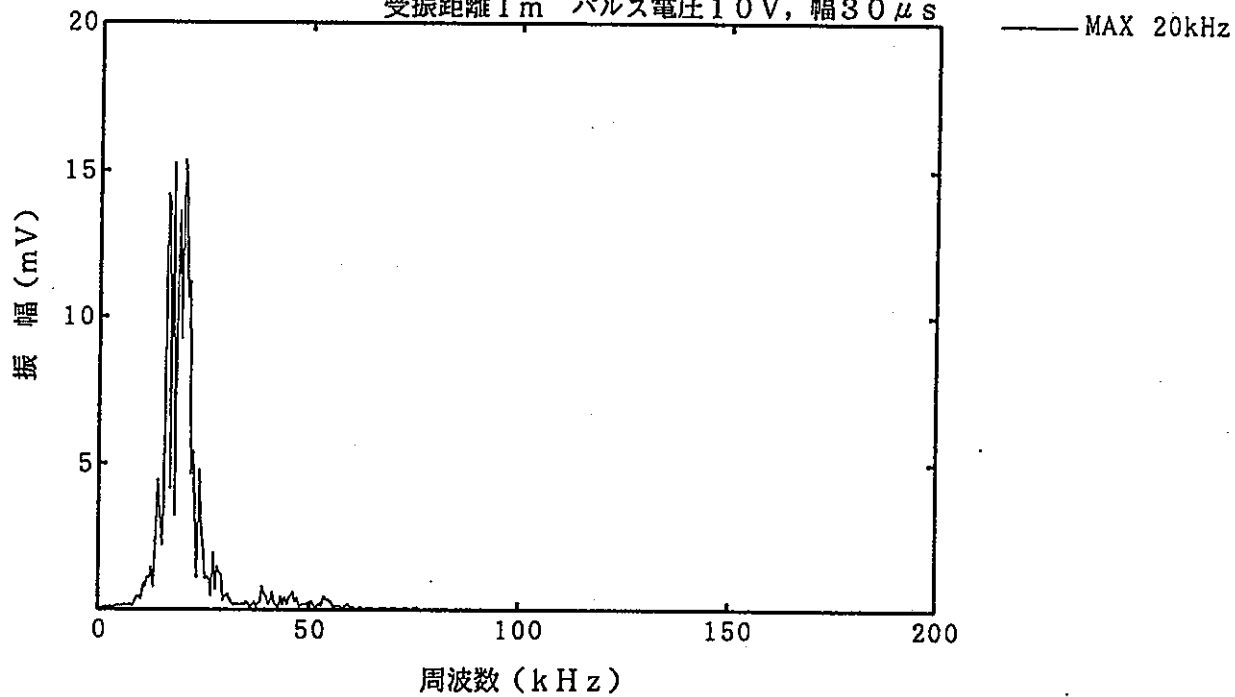


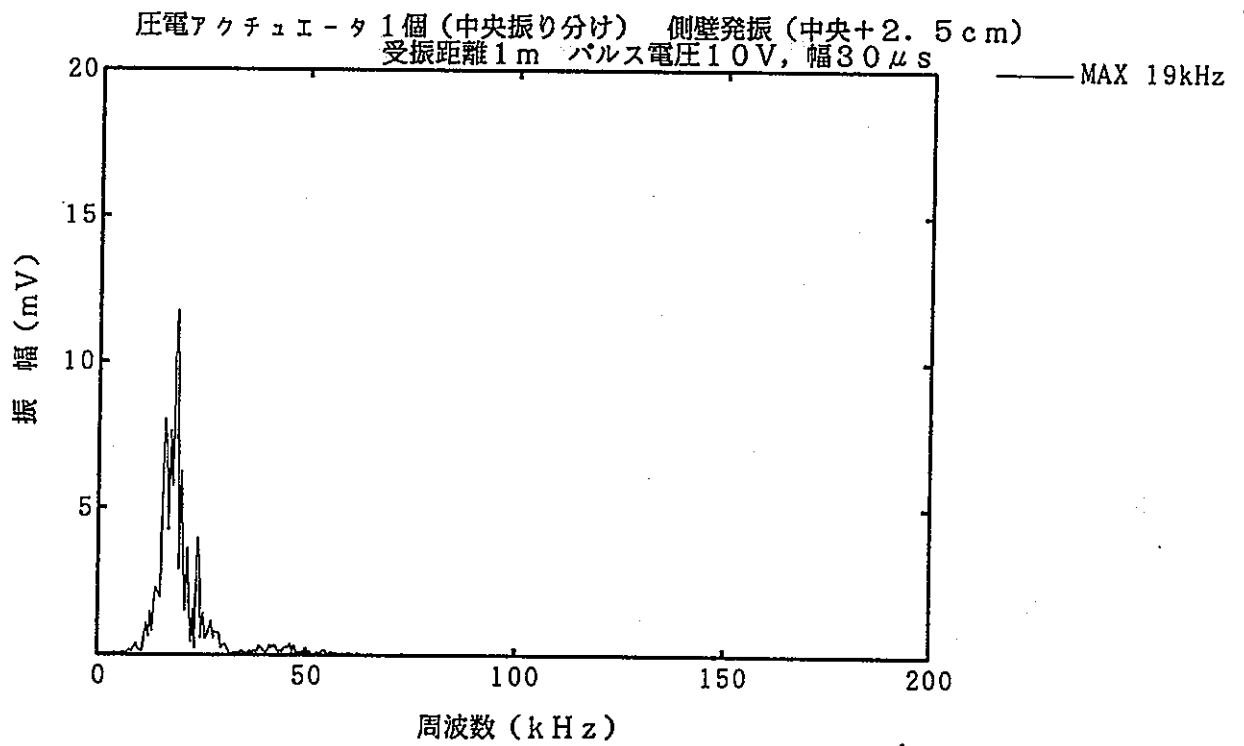
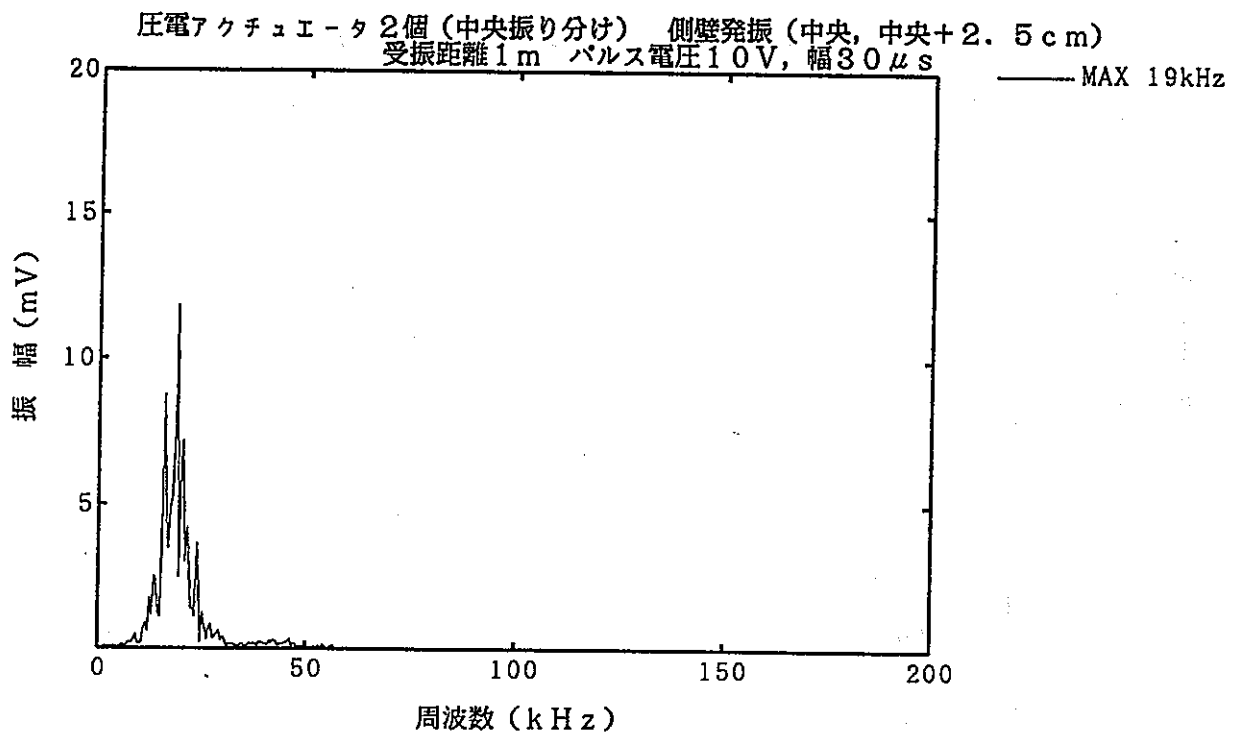


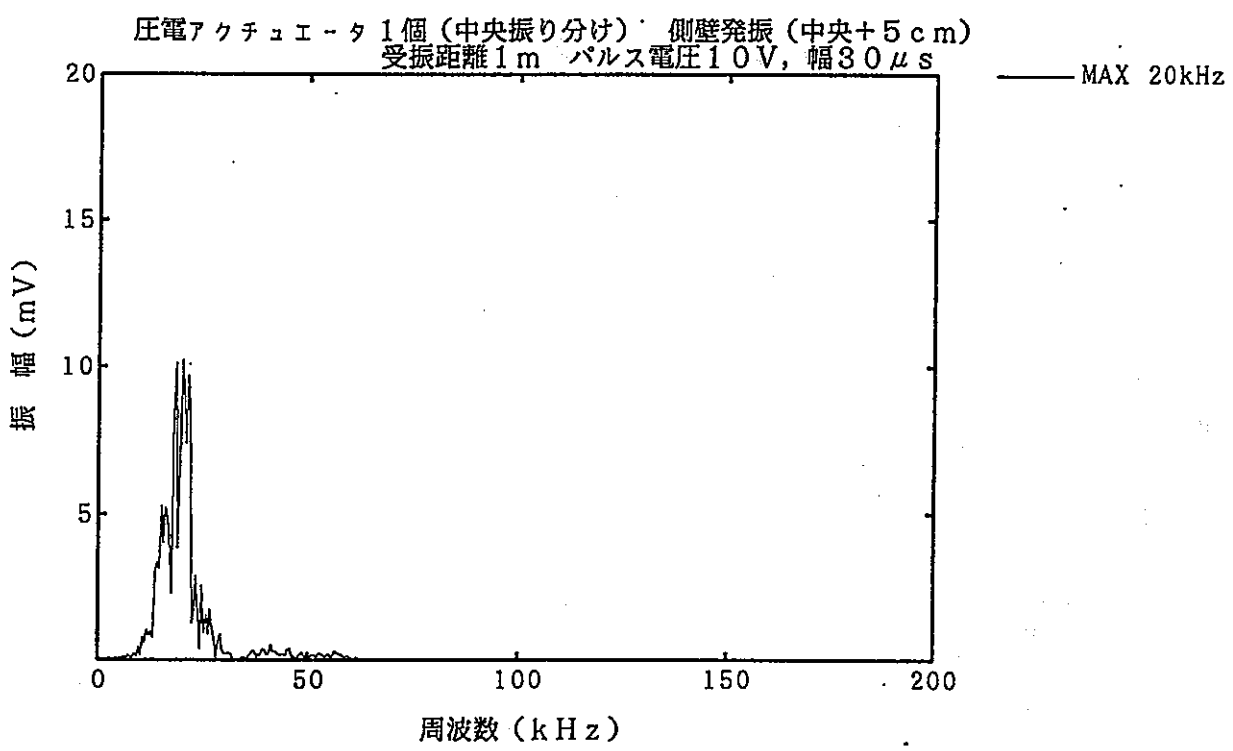
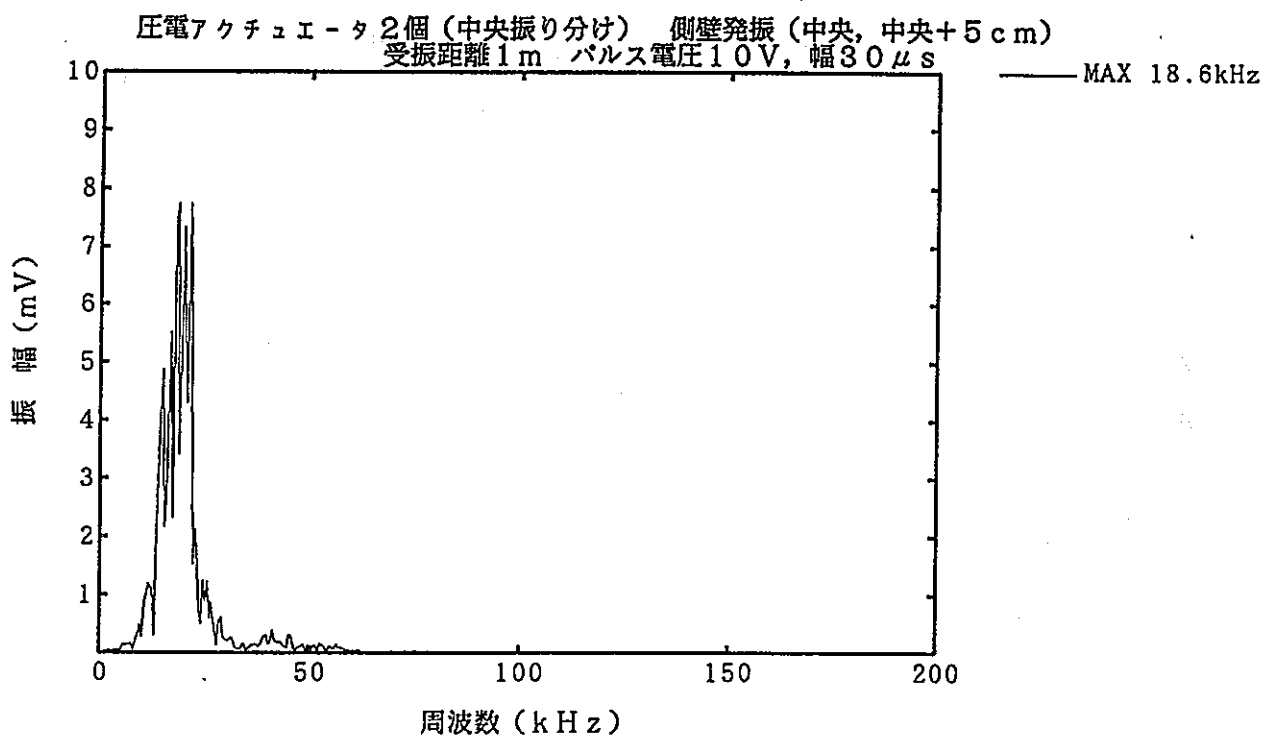
圧電アクチュエータ1個(中央振り分け) 側壁発振(中央+10cm)
受振距離0.5m パルス電圧10V, 幅30 μ s

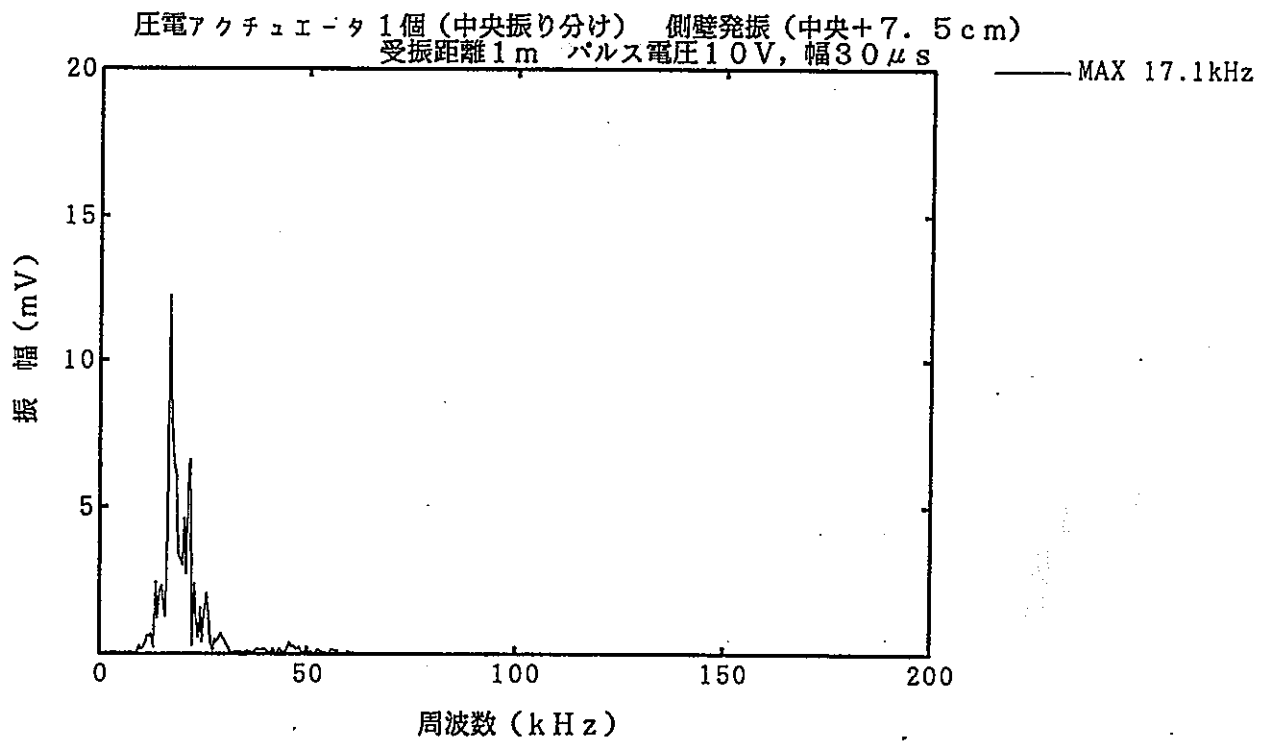
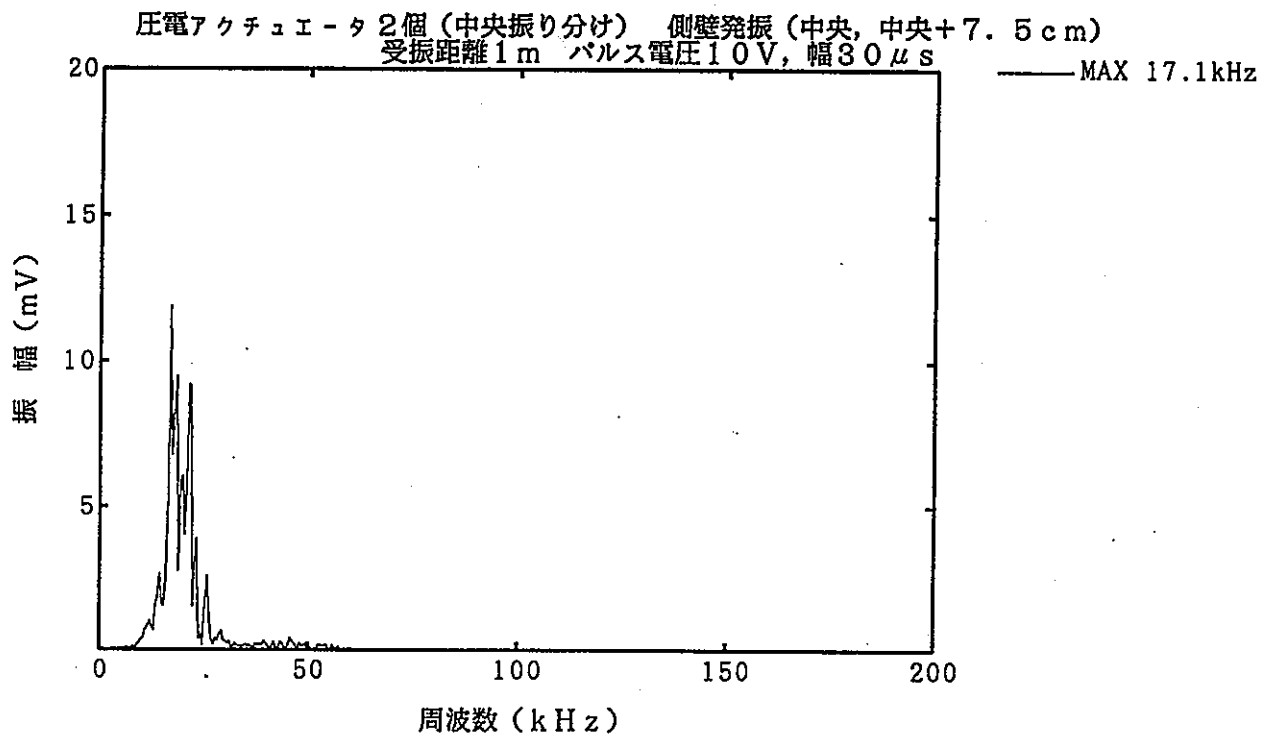


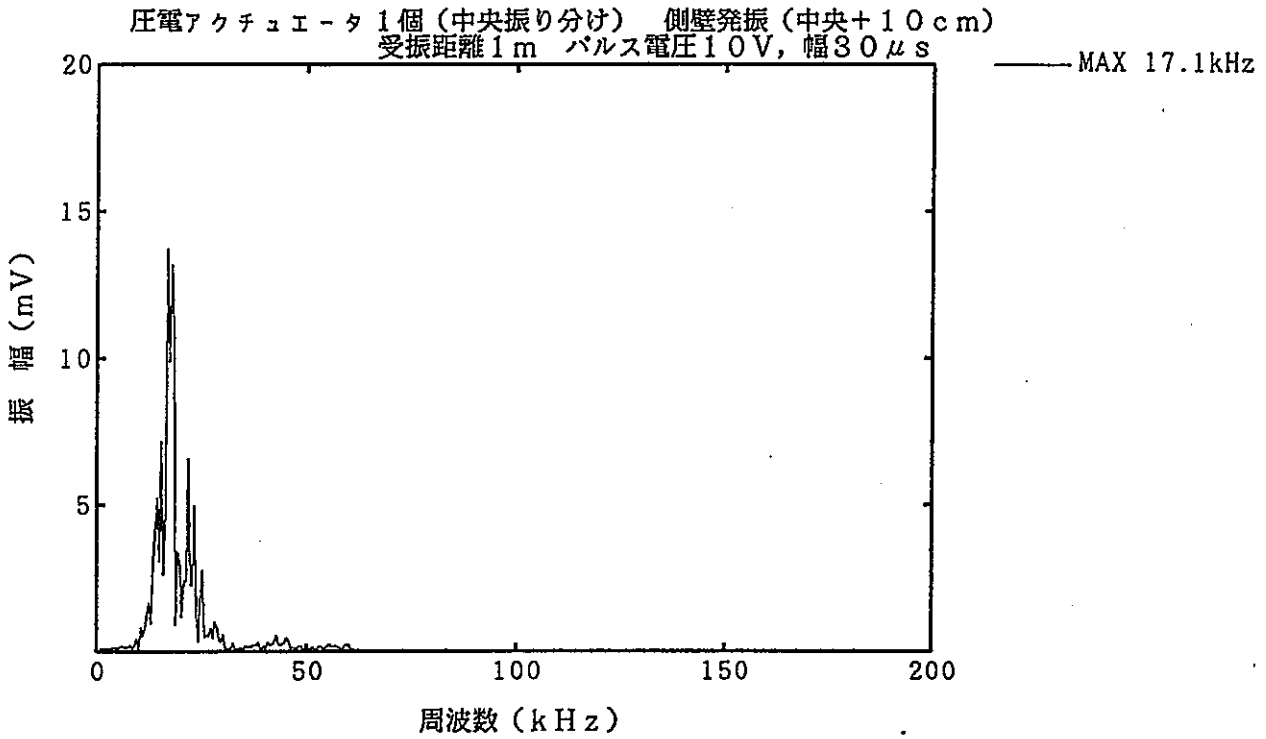
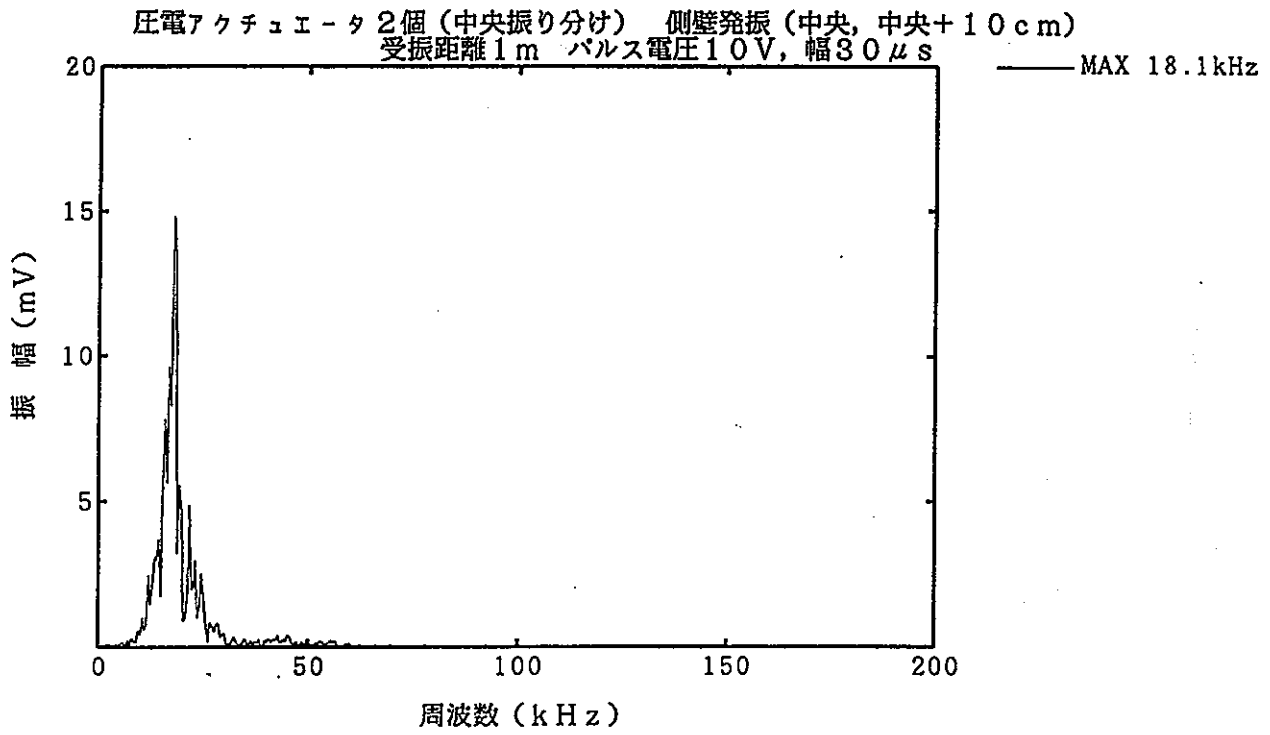
圧電アクチュエータ1個(中央振り分け) 側壁発振(中央+0cm)
受振距離1m パルス電圧10V, 幅30 μ s



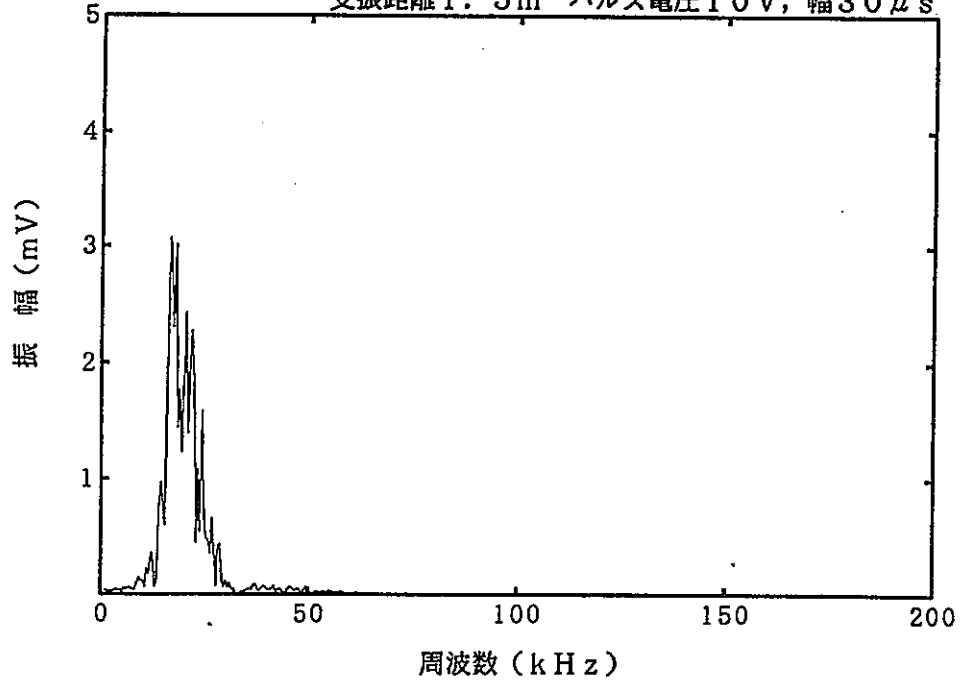




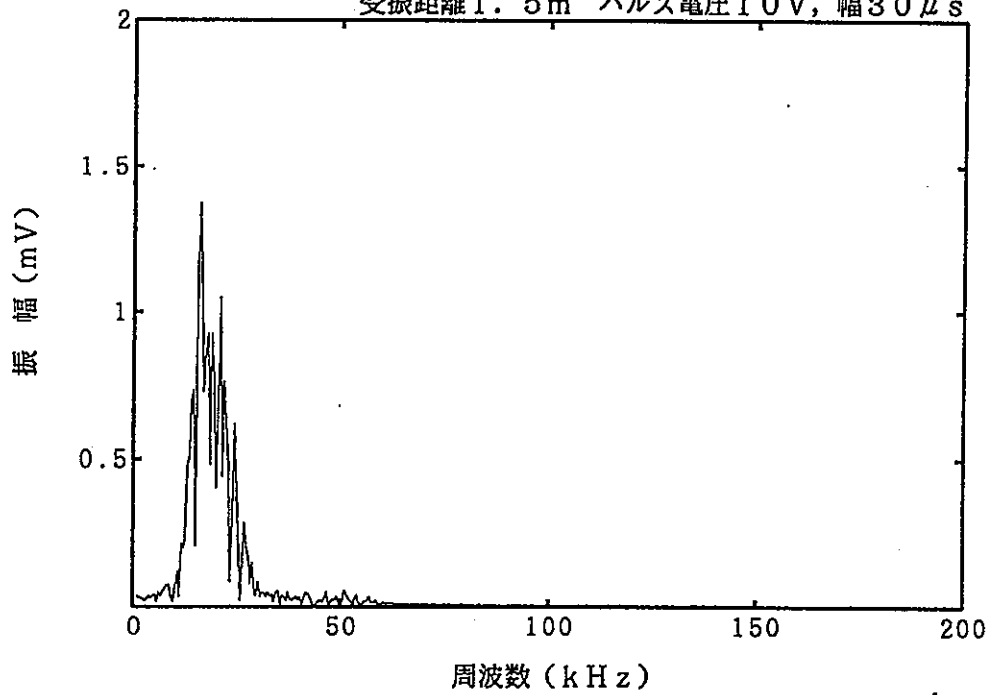


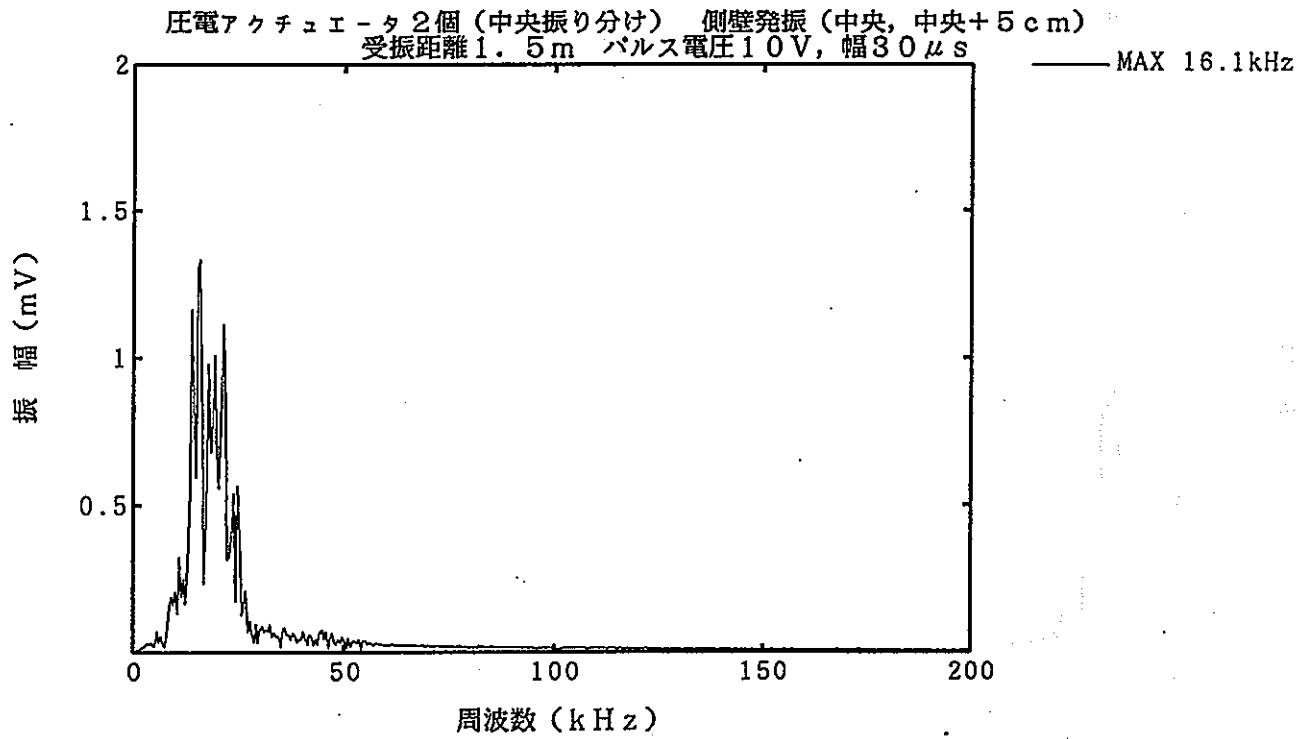
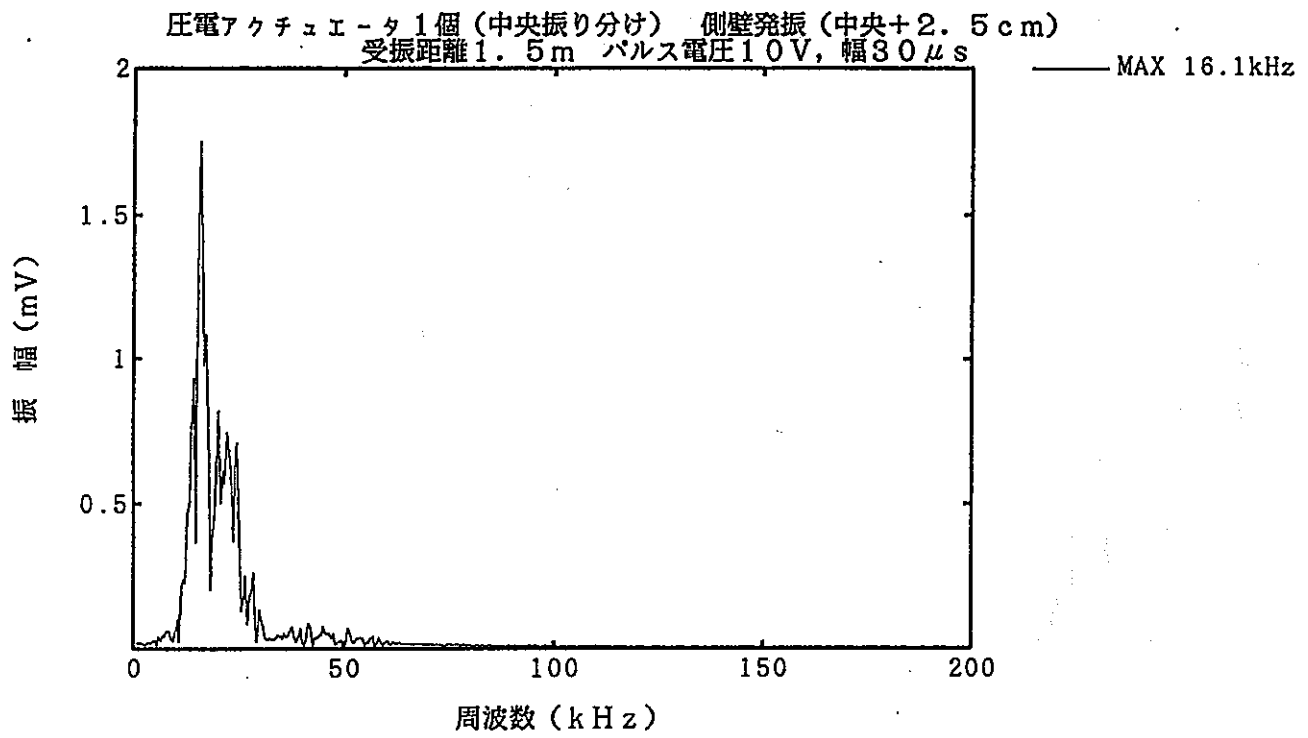


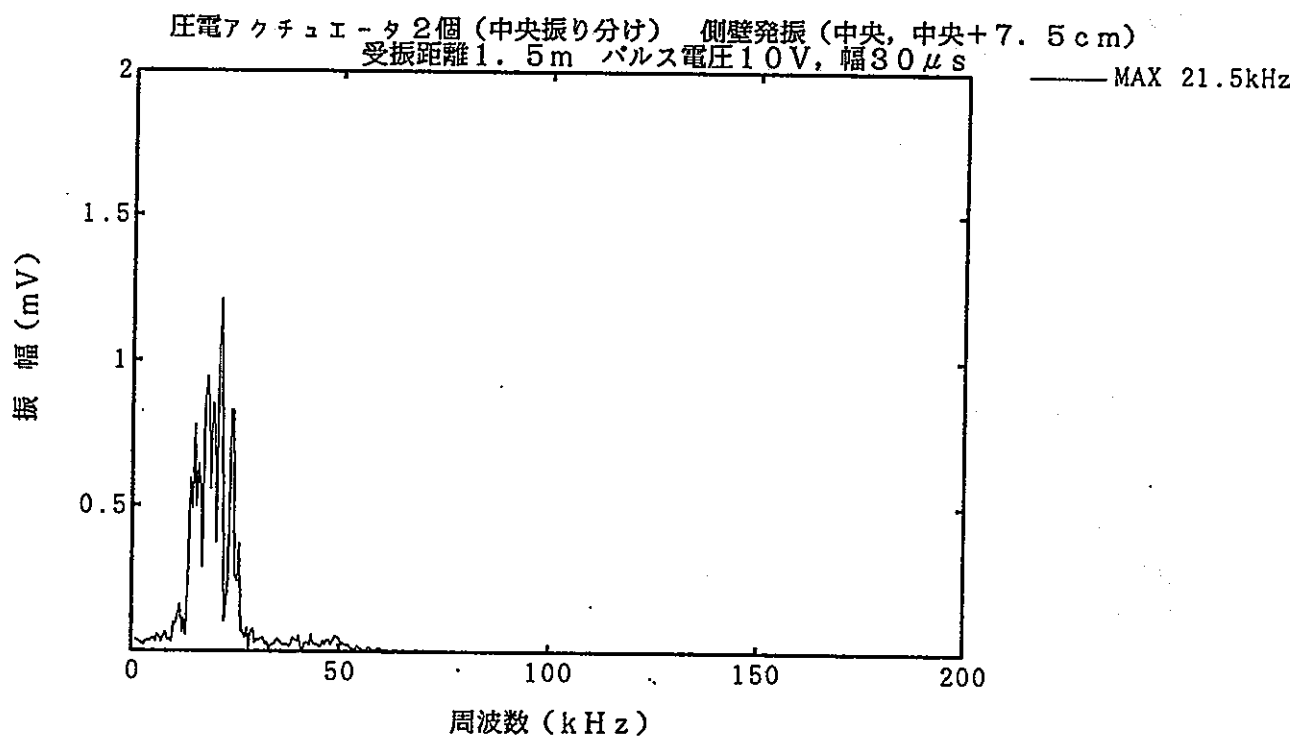
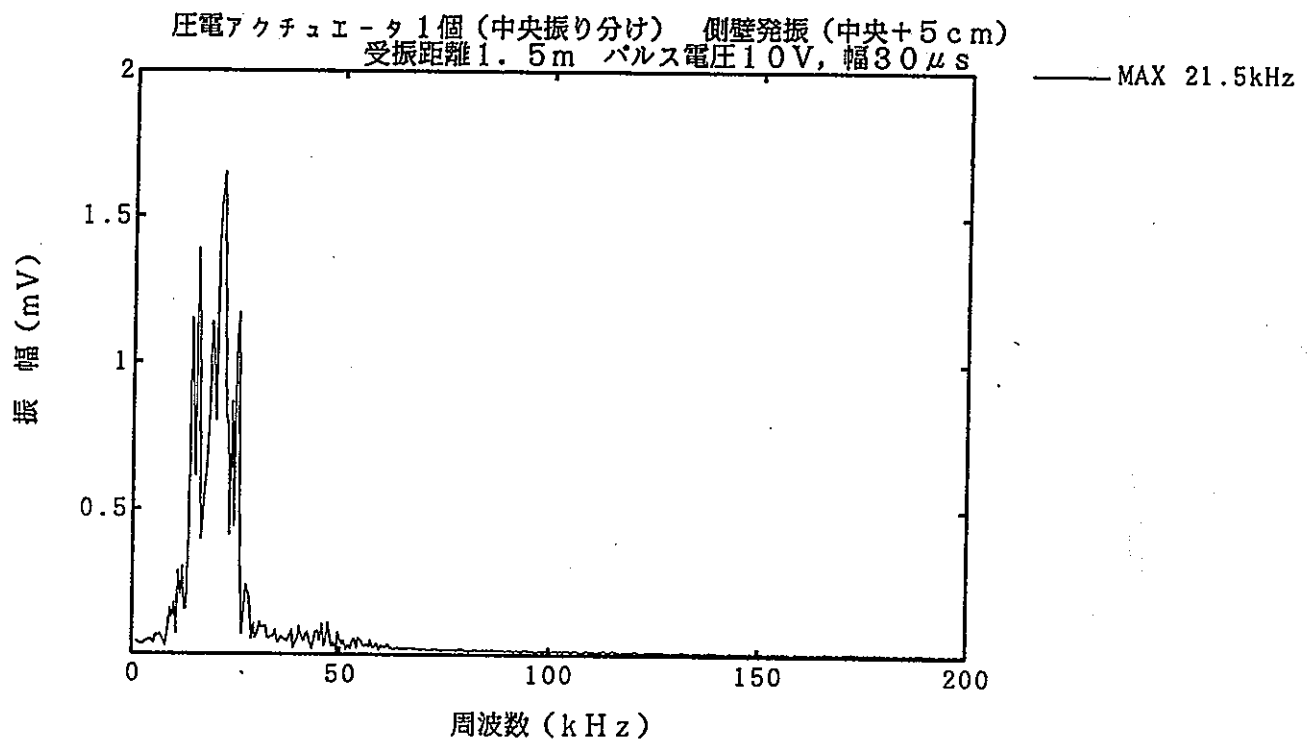
圧電アクチュエータ1個(中央振り分け) 側壁発振(中央+0cm)
受振距離1.5m パルス電圧10V, 幅30 μ s

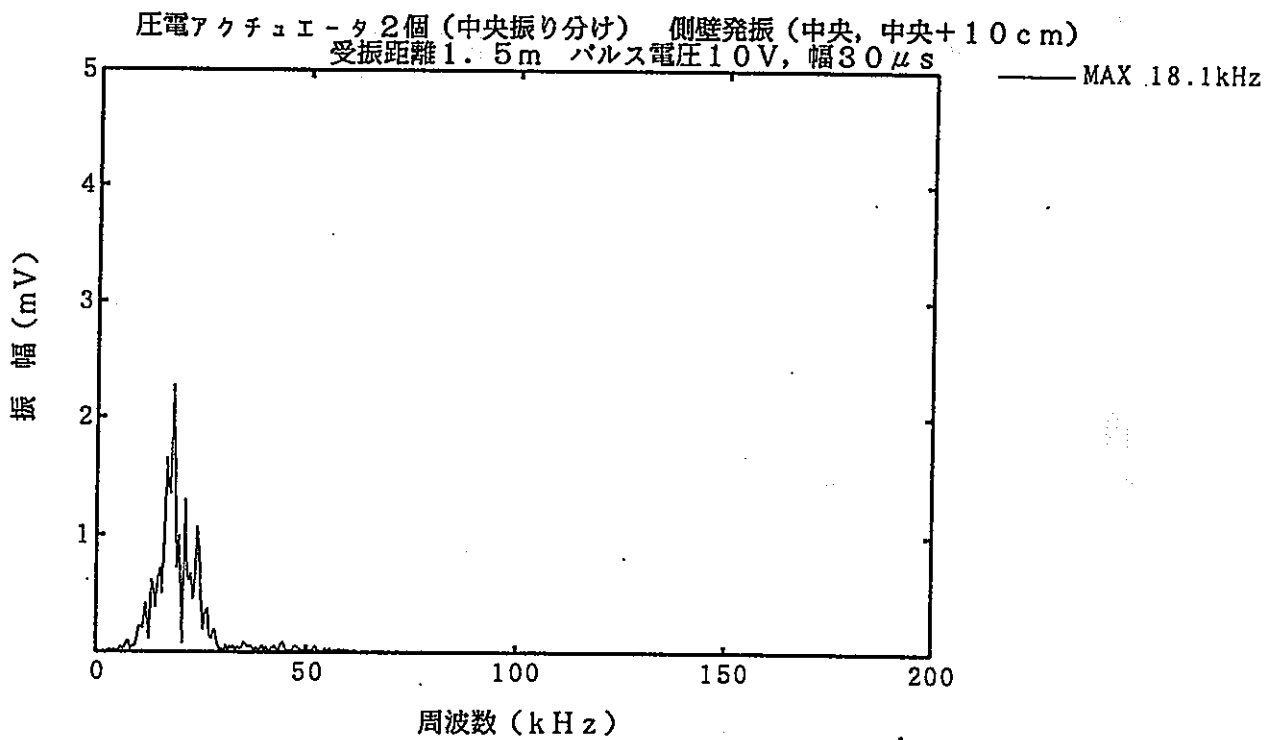
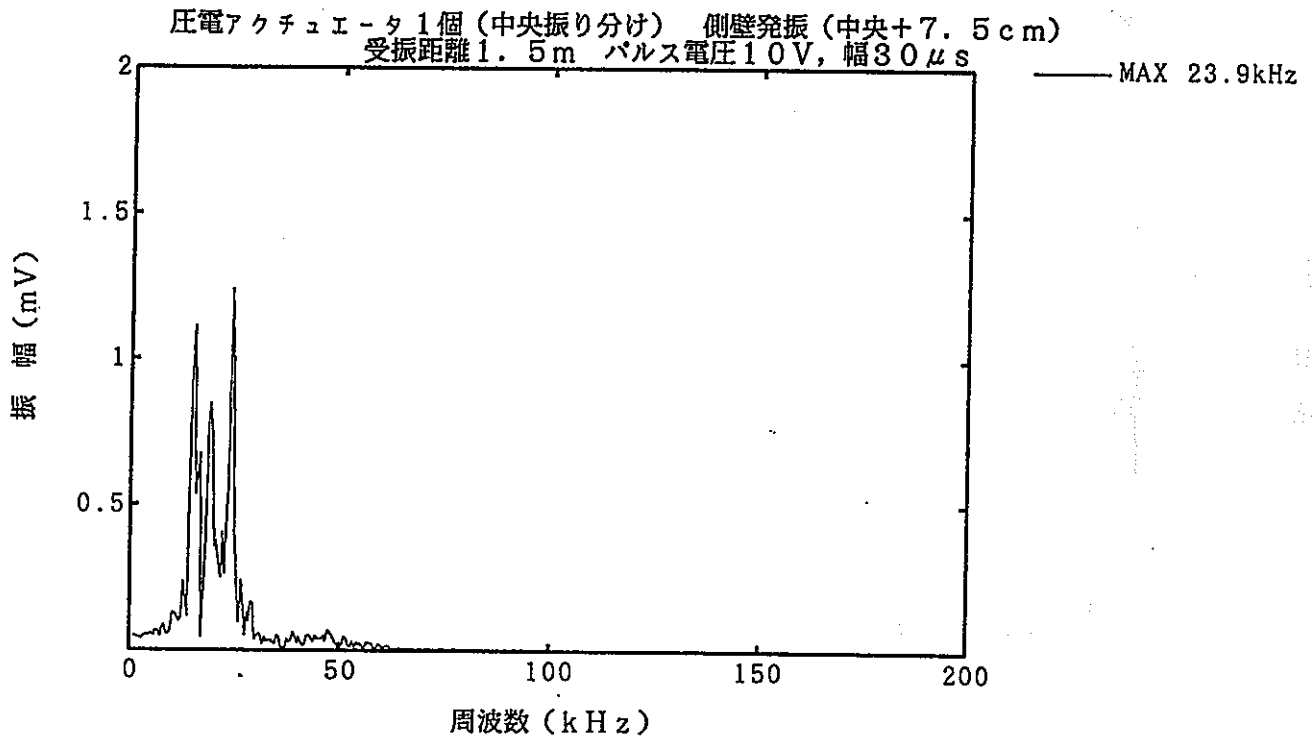


圧電アクチュエータ2個(中央振り分け) 側壁発振(中央, 中央+2.5cm)
受振距離1.5m パルス電圧10V, 幅30 μ s

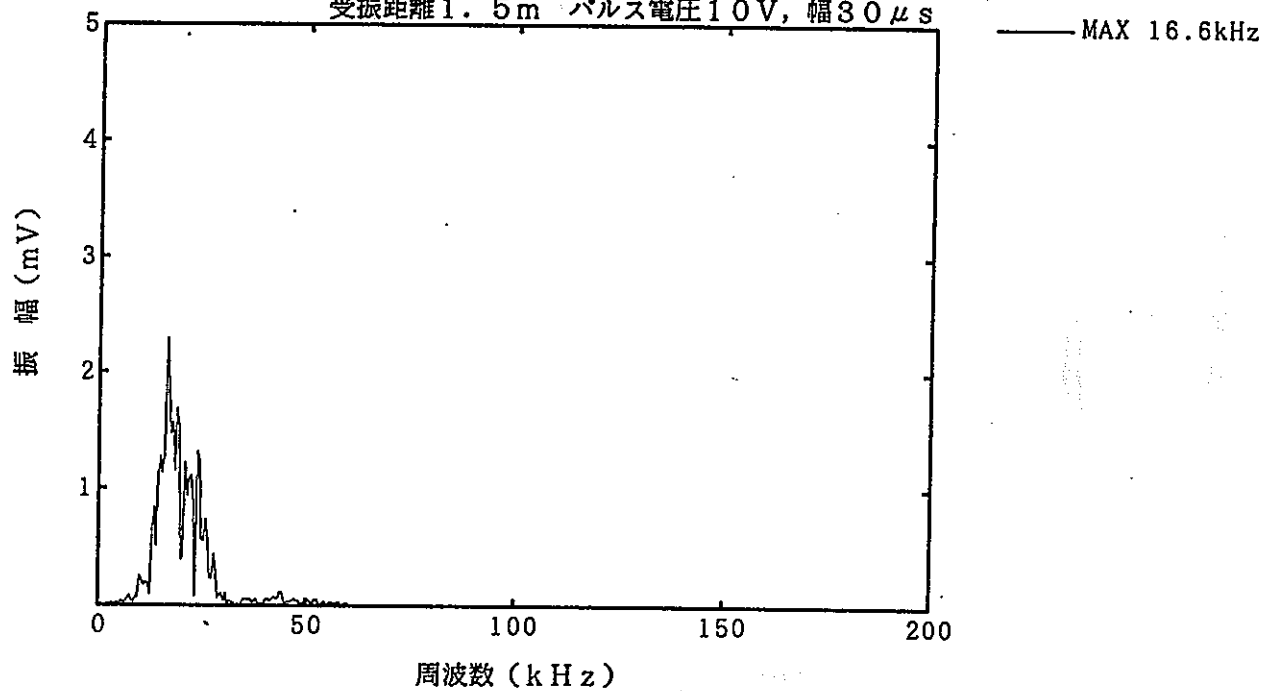




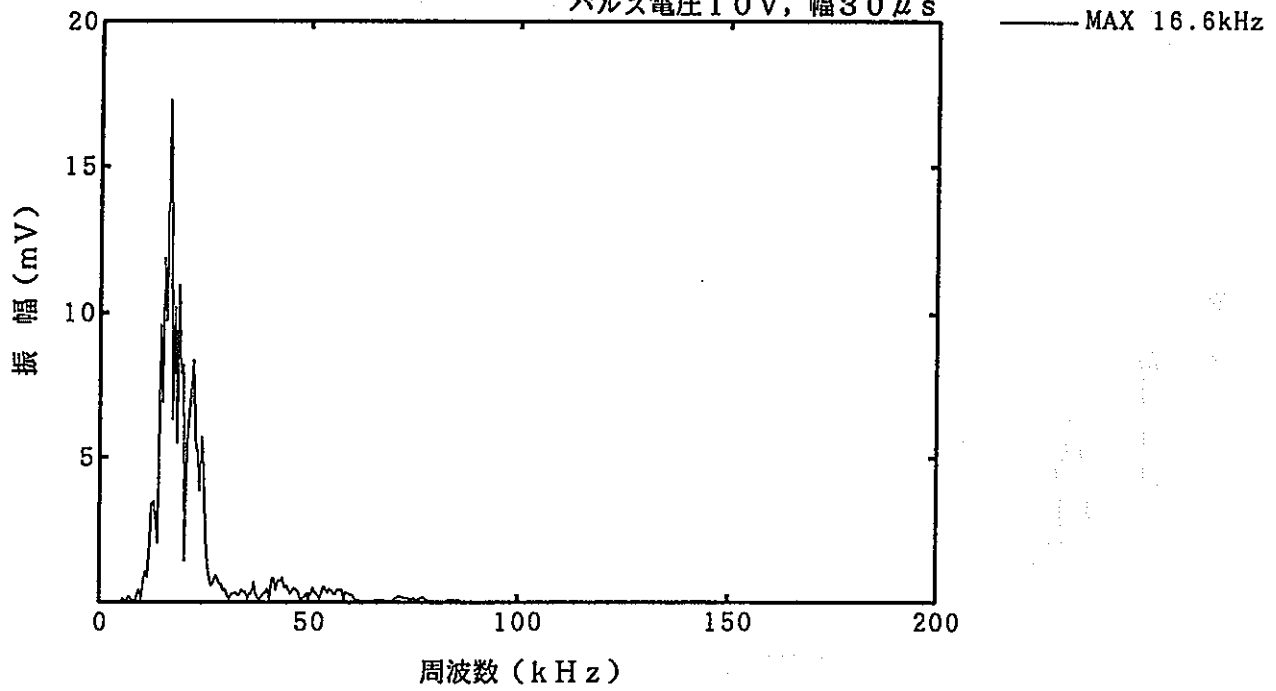




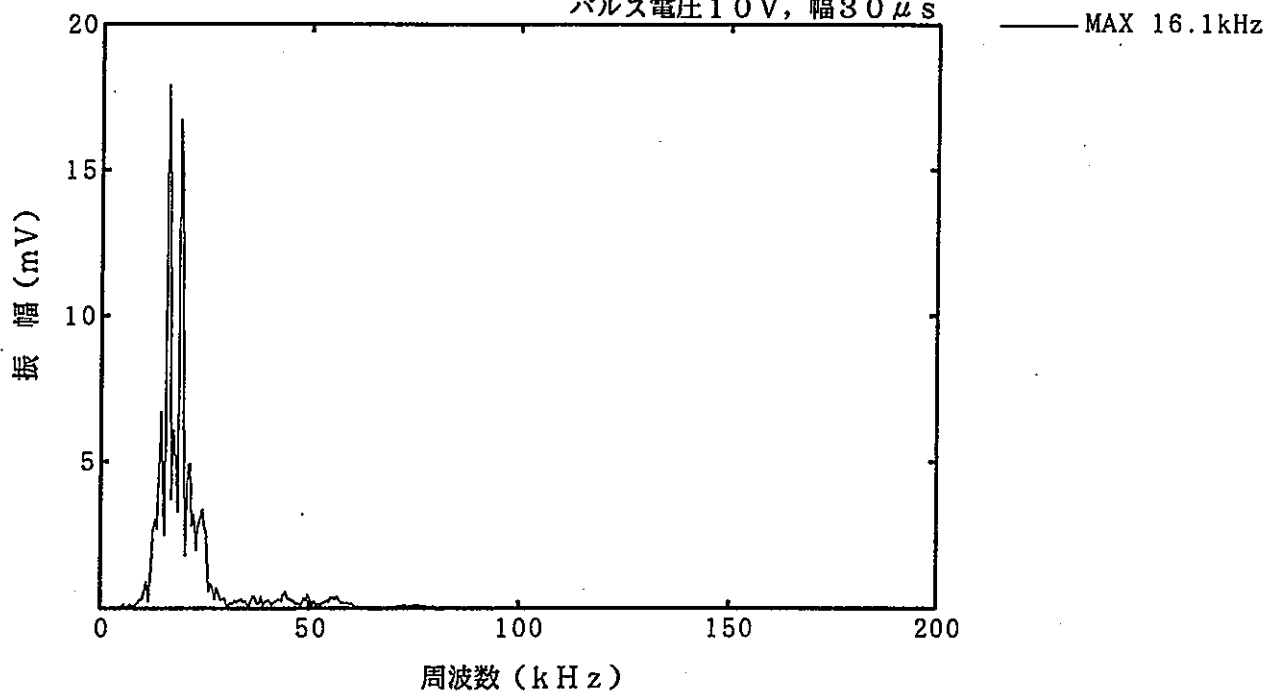
圧電アクチュエータ1個(中央振り分け) 側壁発振(中央+10cm)
受振距離1.5m パルス電圧10V, 幅30 μ s



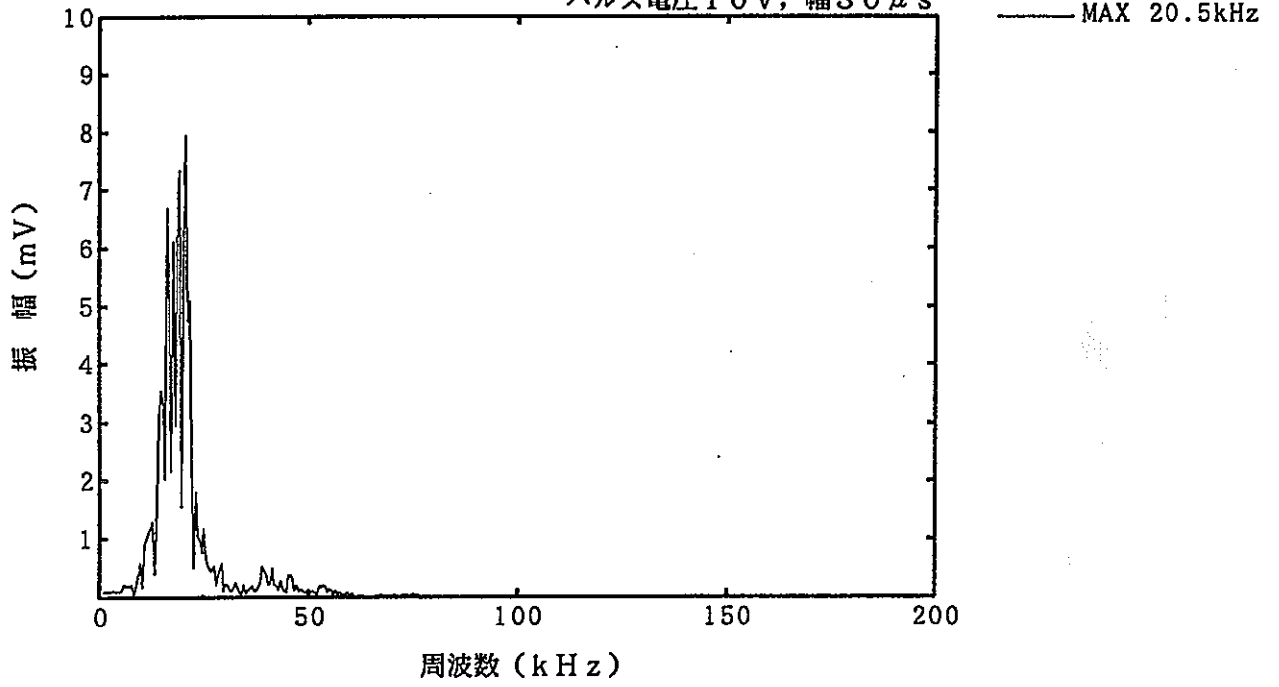
圧電アクチュエータ3個 側壁発振 (中央, 中央±5cm) 受振距離0.5m
パルス電圧10V, 幅30 μ s



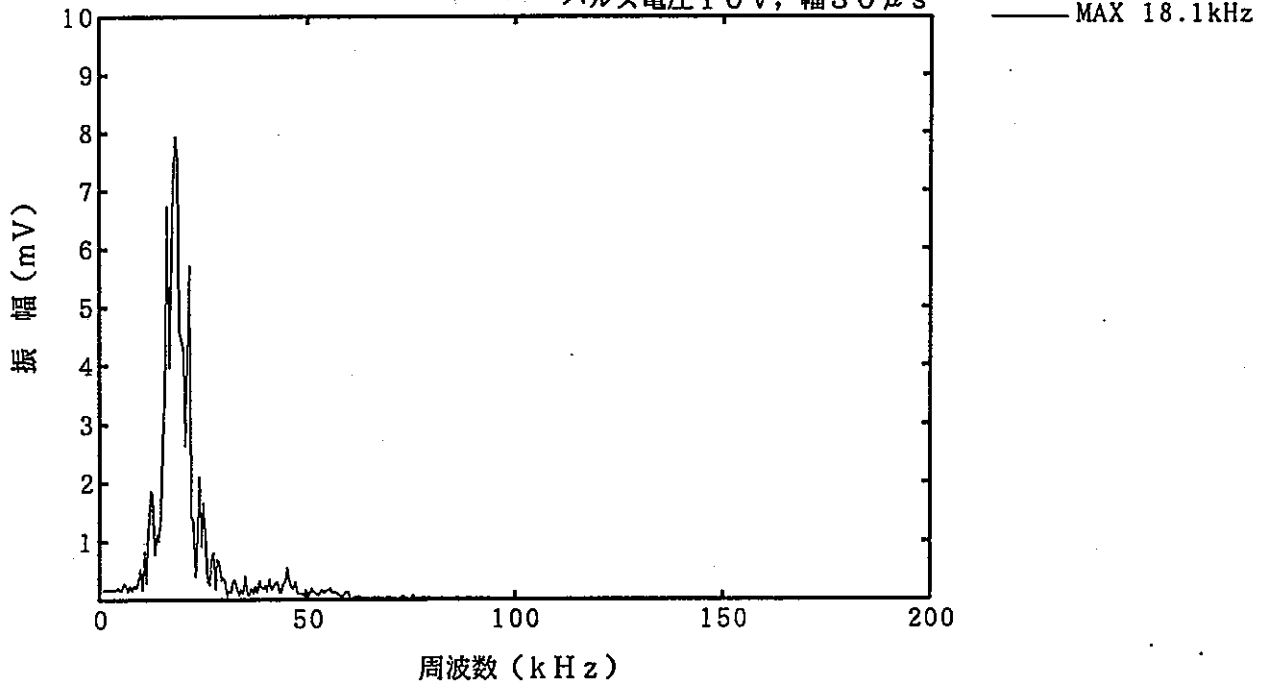
圧電アクチュエータ3個 側壁発振 (中央, 中央±10cm) 受振距離0.5m
パルス電圧10V, 幅30 μ s



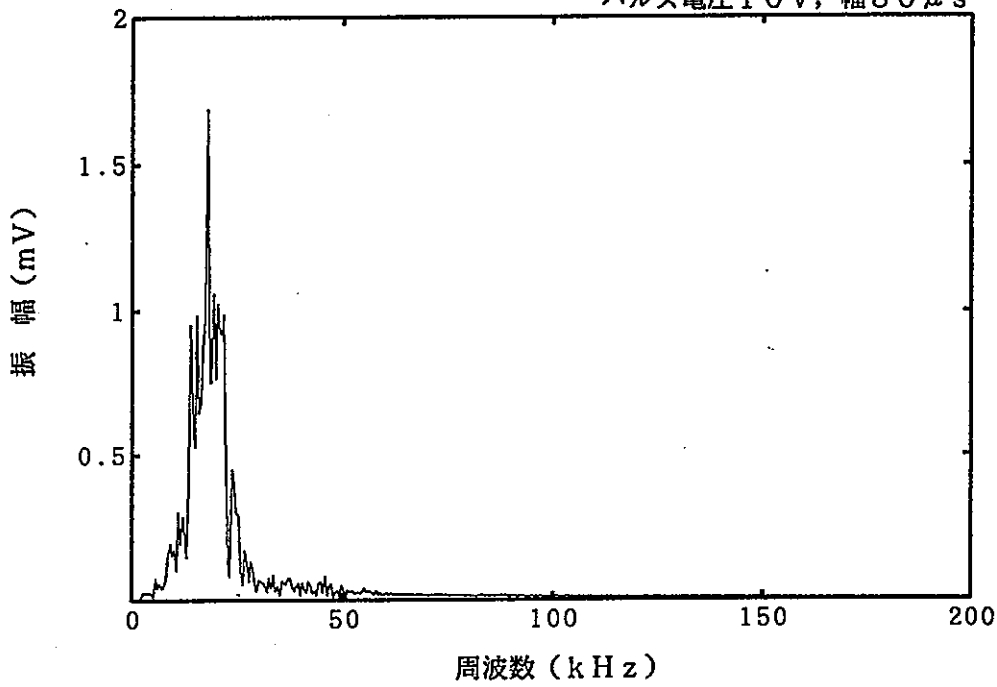
圧電アクチュエータ3個 側壁発振 (中央, 中央±5cm) 受振距離1m
パルス電圧10V, 幅30 μ s



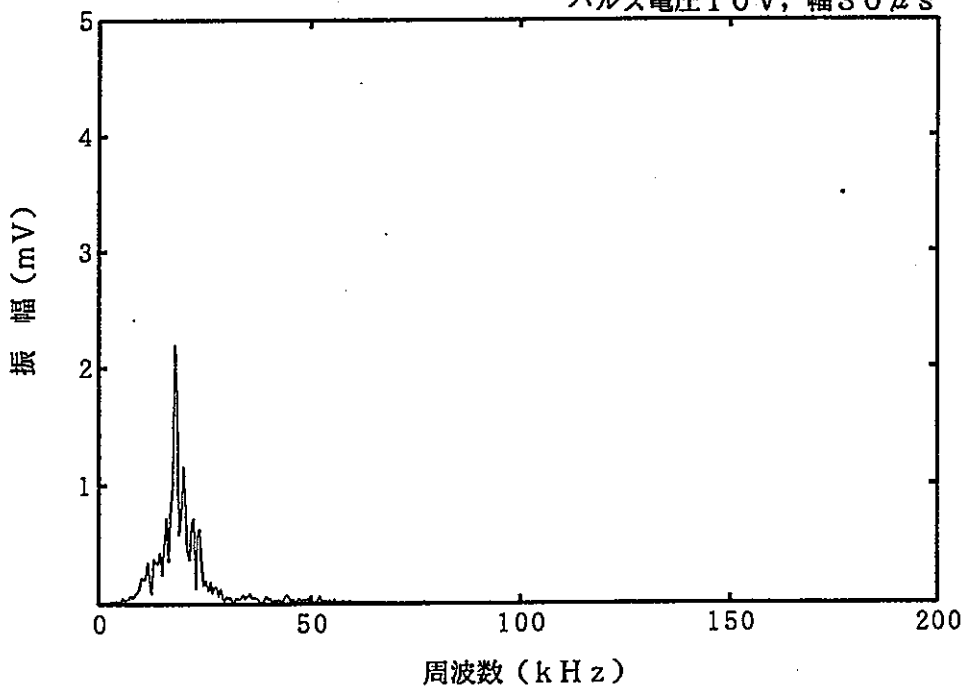
圧電アクチュエータ3個 側壁発振 (中央, 中央±10cm) 受振距離1m
パルス電圧10V, 幅30 μ s



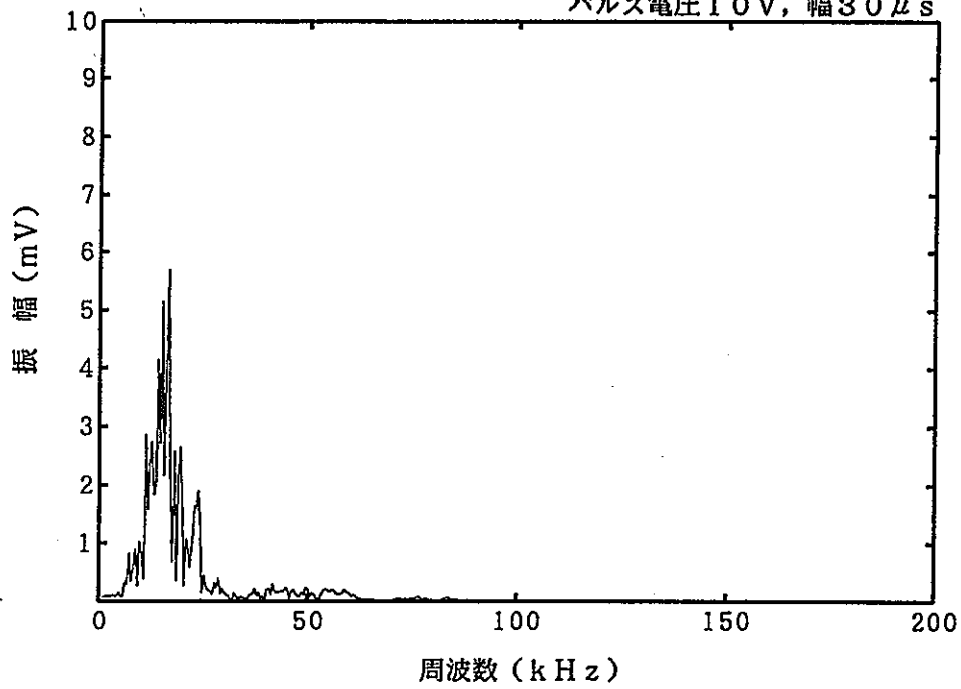
圧電アクチュエータ3個 側壁発振 (中央, 中央±5cm) 受振距離1.5m
パルス電圧10V, 幅30 μ s



圧電アクチュエータ3個 側壁発振 (中央, 中央±10cm) 受振距離1.5m
パルス電圧10V, 幅30 μ s

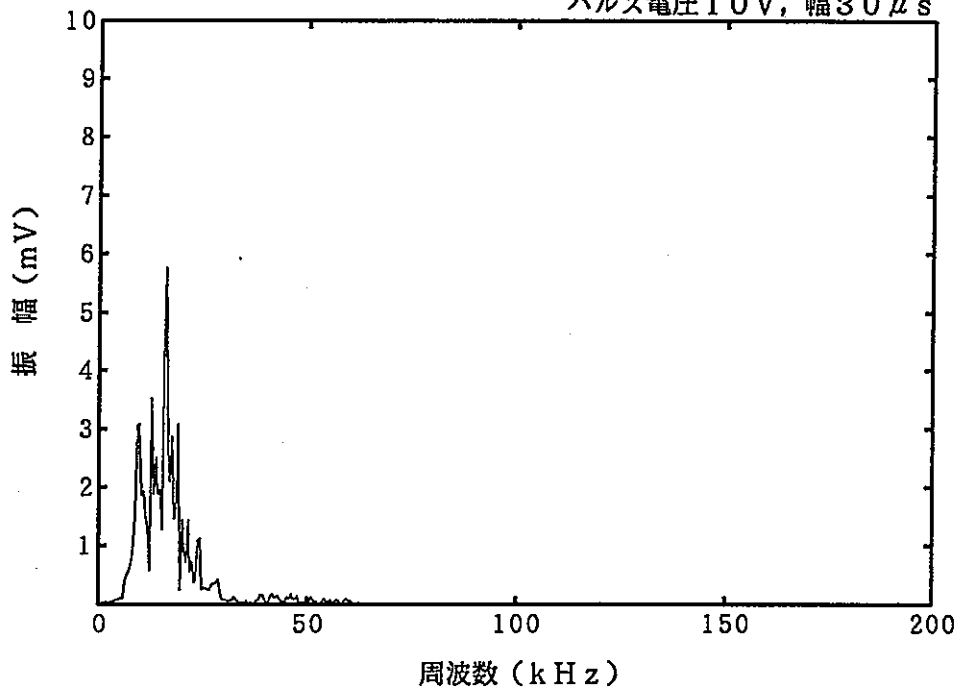


圧電アクチュエータ2個（軸方向重ね） 側壁発振 受振距離0.5m
パルス電圧10V, 幅30 μ s

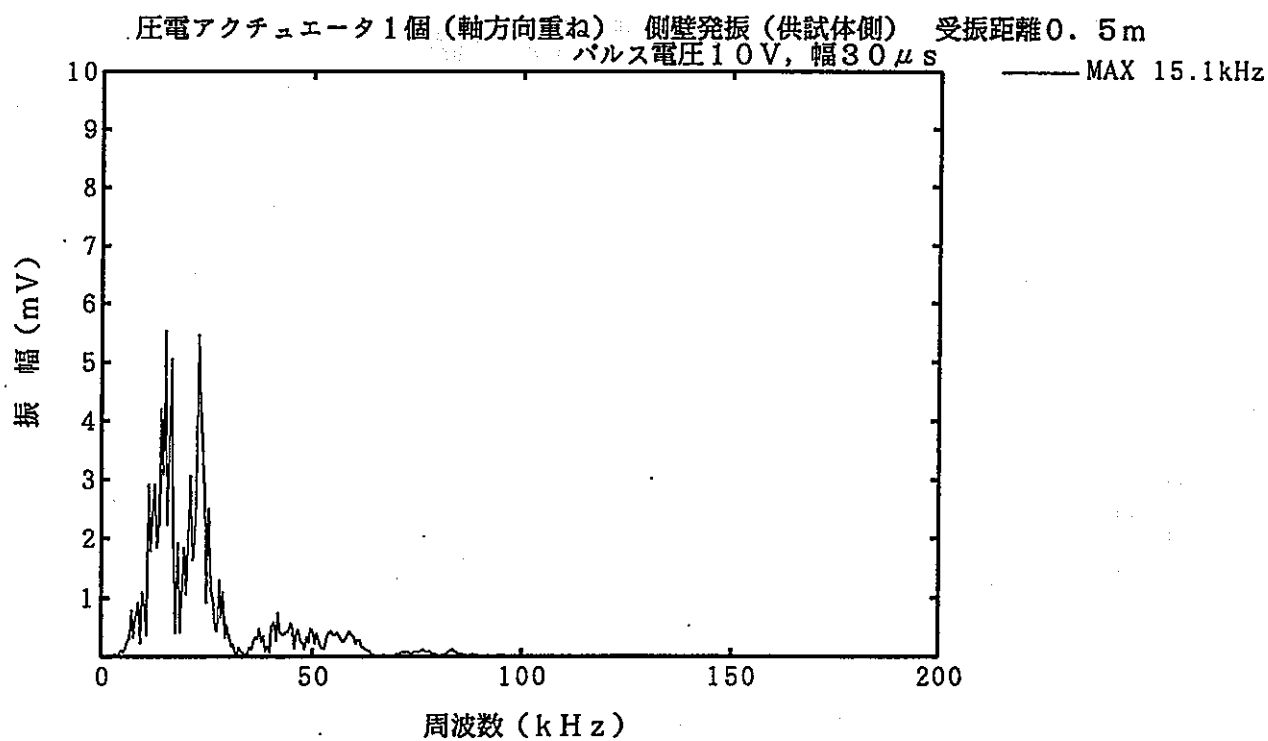
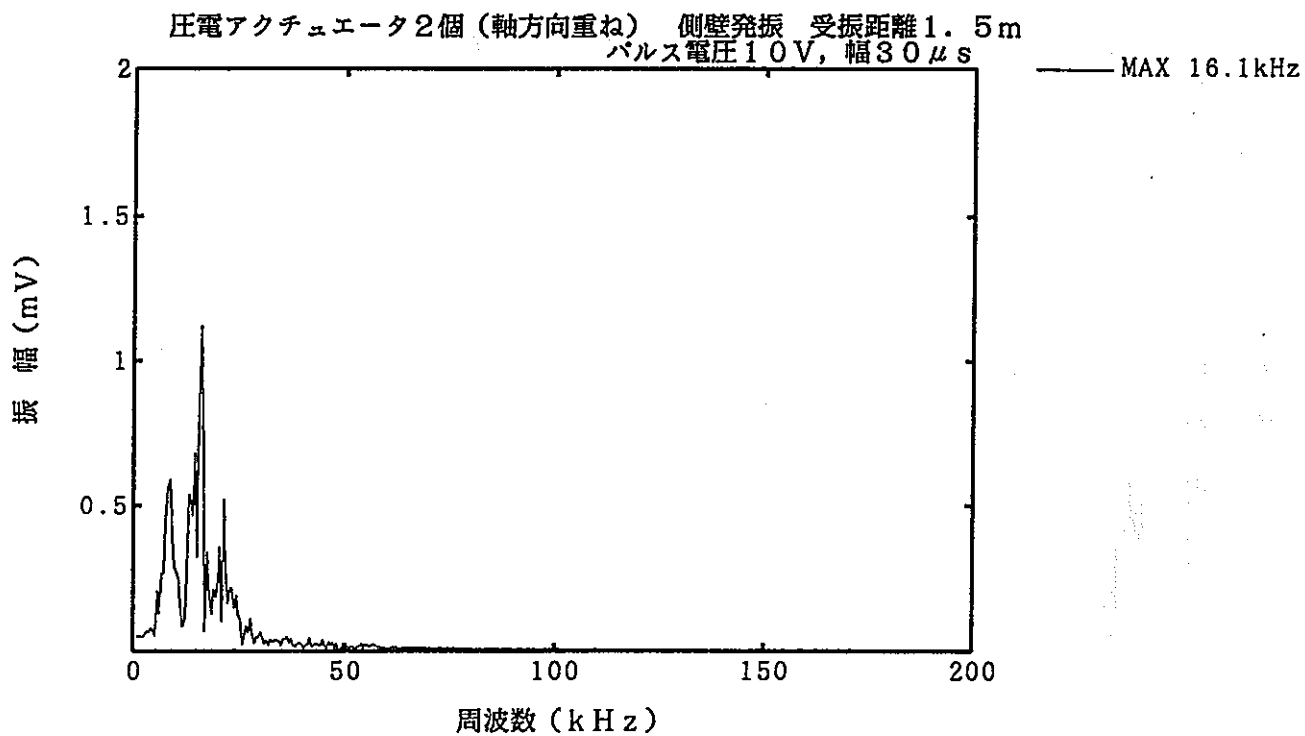


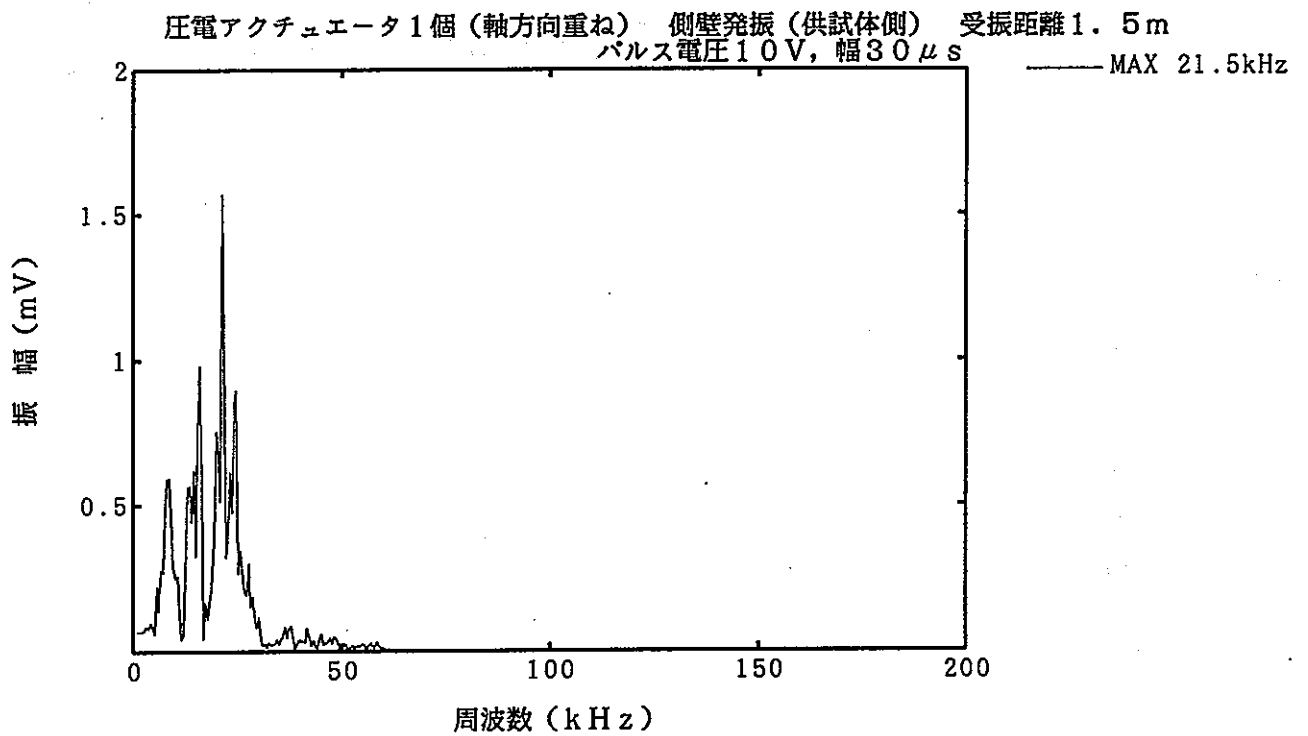
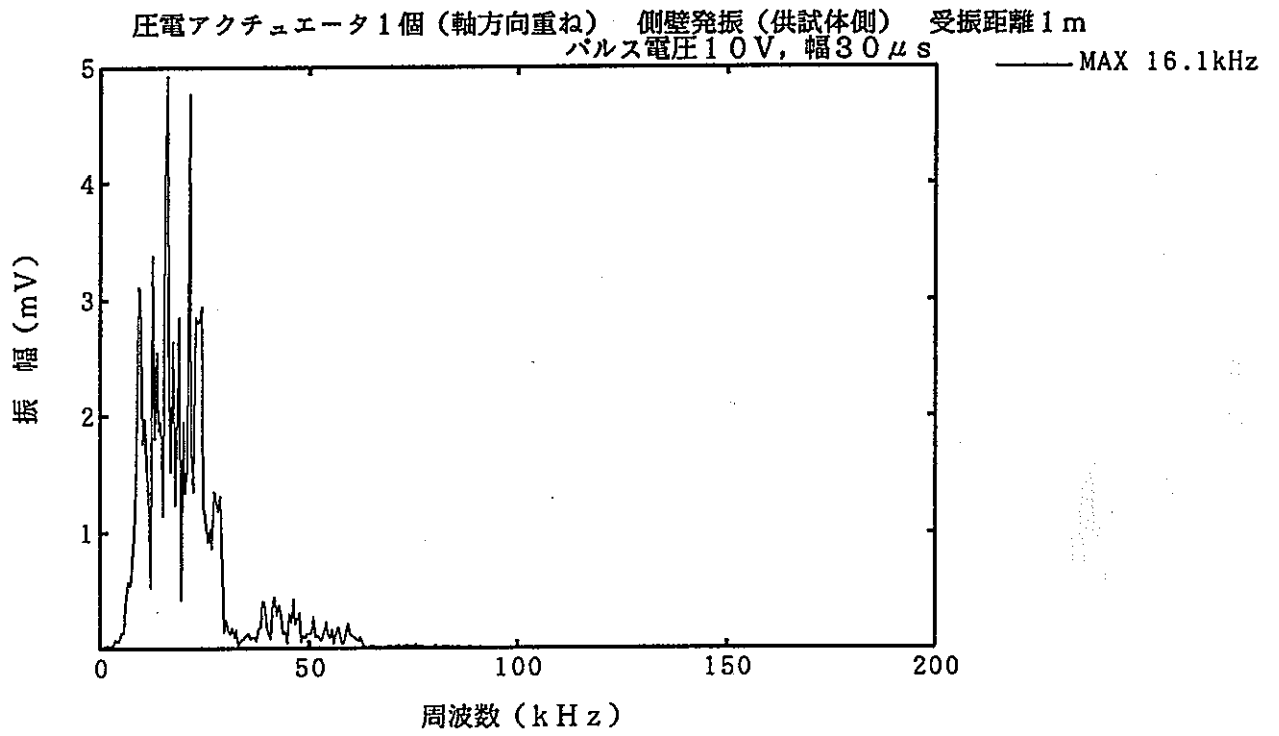
MAX 16.6kHz

圧電アクチュエータ2個（軸方向重ね） 側壁発振 受振距離1m
パルス電圧10V, 幅30 μ s

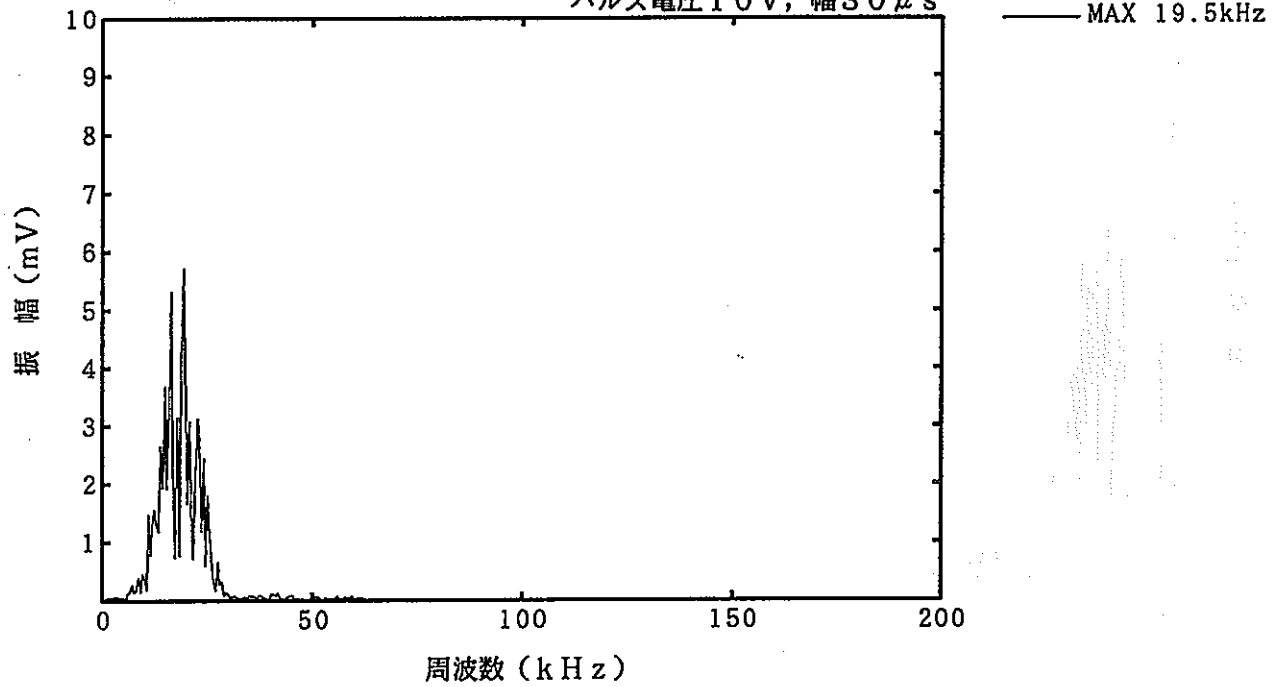


MAX 16.1kHz

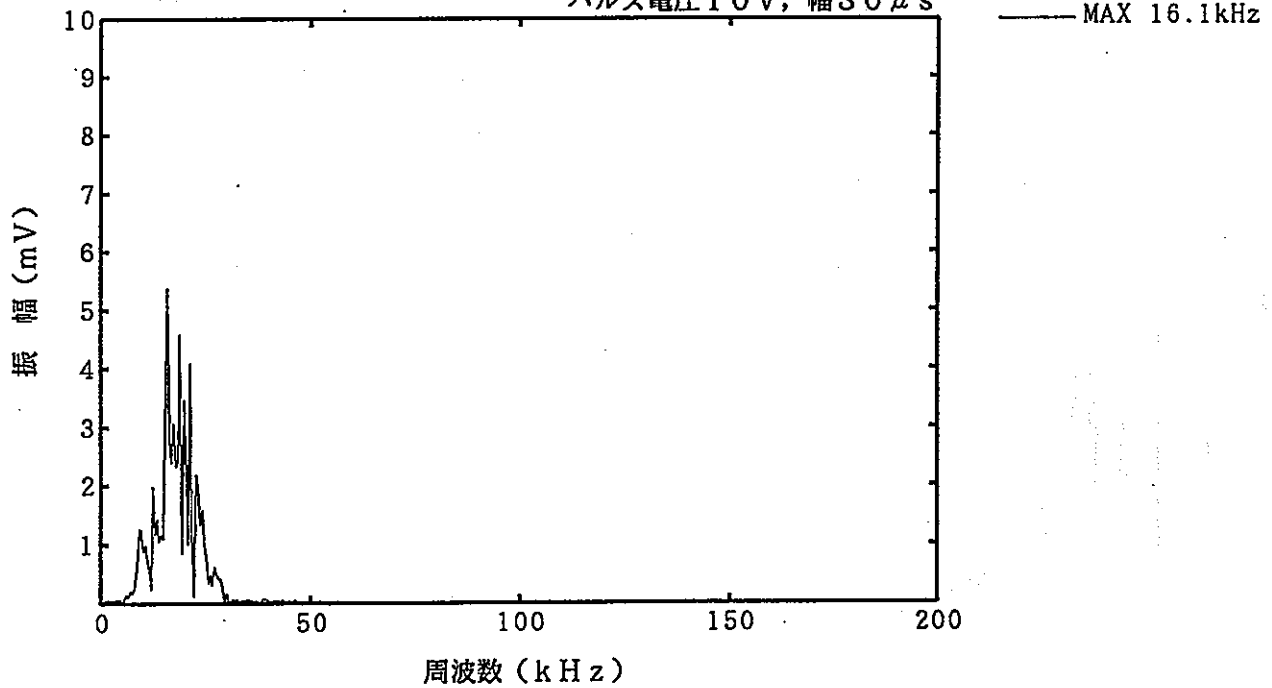




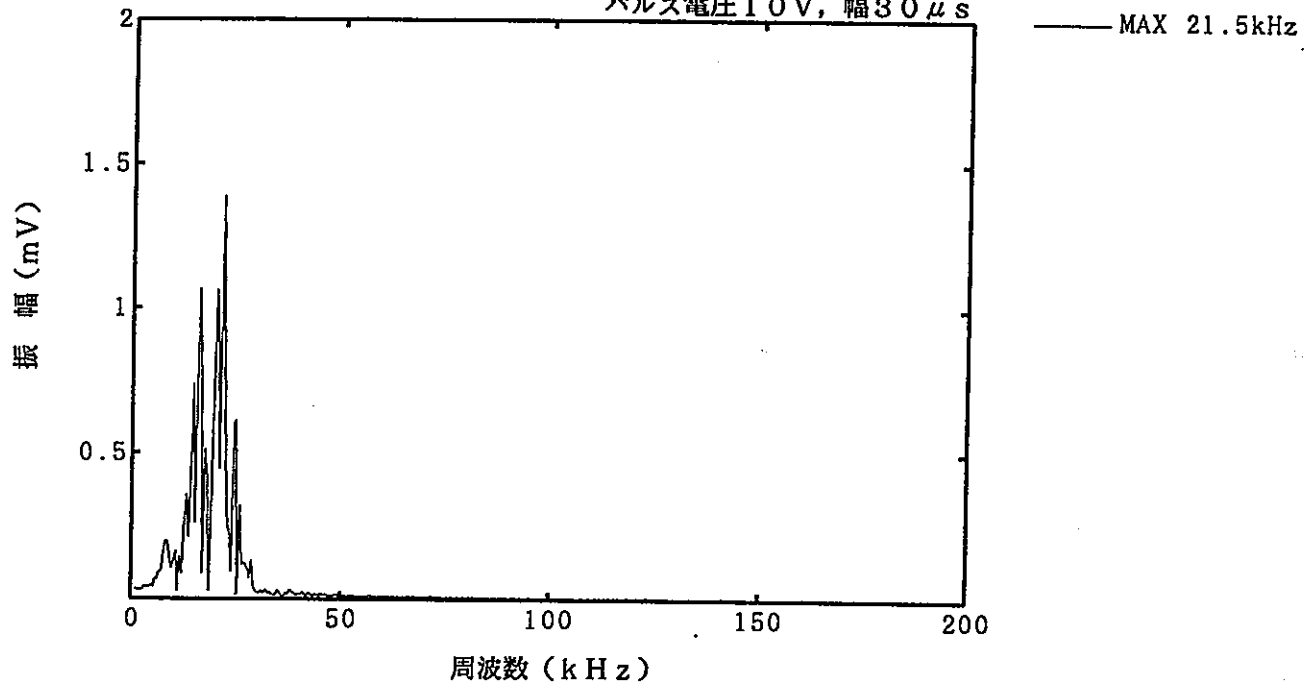
圧電アクチュエータ1個(軸方向重ね) 側壁発振(押さえ側) 受振距離0.5m
パルス電圧10V, 幅30 μ s

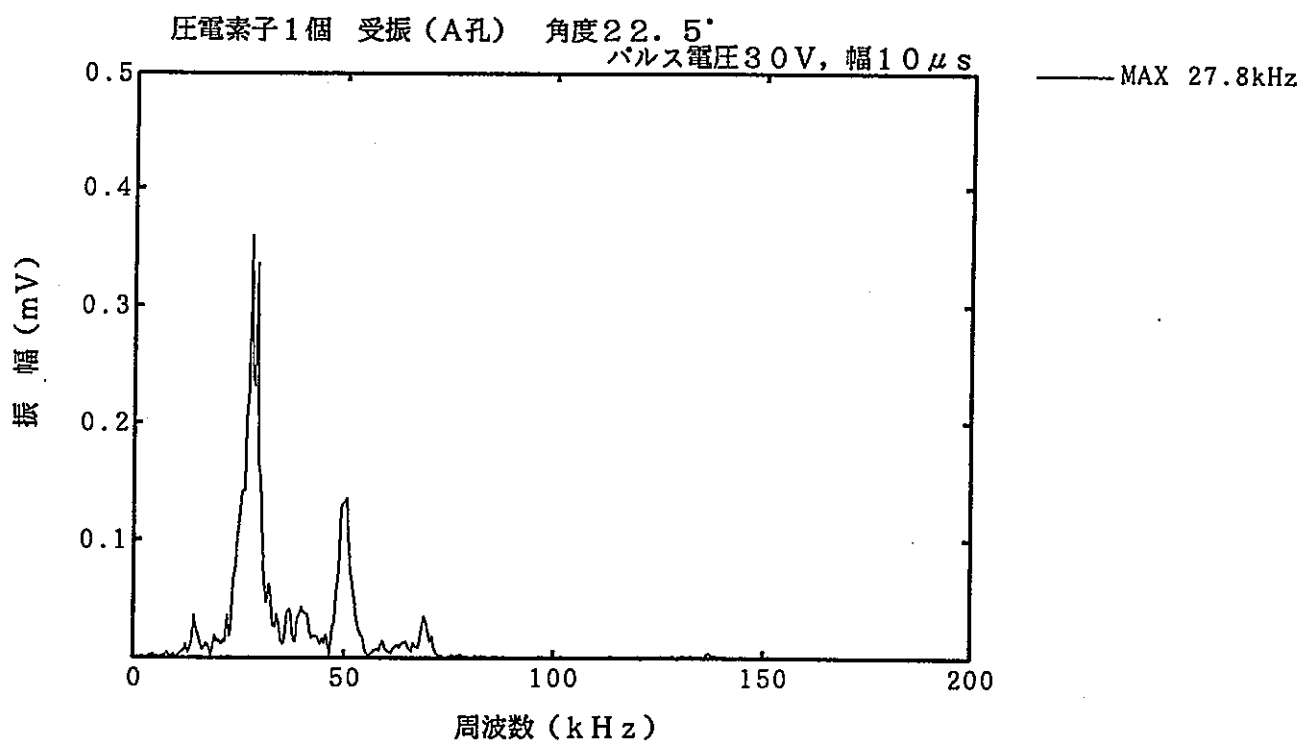
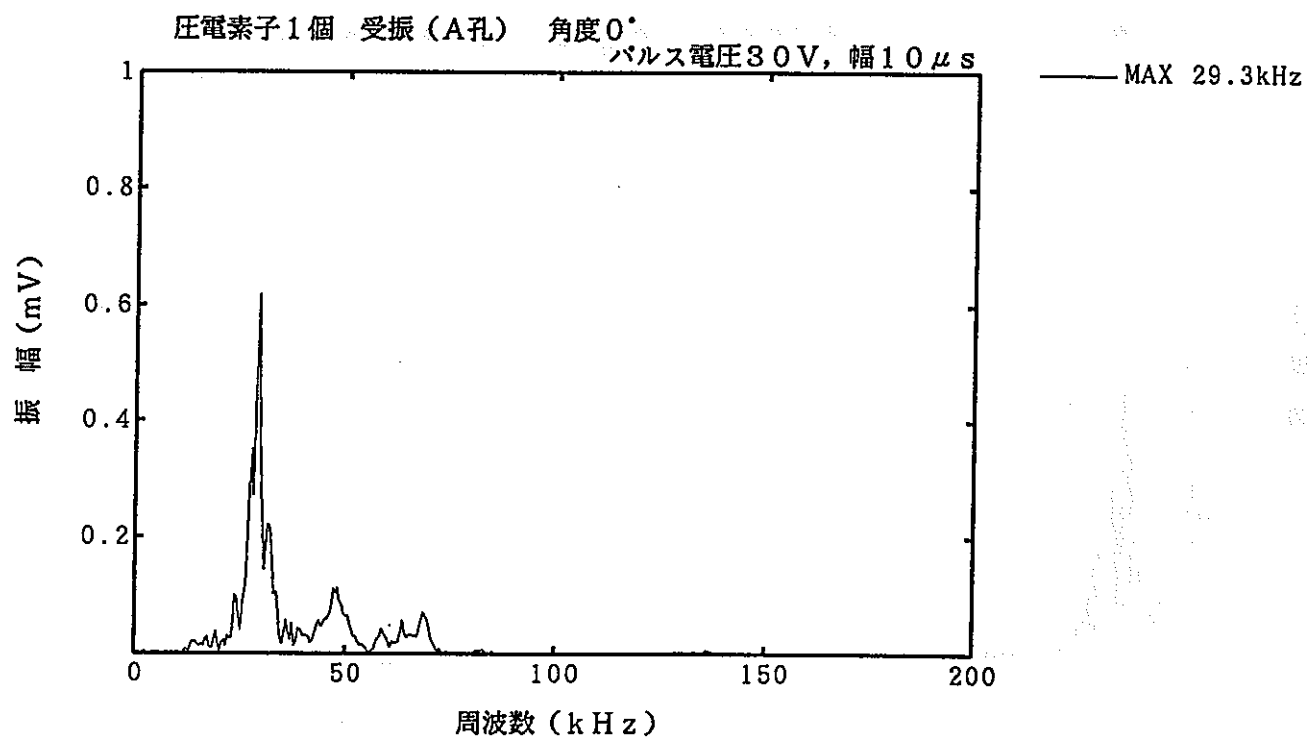


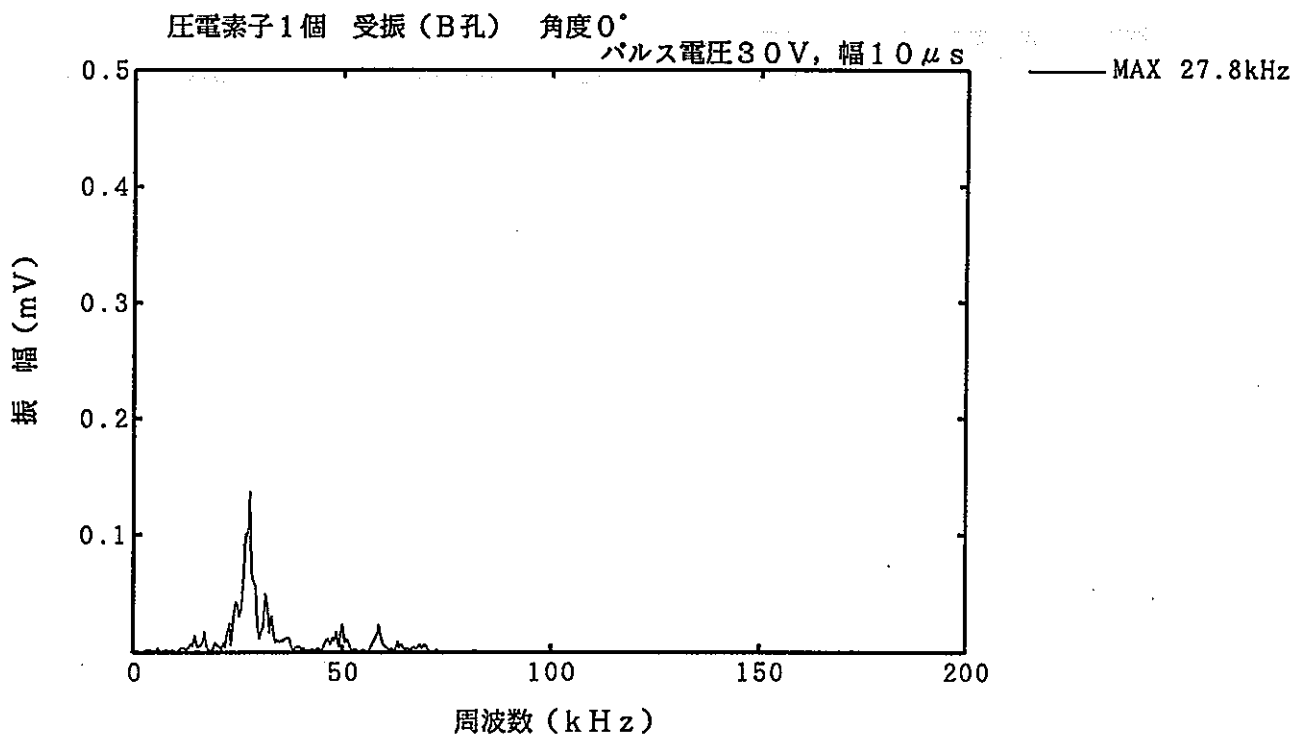
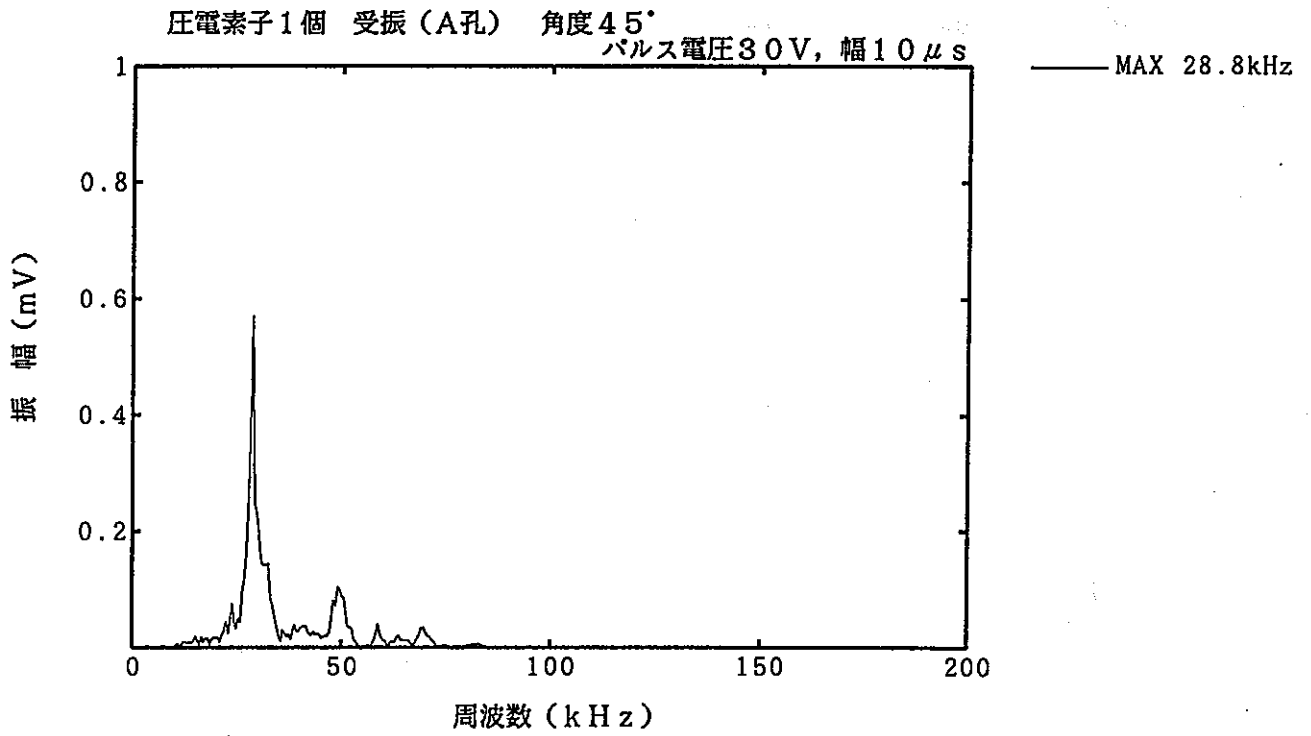
圧電アクチュエータ1個(軸方向重ね) 側壁発振(押さえ側) 受振距離1m
パルス電圧10V, 幅30 μ s

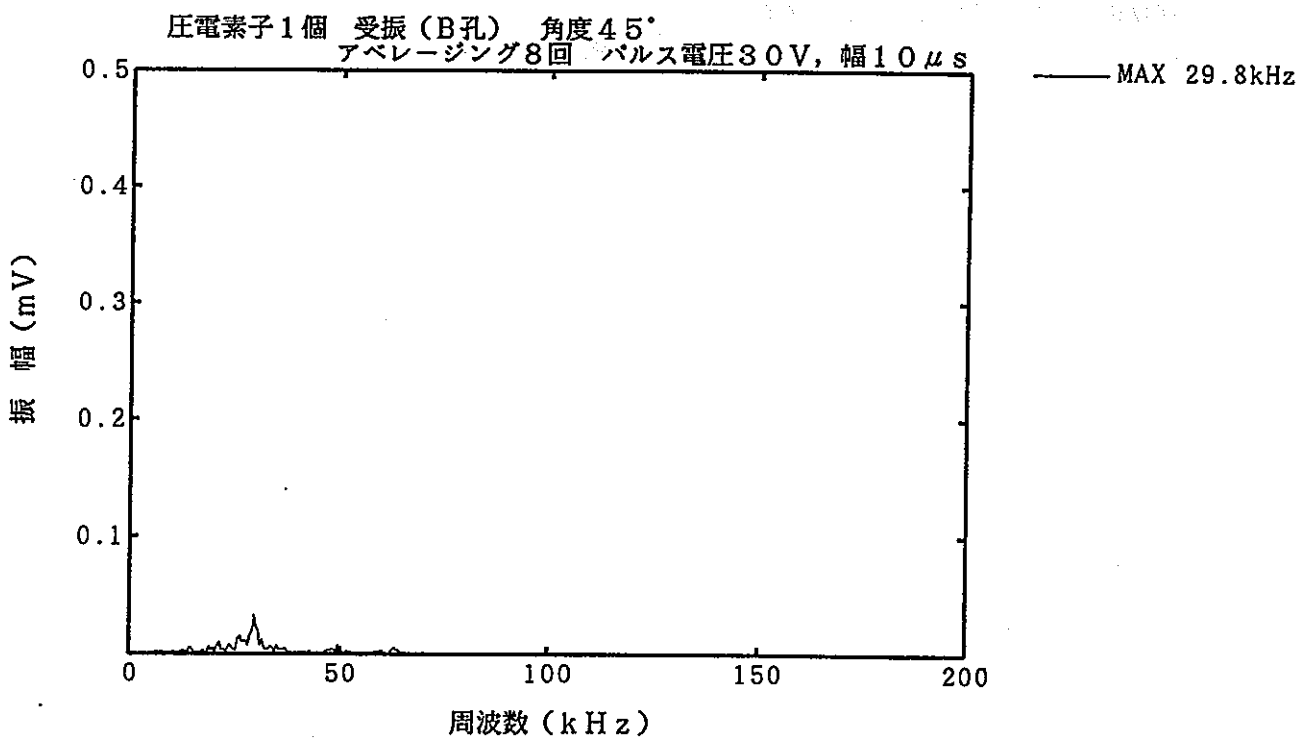
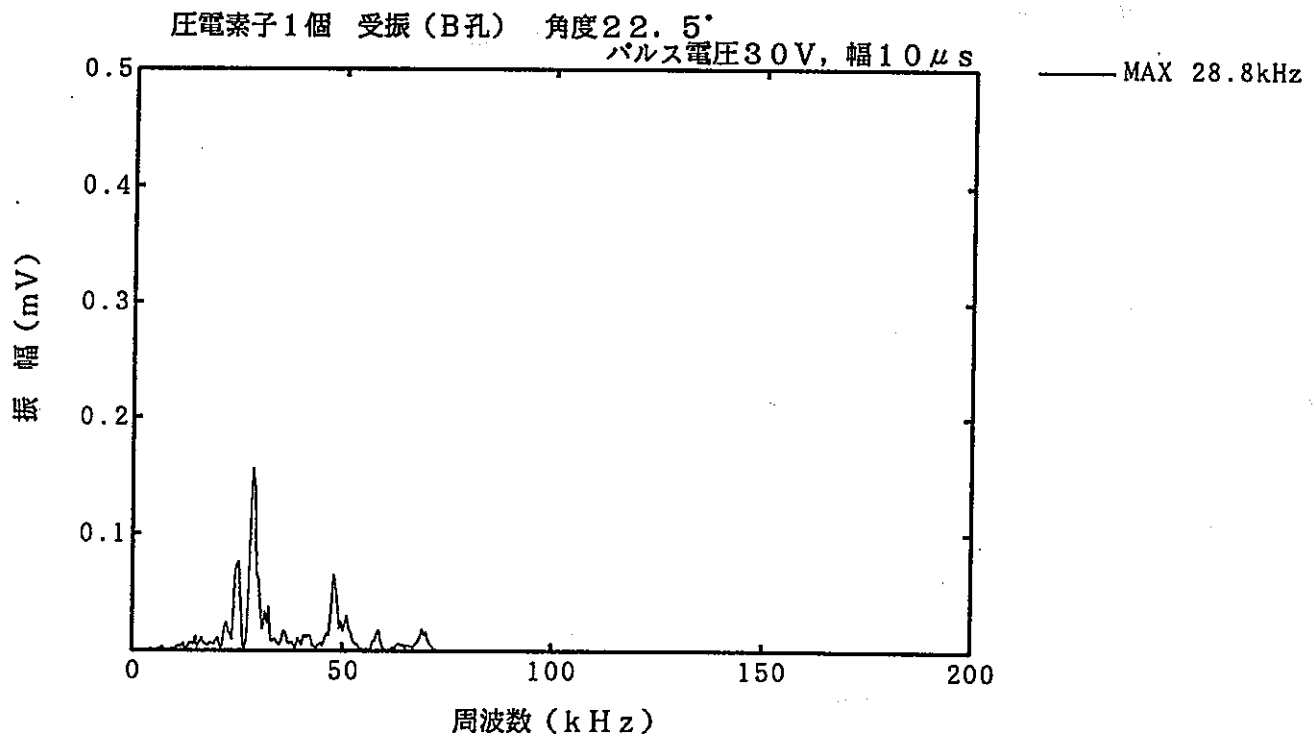


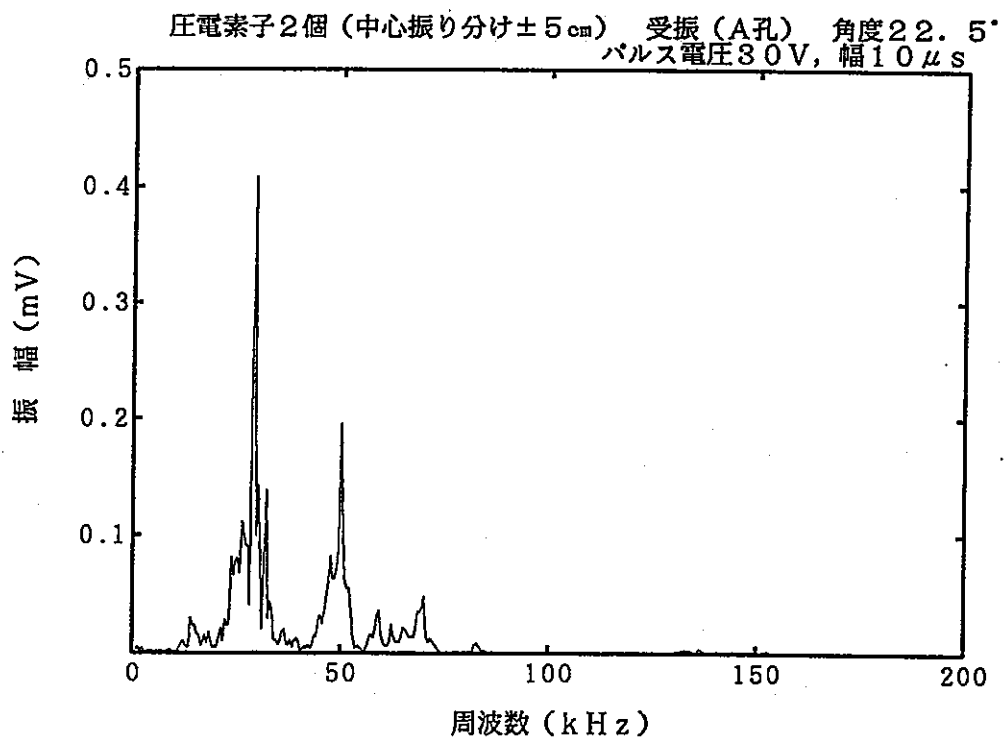
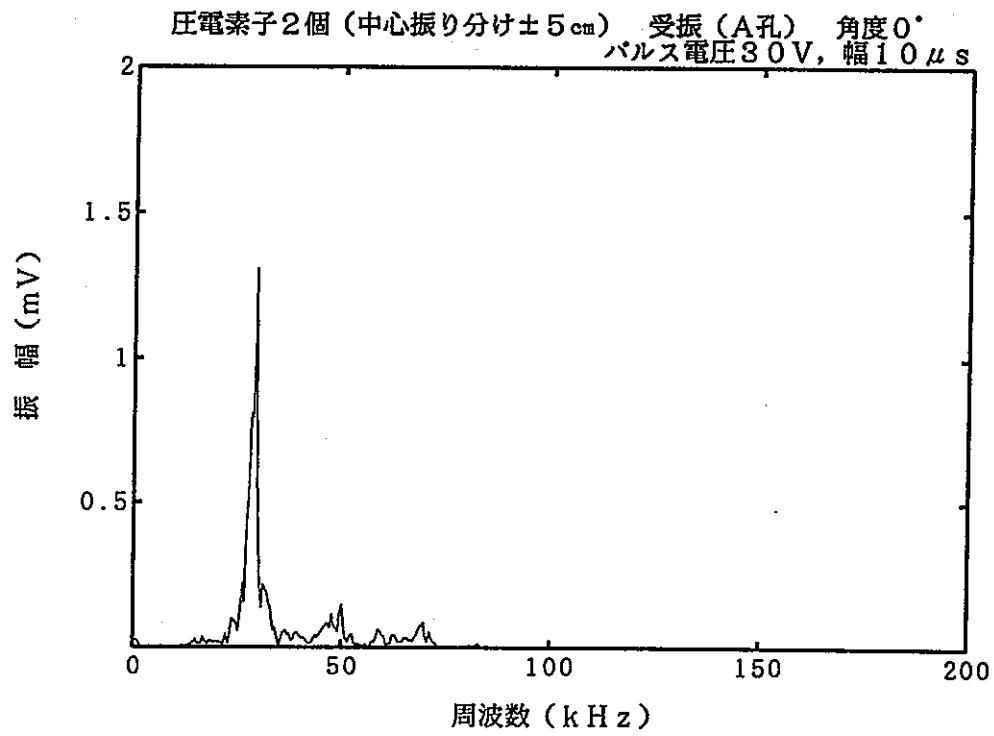
圧電アクチュエータ1個(軸方向重ね) 側壁発振(押さえ側) 受振距離1.5m
パルス電圧10V, 幅30 μ s

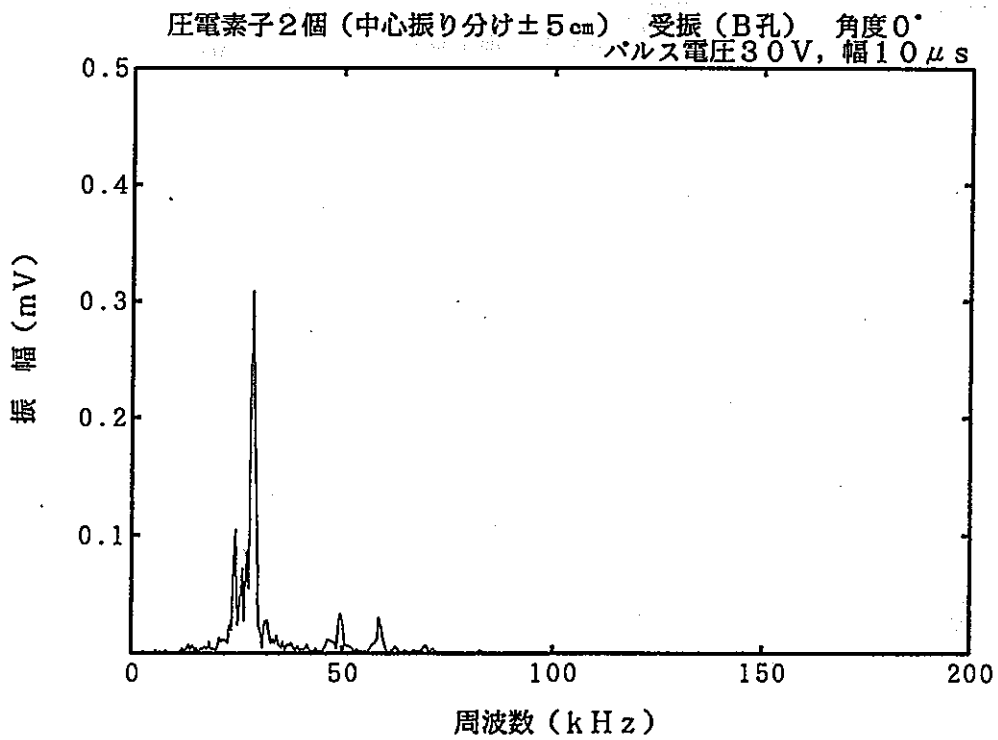
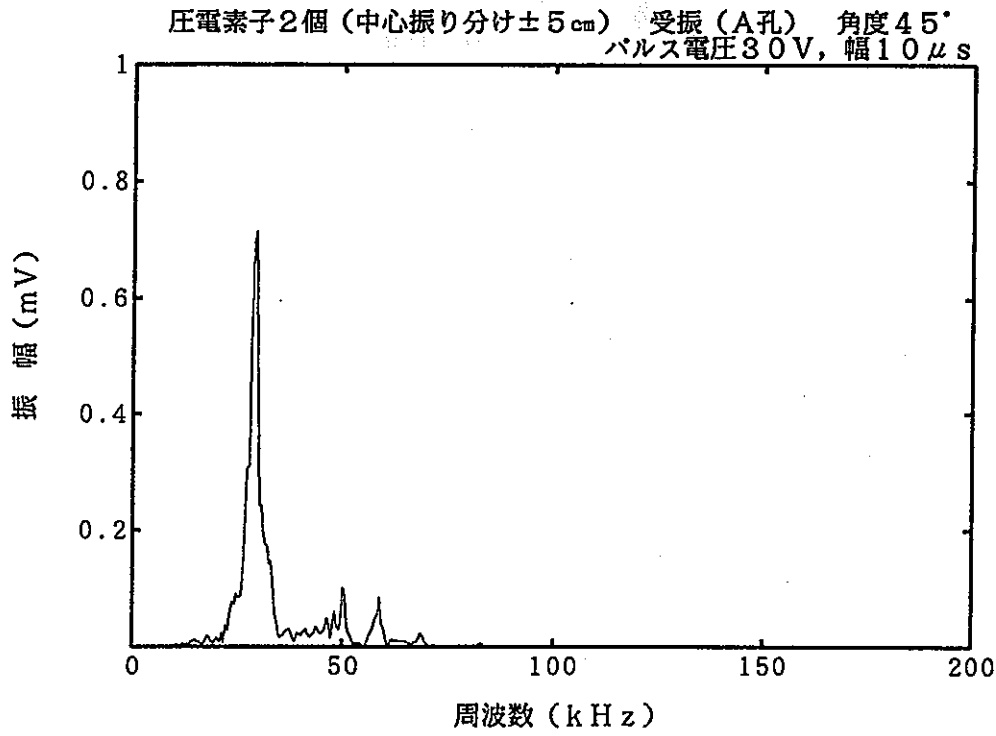


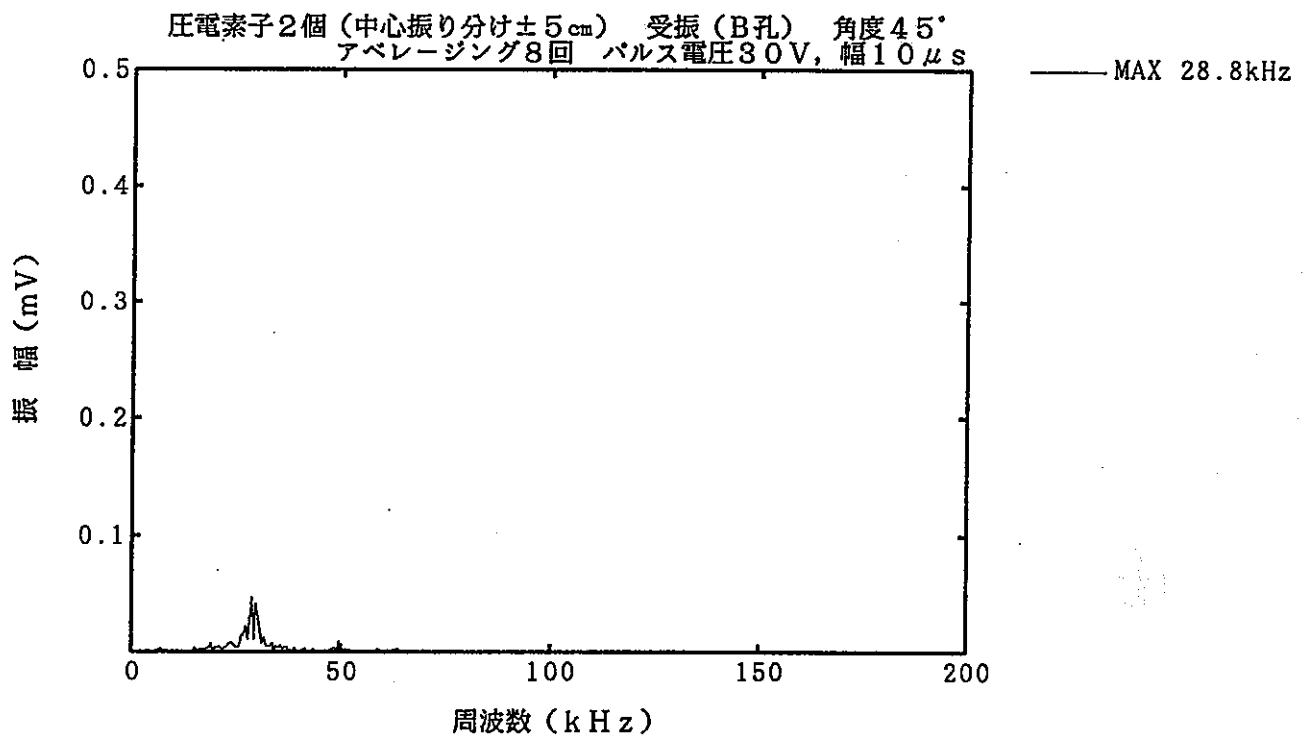
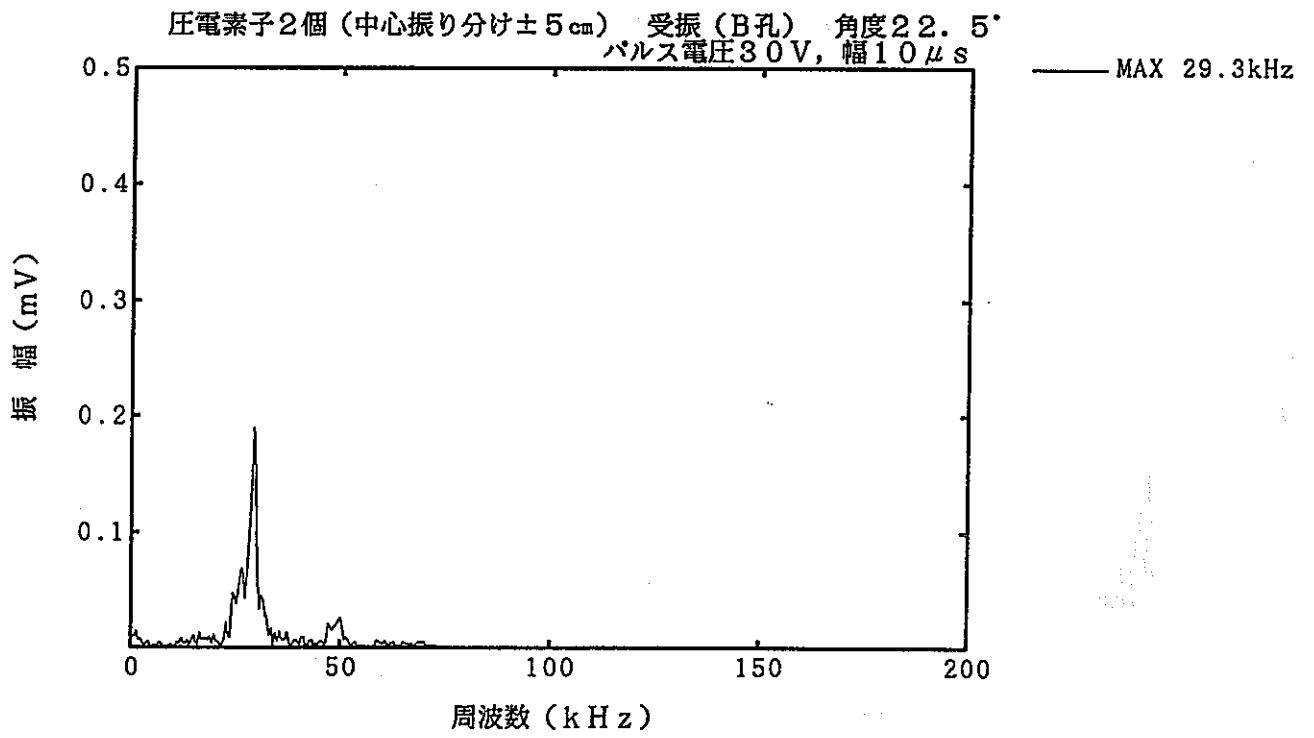


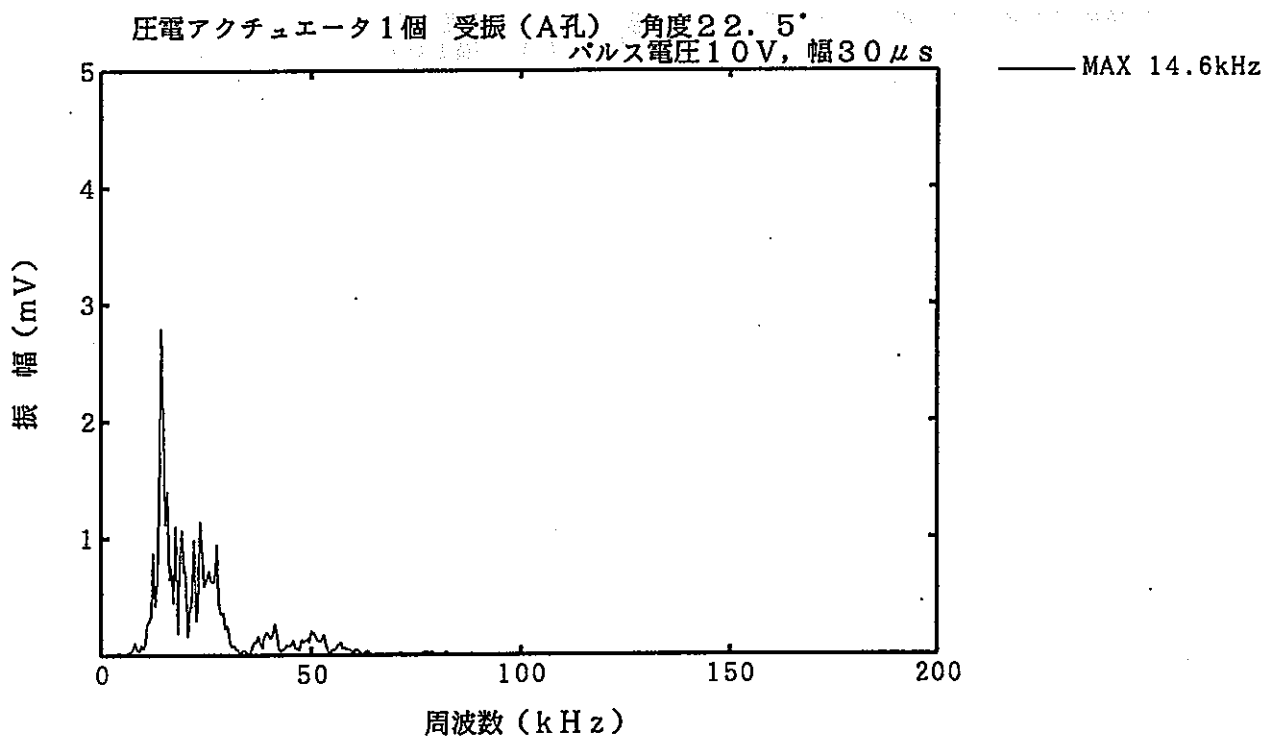
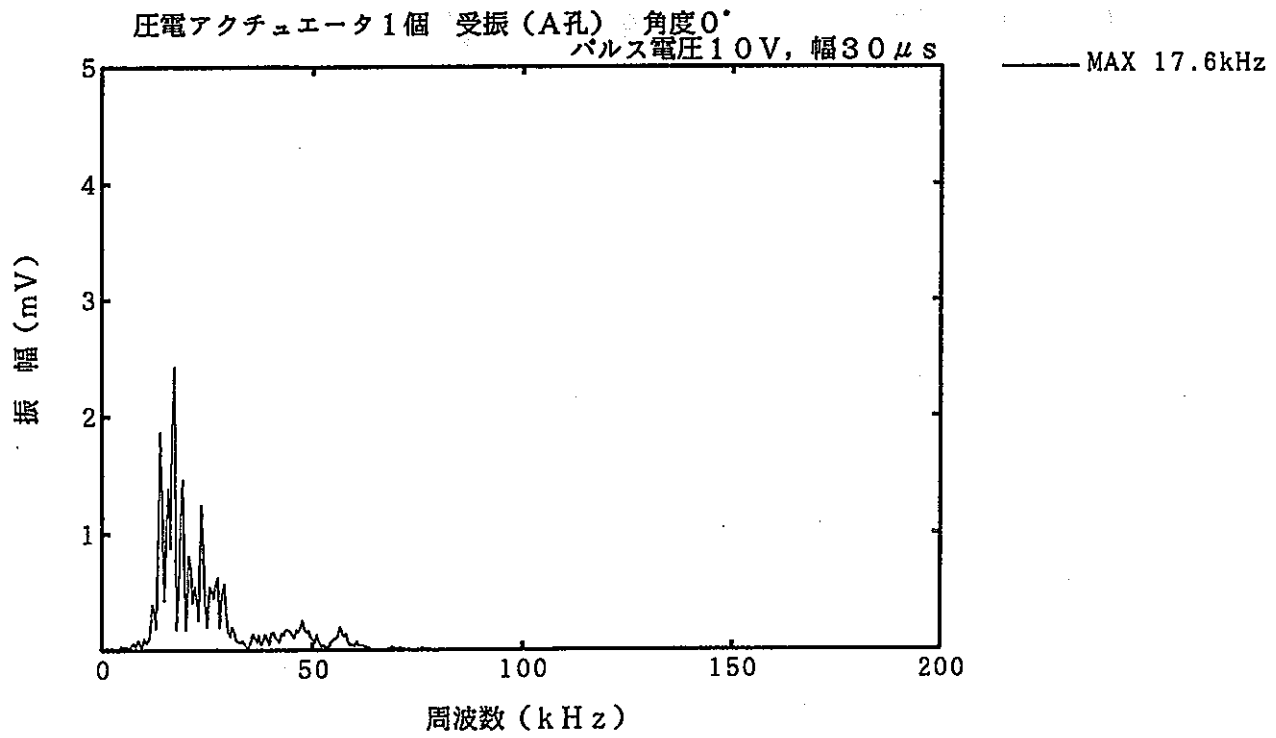


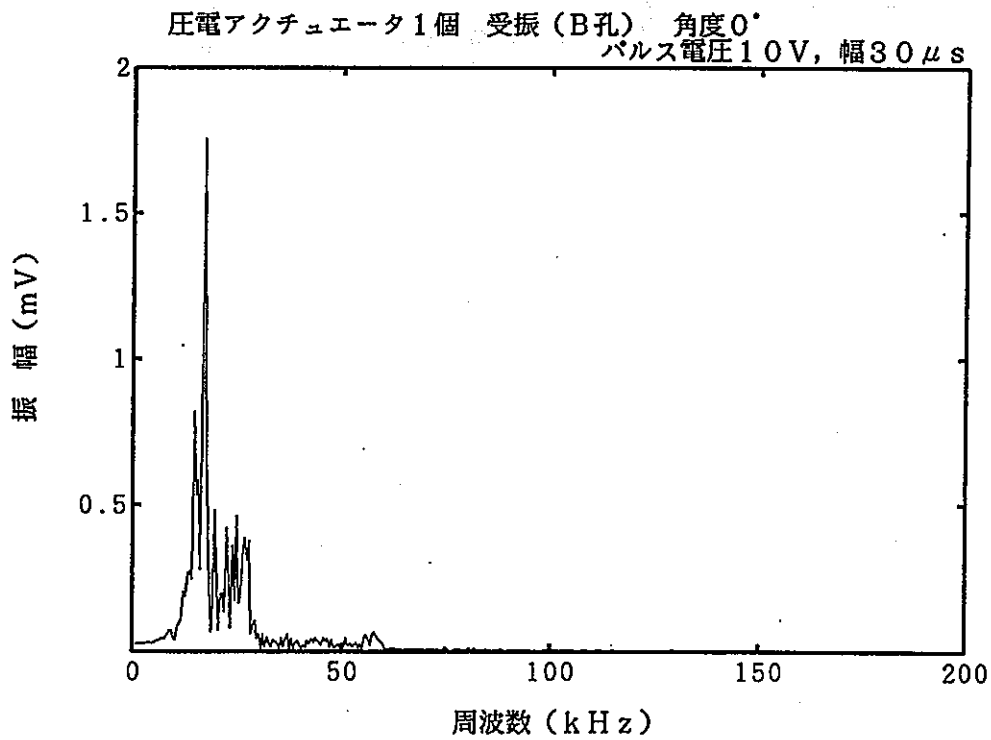
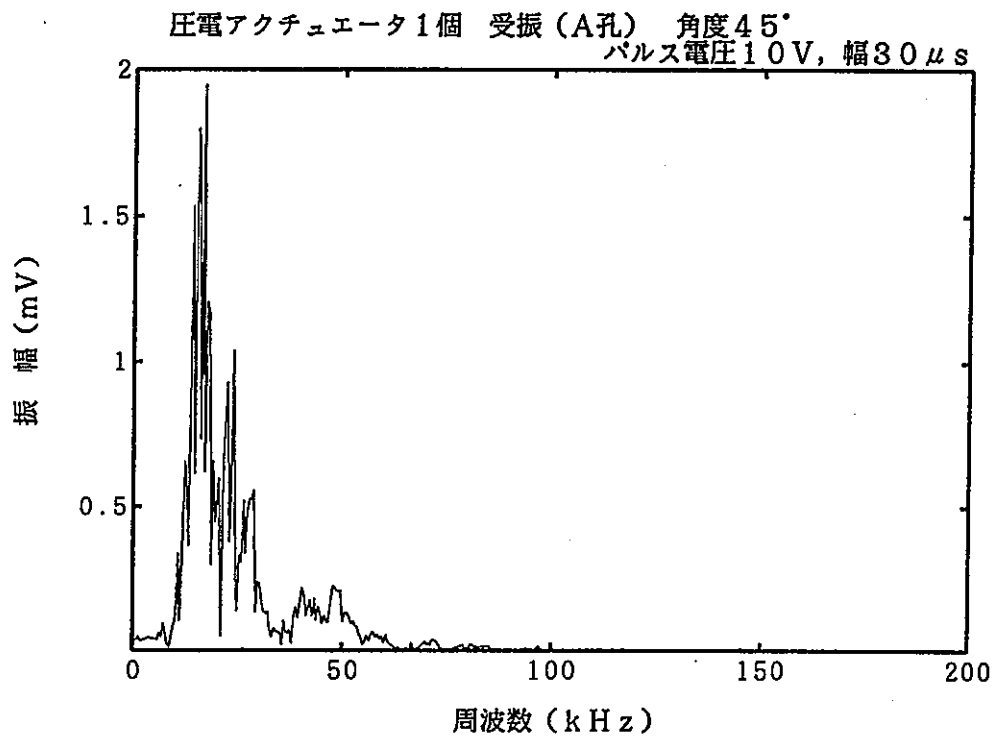


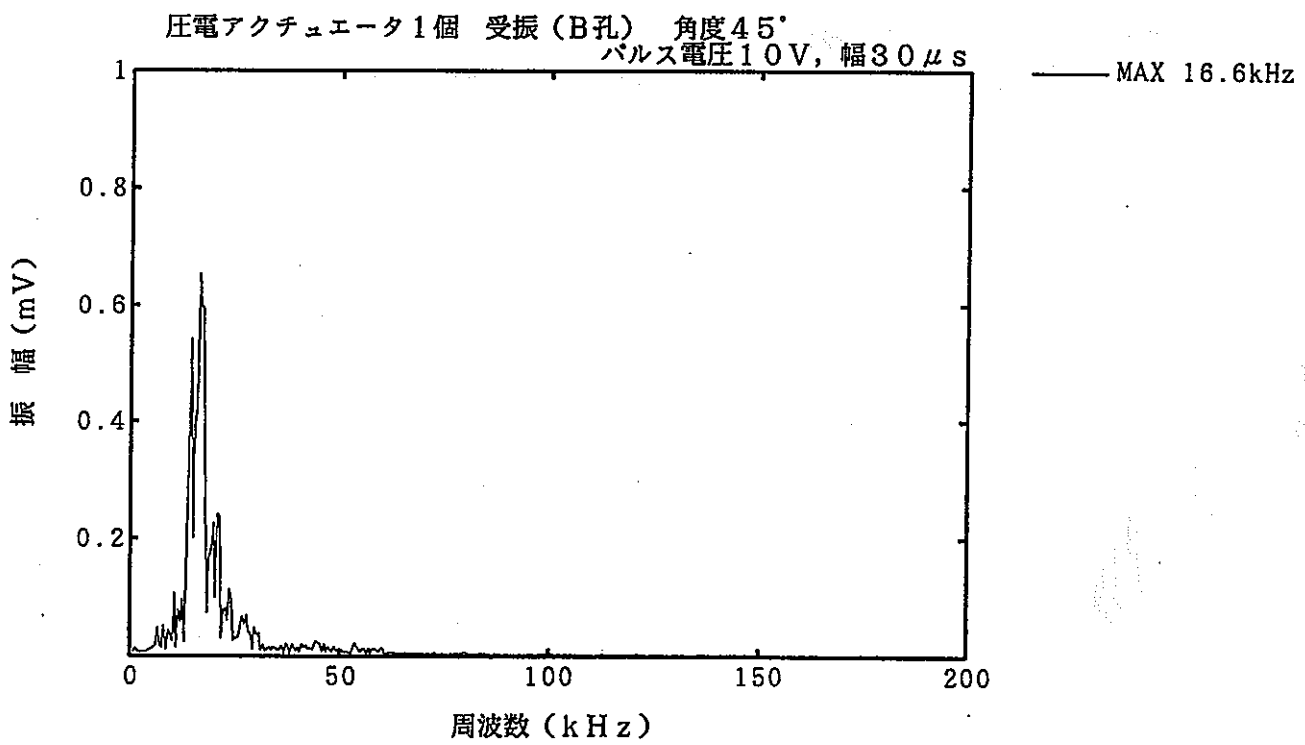
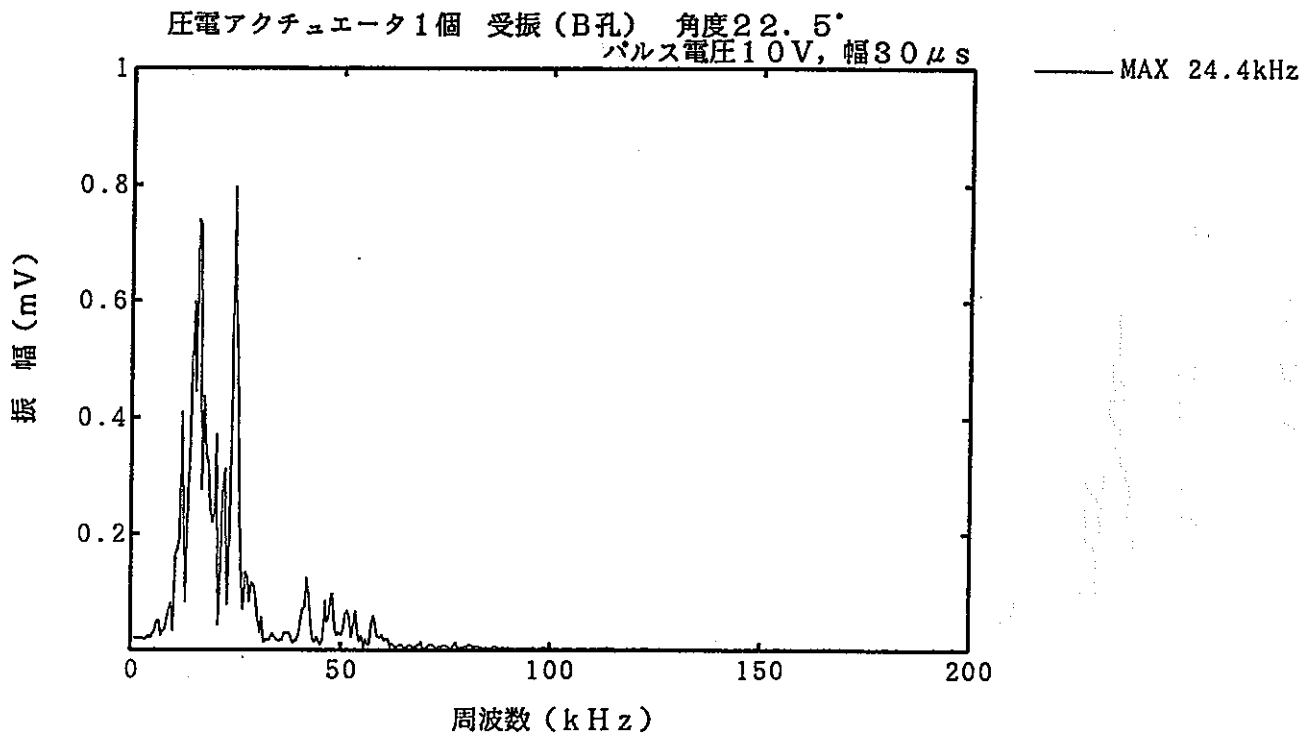




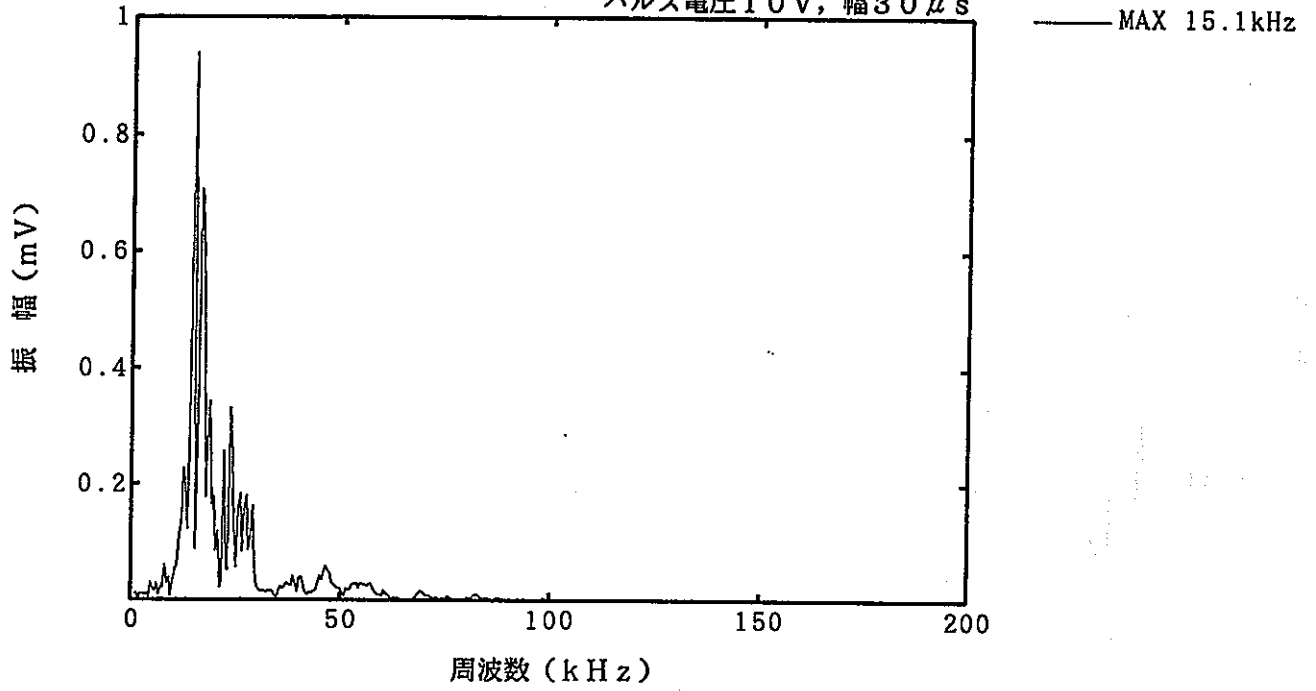




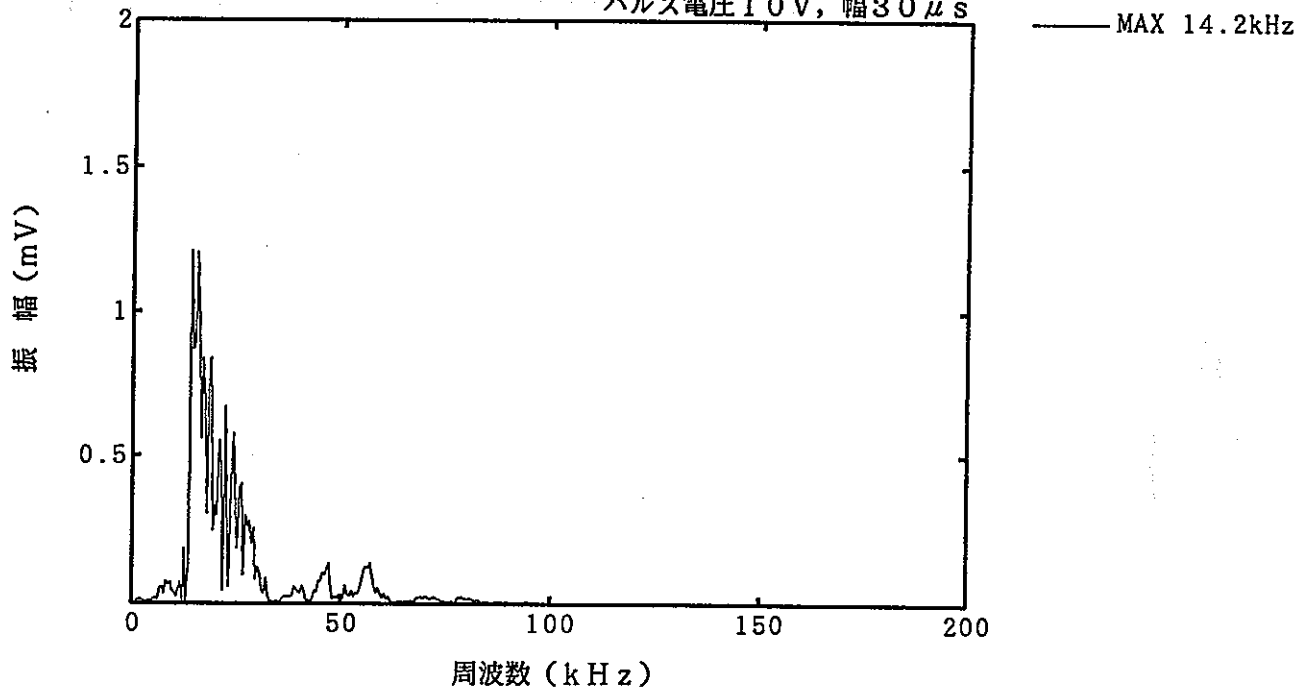




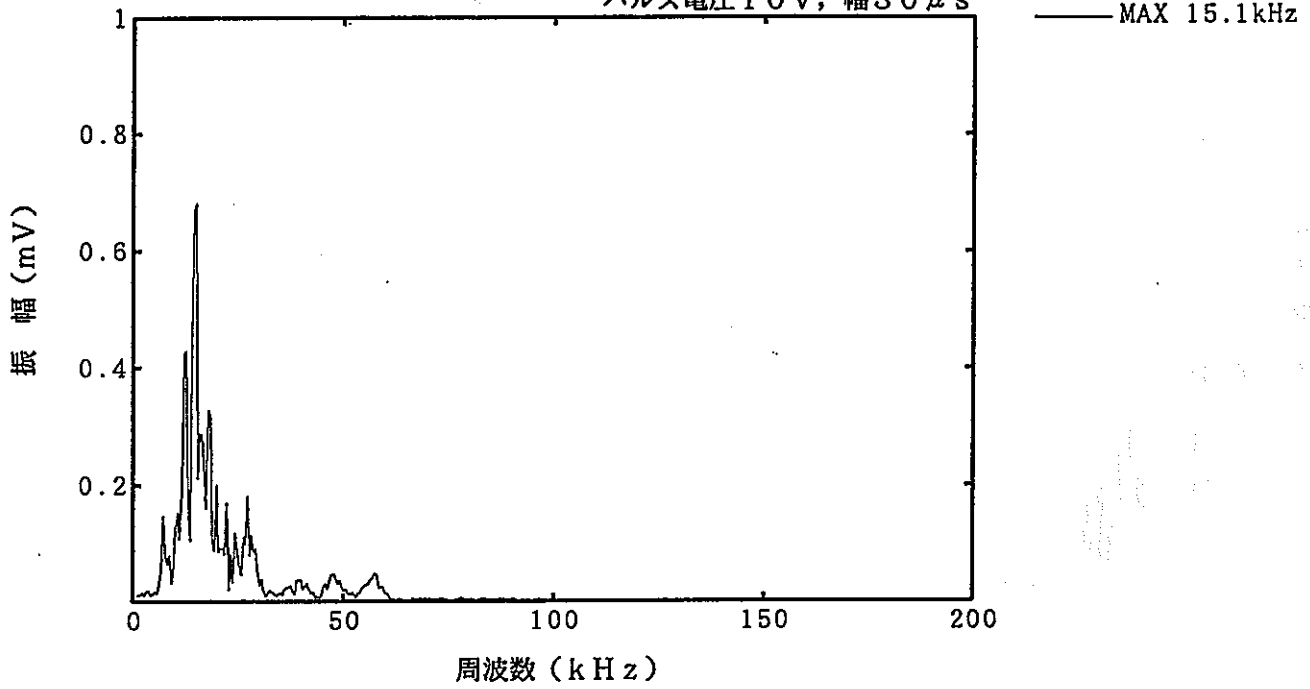
圧電アクチュエータ2個（中心振り分け±5cm） 受振（A孔） 角度0°
パルス電圧10V, 幅30μs



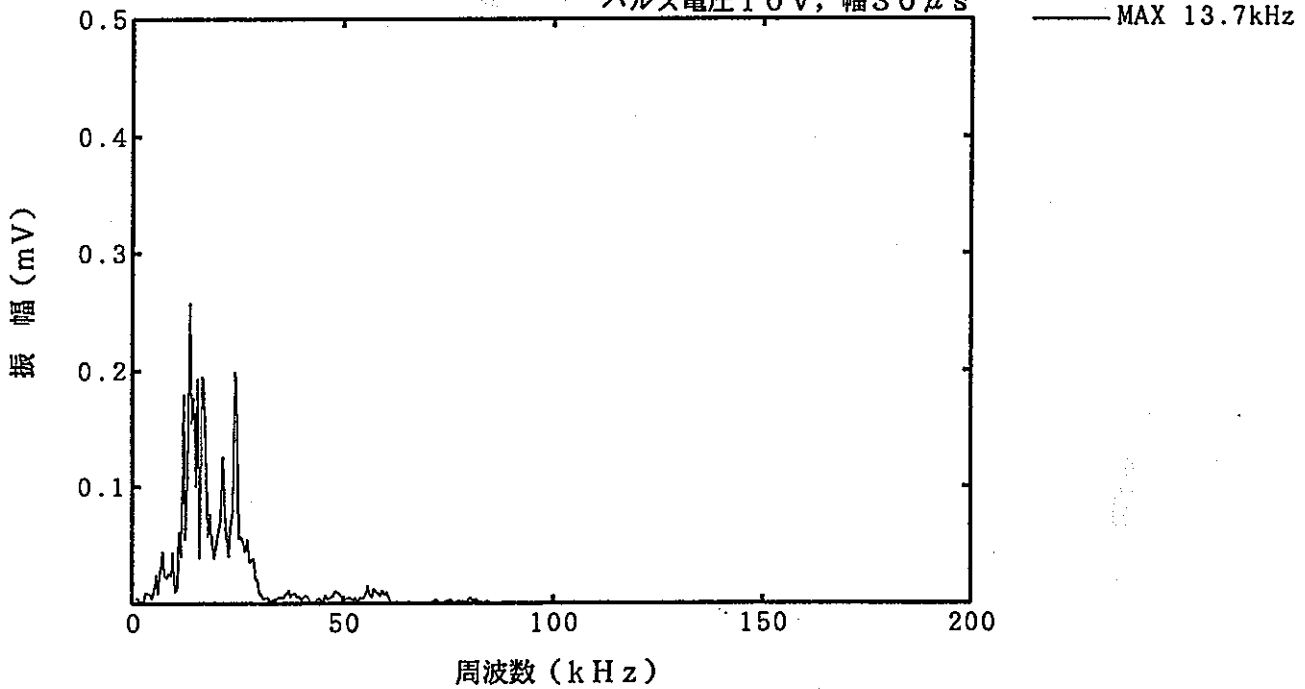
圧電アクチュエータ2個（中心振り分け±5cm） 受振（A孔） 角度22.5°
パルス電圧10V, 幅30μs

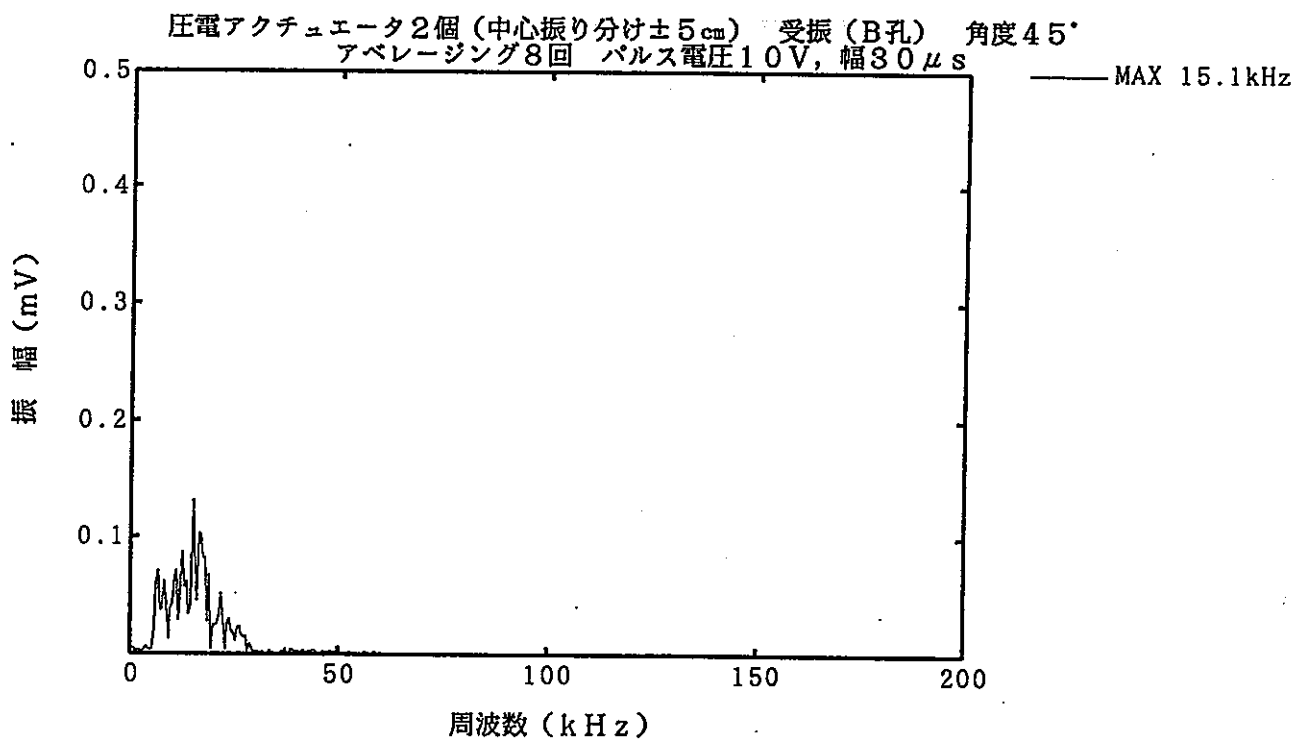
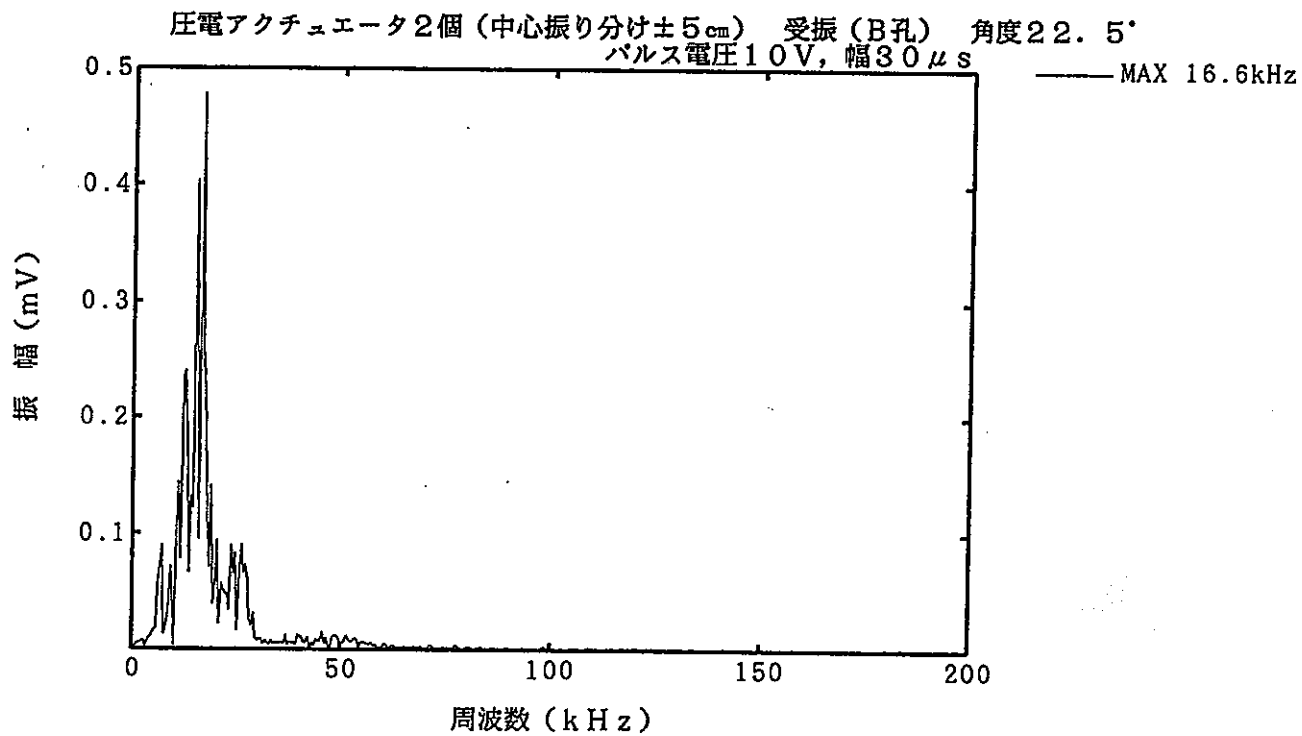


圧電アクチュエータ2個(中心振り分け±5cm) 受振(A孔) 角度45°
パルス電圧10V, 幅30μs



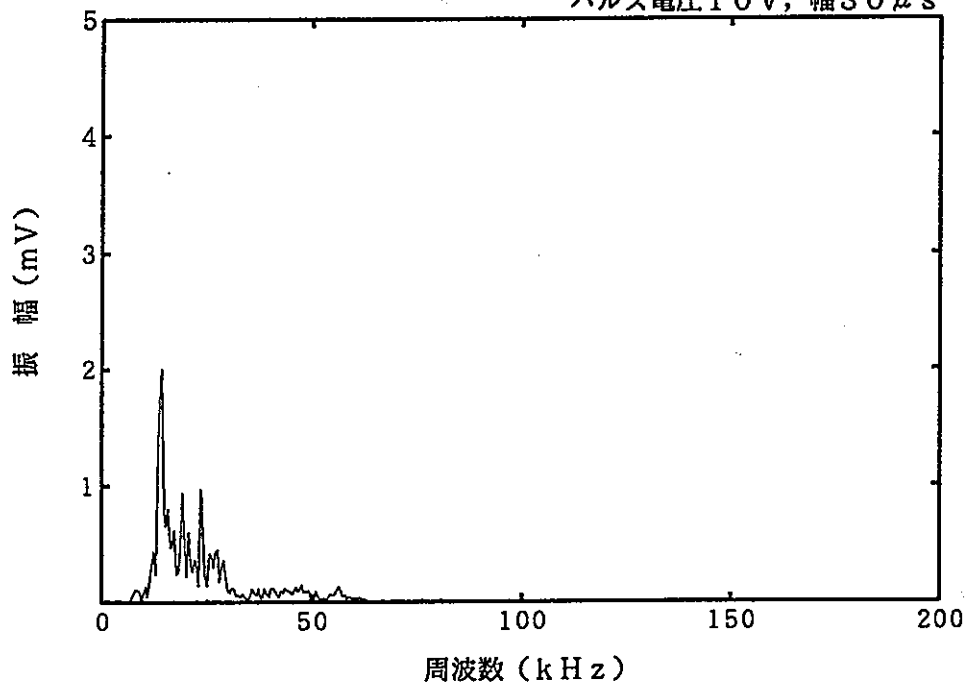
圧電アクチュエータ2個(中心振り分け±5cm) 受振(B孔) 角度0°
パルス電圧10V, 幅30μs





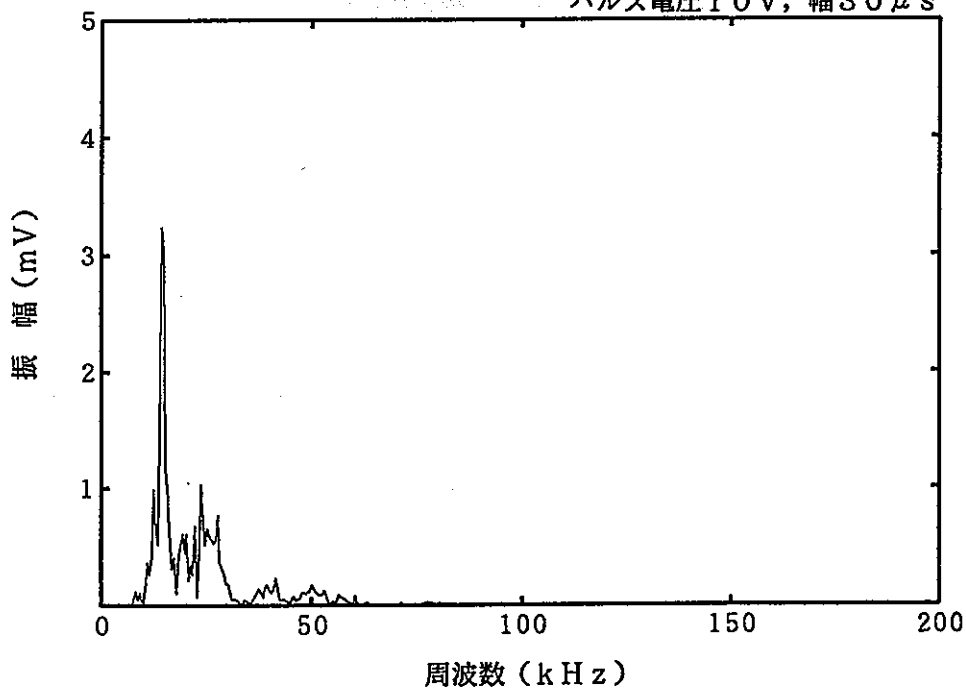
圧電アクチュエータ2個(軸方向重ね) 受振(A孔) 角度0°
パルス電圧10V, 幅30 μ s

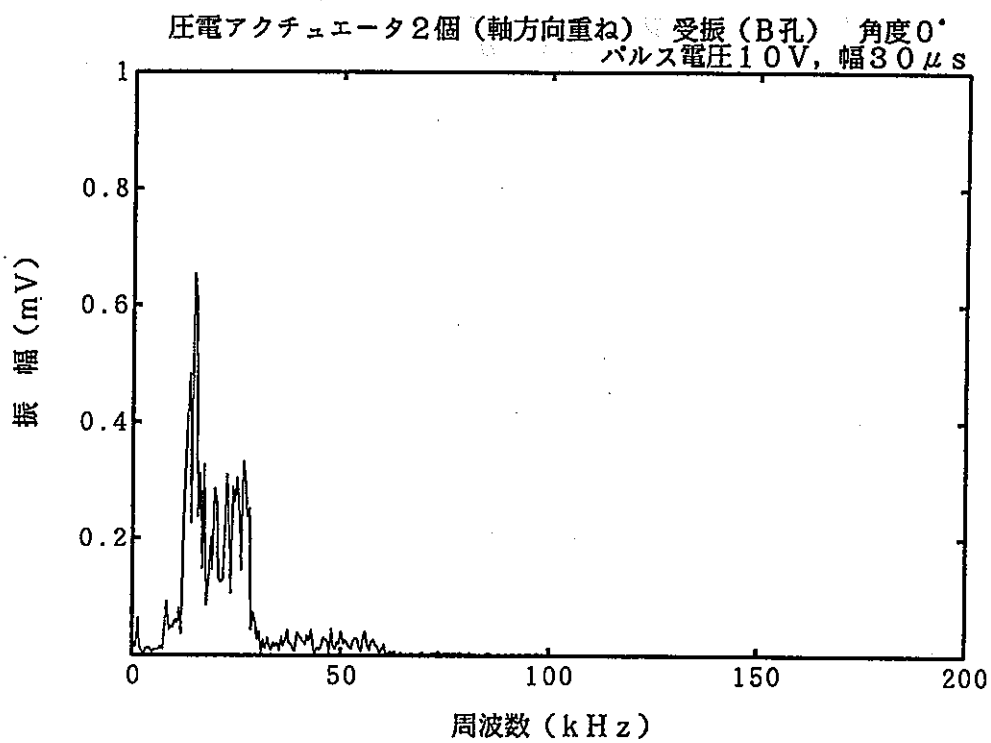
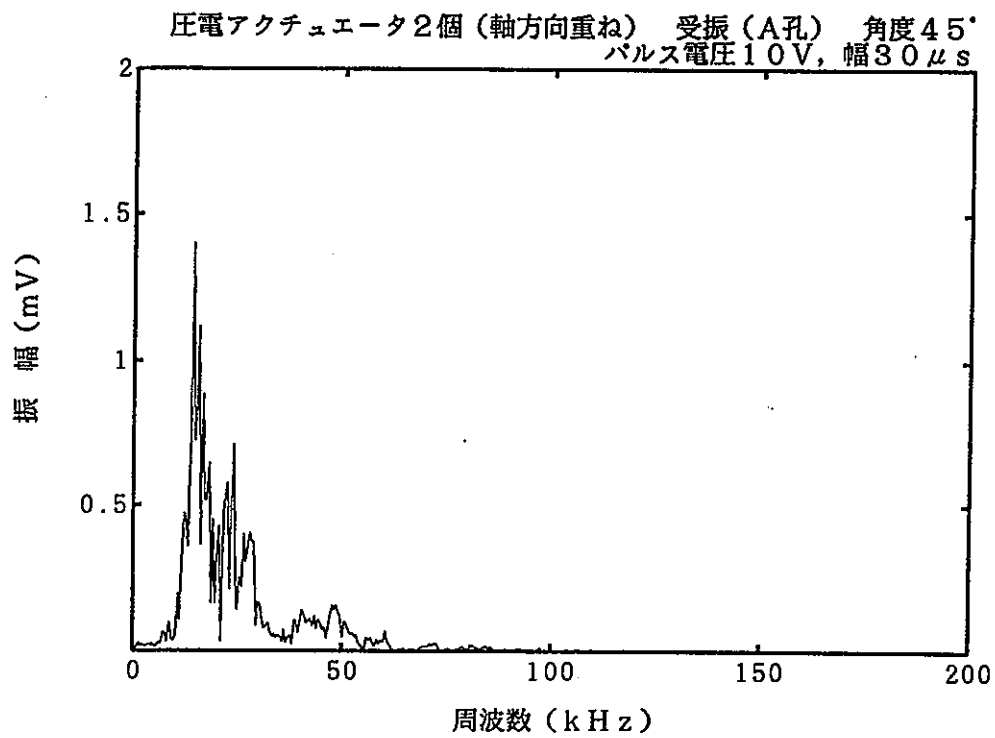
MAX 14.6kHz



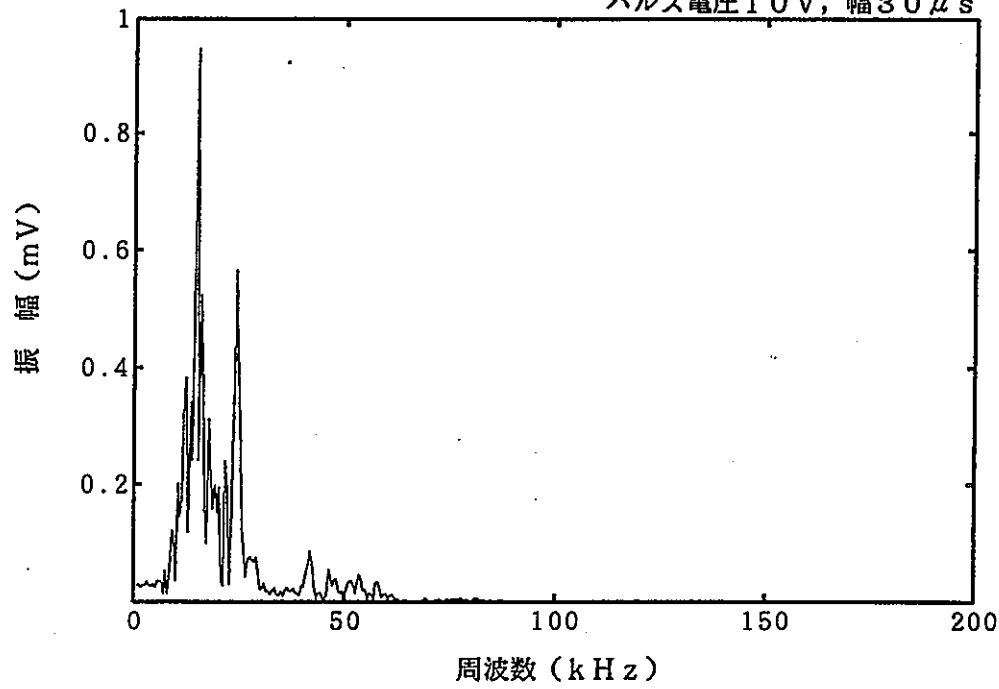
圧電アクチュエータ2個(軸方向重ね) 受振(A孔) 角度22.5°
パルス電圧10V, 幅30 μ s

MAX 14.6kHz

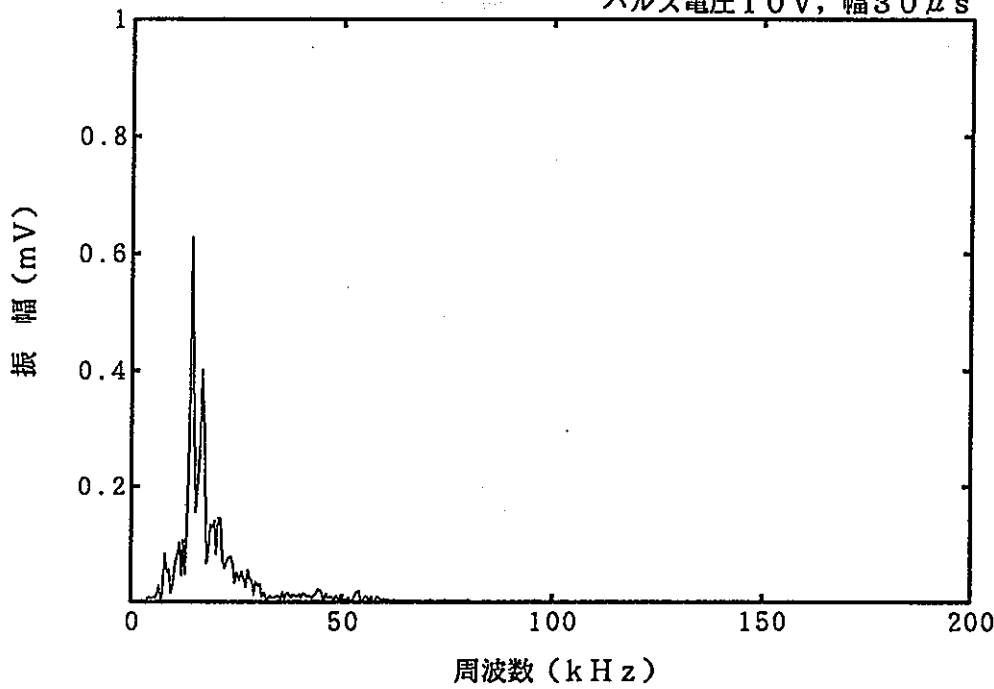




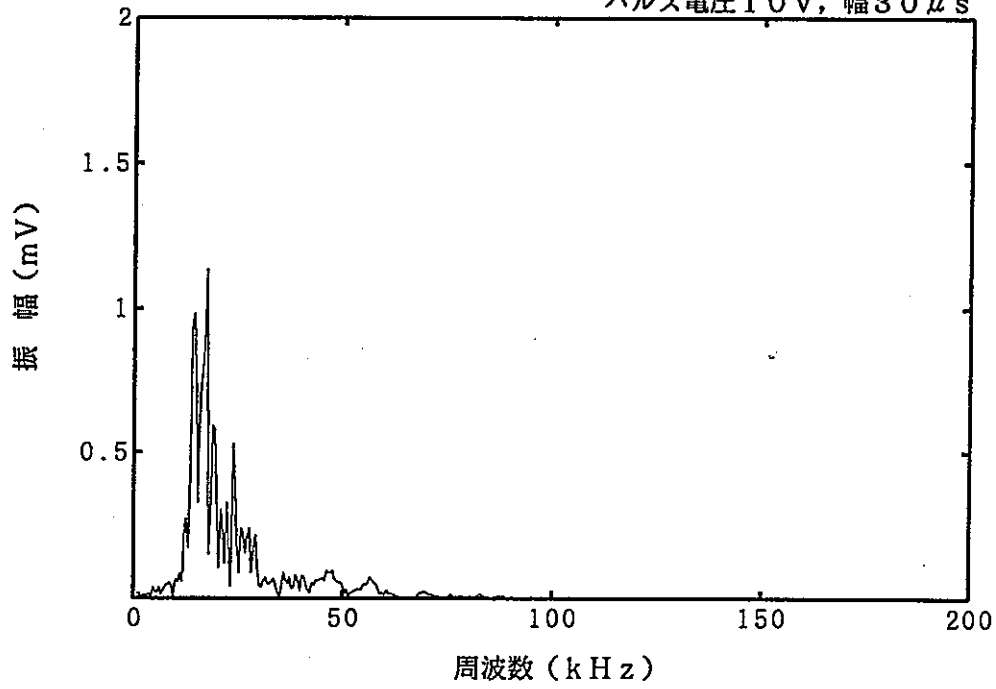
圧電アクチュエータ2個（軸方向重ね） 受振（B孔） 角度22.5°
パルス電圧10V, 幅30 μ s



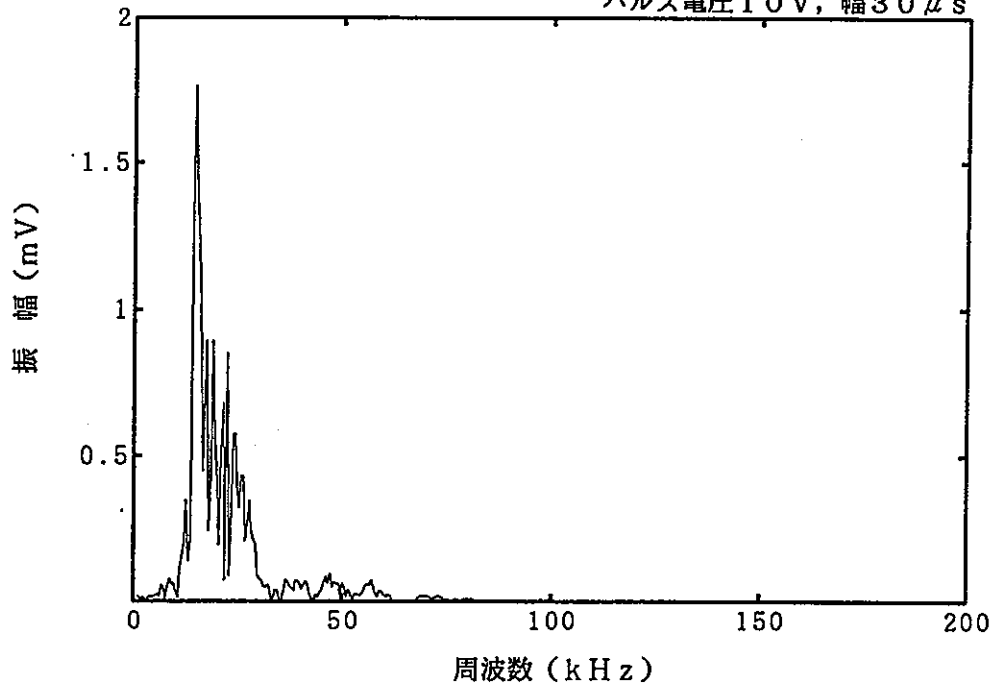
圧電アクチュエータ2個（軸方向重ね） 受振（B孔） 角度45°
パルス電圧10V, 幅30 μ s



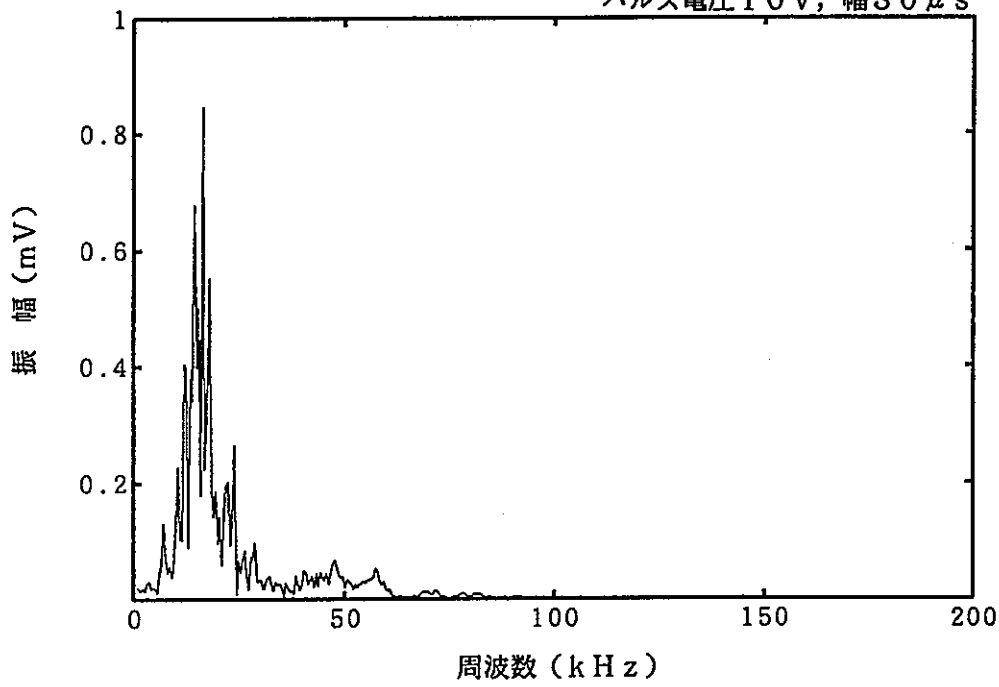
圧電アクチュエータ3個 (中心, ± 5 cm) 受振 (A孔) 角度 0°
パルス電圧10V, 幅 $30\mu\text{s}$



圧電アクチュエータ3個 (中心, ± 5 cm) 受振 (A孔) 角度 22.5°
パルス電圧10V, 幅 $30\mu\text{s}$

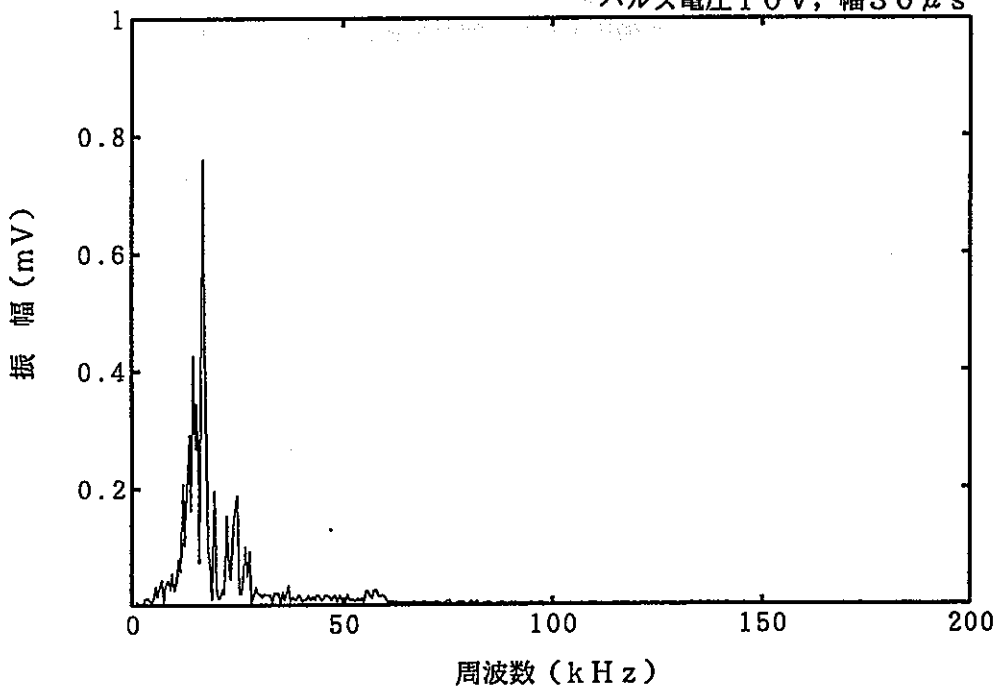


圧電アクチュエータ3個(中心, ± 5 cm) 受振(A孔) 角度 45°
パルス電圧10V, 幅 $30\mu s$



MAX 16.6kHz

圧電アクチュエータ3個(中心, ± 5 cm) 受振(B孔) 角度 0°
パルス電圧10V, 幅 $30\mu s$



MAX 17.1kHz

