

弾性波の周波数応答特性による  
土木構造物の損傷評価指標に関する研究

平成 24 年 2 月 22 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

高田雄大

## 要旨

近年、日本における道路や橋梁などの社会基盤構造物の供用年数の増加が問題となっている。特に橋梁においては今後供用年数が 50 年を超える割合が増加し、必然的に維持管理の重要性が叫ばれている。特に予防保全の観点から橋梁の道路橋床版などの損傷を評価することが重要となる。しかし、既存の点検で主に実施される目視点検では床版表面のひび割れが主に床版損傷の健全性がランク付けするパラメータであり、床版内部の損傷状態を早期には判断し得ない。予防保全の観点から損傷初期状態について適切に把握することが必要といえ、内部損傷を精度よく把握できる評価手法の確立が補修・補強を合理的に実施する上でも求められている。

このような背景から本研究では、非破壊検査の中でも用いる周波数により注目すべき損傷規模を変えることができる弾性波法を利用した。さらに、材料中の弾性波のエネルギー減衰の要因として距離と劣化の 2 つの観点に着目し、周波数応答特性を利用することで新たな視点から劣化評価を試みた。具体的には、健全なコンクリート供試体と、擬似損傷を加えたモルタル供試体に対して弾性波を励起させる実験を行い、その周波数応答の特性を検証した。本研究の成果として、この周波数応答特性の挙動から定量的な劣化評価ができる可能性が示された。

## 目次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	2
1.3 既往の研究	2
1.4 本論文の構成	3
第 2 章 弾性波法	5
2.1 コンクリート中での弾性波の特性	5
2.1.1 はじめに	5
2.1.2 コンクリート中での弾性波の周波数帯域	5
2.1.3 コンクリート中の弾性波伝播挙動に影響を与える要因	5
2.1.4 弾性波法	6
2.2 超音波法	6
2.3 AE 法（アコースティック・エミッション法）	7
2.3.1 既往の研究について	7
2.3.2 AE 法の基本原理	7
2.3.3 AE 法における計測機器	8
2.3.4 AE 波形データに関する各パラメータ	9
2.3.5 AE 法における破壊源探査	10
第 3 章 周波数応答関数	12
3.1 計測系の周波数応答	12
3.2 材料内の伝播	12
3.3 周波数応答関数の劣化評価への適用	13
第 4 章 周波数応答関数の健全コンクリート供試体への適用	16
4.1 目的	16
4.2 概要	16
4.3 結果と考察	17
4.3.1 検出波形と周波数分布	17
4.3.2 距離差ゼロの周波数応答（同距離比較）	17
4.3.3 距離差のある周波数応答	19

4.4	まとめ	20
第 5 章	モルタル供試体を用いた多重反射実験	21
5.1	目的	21
5.2	概要	21
5.3	結果と考察	22
5.3.1	検出波形と周波数分布	22
5.3.2	反射波の解析	23
5.3.3	AE 法への適用性	25
5.4	まとめ	25
第 6 章	結論	27
6.1	まとめ	27
6.2	今後の課題と展望	28
	参考文献	29
	謝辞	31

# 第 1 章 序論

## 1.1 研究の背景

現在、我が国における道路や橋梁などの土木構造物の供用年数の増加による構造物の劣化が問題となっている。図 1.1.1<sup>1)</sup>のように日本における土木構造物、特に高速道路や橋梁においては高度経済成長期に集中して構造物の建設が行われ、橋梁に限ればその約 34%がこの時期に建設された。例えば道路橋床版に着目すると、長期的な供用によって損傷が顕著なものもあり、大規模な維持補修の段階を迎えているといえる。そのような中で、これまで様々な維持補修計画や補修・補強工などが提案されてきた。

一般に、図 1.1.2<sup>2)</sup>に示す道路橋床版の現状の維持補修フローにおいては、日常点検や定期点検などを実施し、その中の項目である目視点検や打音検査などから床版の損傷ランクを決定し、そのランクや現場の状況や予算などを勘案して対策が行われている。ここで、目視点検で得られる床版の亀裂密度は表面で観察される亀裂を利用して求められるが、これらは内部損傷が表面に顕在化した結果を示す損傷後期情報と捉えることができる。よって、目視点検で得られる情報のみでは構造物の内部情報を適切に把握できず、また亀裂観察を行う際にその測定者によって誤差が生じることもあり、目視点検は曖昧な評価方法と考えられる。一方で、LCC（ライフサイクルコスト）などを考慮した道路橋床版の適切な維持補修計画においては、大規模な架け替えを行うよりも、予防保全の観点からできる限り損傷の初期段階において適切な補修を実施する方がコスト低減の効果があると既往の研究で指摘されている<sup>3)</sup>。つまり、目視では検知することができないような、初期段階における内部損傷を適切に評価できる方法が必要とされている。

一方、維持補修の段階において、内部損傷が適切に把握されていない状況で補強対策を実施した場合には、増厚したコンクリートと母材床版との界面以外に元々存在していた水平ひび割れが雨水の浸透などで更に拡大してしまうことがある。その結果、期待していた断面力が得られないため、目標とする性能まで回復せず、かえって維持補修コストの増大を招いてしまうことがある。このように、床版内部の損傷状態を適切に把握する手法が強く求められている一方で、それらを適切に把握する手法は現在確立されていない。

## 1.2 研究の目的

本研究では、非破壊検査法の中でも対象損傷規模に対応した周波数帯における弾性波法を用いて、土木構造物に生じる損傷を定量的に評価する手法を構築することを目的とする。具体的には、土木構造物のもつ性能を表 1.2.1 に示すような定性的な劣化評価等級で評価するのではなく、計測より得られた弾性波パラメータを実際の性能等級の指標に直接的に結び付け、性能、つまり劣化度合いを定量的に評価する。

資産（土木構造物）の経年劣化と状態等級の関係を表すものとして、図 1.2.1 にその性能評価例を示す。図 1.2.1 のように全ての資産には最小の性能レベルが規定されている。このレベル以下となれば、すぐに破壊するわけではないが最低限の性能が確保できなくなったものと考えることができる。この最小性能レベルを用いて現状より余寿命が推定できる。しかし先述したように、現状としてこの状態等級の判断基準が曖昧であるため正確な精度のよい余寿命推定ができるまでには至っていない。そこで「劣化の定量的評価」が必要となるわけである。

## 1.3 既往の研究

本節では、弾性波法を道路橋床版の損傷評価に試みた既往の研究について概説し、その中の問題点及び、本研究の位置づけを述べる。

林田ら<sup>4)</sup>は、非破壊試験を用いてコンクリートおよび構造物に対する健全度評価手法について検討を行った。コンクリート構造物に関しては、材料自体の劣化状況に基づいた健全度評価がなされてきたが、構造物の使用性や安全性を考えると、構造物の挙動面からの健全度評価が必要となる。そのため、材料と構造に関する特性変化や相互の関係性に着目した総合的な評価手法の検討が必要であるため、非破壊検査の中でも「デジタル画像処理」および「超音波伝播速度測定技術」また「光ファイバーセンサによる構造物挙動（ひずみ変化）測定技術」に着目し研究を行っている。これによると、ひび割れ密度と超音波伝播速度には、相関性があることが確認され、逆にひび割れ密度や超音波伝播速度と光ファイバー計測で得られた変位との関係には明確な相関は得られないという結果が示されている。

現状として、床版の健全性を評価する主な指標には、ひずみとひび割れ密度がある。しかし、これらは床版内部の変状や損傷が表面に現れて得られる指標であ

ることから、損傷を初期段階から適切に評価するうえでは不十分なパラメータといえる。

このように構造物の健全度評価を実施するうえでは、どのようなパラメータを利用して検討するかが重要な要素といえる。特に道路橋床版においては床版表面から得られる情報だけでなく、床版内部情報を含有したパラメータを用いて健全度を評価するほうがより早期に損傷を検知できるといえる。そこで、非破壊検査のなかでも破壊に敏感なアコースティック・エミッション（AE）計測を用いた研究が進められてきた。AE計測によって得られるパラメータには周波数、弾性波速度、エネルギー、最大振幅値、減衰勾配などが挙げられる。その中でも既往の研究<sup>5)</sup>により、弾性波速度よりも周波数（重心周波数、最大周波数）のほうが損傷に対して敏感で、初期損傷を把握することに有利な結果が得られることが判明している。そこで、本研究では数あるパラメータの中でも周波数に着目し、劣化の進行に従う挙動特性を評価する。

AE法は様々な構造物に適用が試みられている。例えば濱田ら<sup>6)</sup>は、劣化した港湾コンクリート構造物に対して、AE計測の適用性を検討している。また中西ら<sup>7)</sup>は、橋梁基礎に対してAE法を適用し損傷把握を試みている。このように、いずれの構造物においても損傷状態を精度良く把握することはきわめて重要であるが、床版に限ってはAE法が劣化評価に利用された報告は少ない。

AE法を用いて疲労劣化の進行を評価するには、必ずしもその全期間にわたり連続的な計測を行う必要はなく、一定周期ごとに短期間の計測を行えば、実用的には十分有効な評価を行うことができる。つまり、定期的に計測を実施すれば、劣化進行過程が経時的に評価できるため、実構造物においてAE法を離散時間間隔で適用することが実用的かつ経済的に有用であると報告されている<sup>8)</sup>。本研究においても全期間にわたる連続的な計測ではなく、ある損傷ごとに弾性波法を適用する場合を想定する。

#### 1.4 本論文の構成

本論文の構成は全6章からなる。

第1章において、序論として研究の背景、目的、及び既往の研究との関連を述べた。

第2章では、弾性波法とAE法について解説した後、同手法を土木構造物に適

用するための手順を示す。

第 3 章では、本研究の解析手法の基盤となる周波数応答関数の概念を解説した後、弾性波の距離減衰について解説する。

第 4 章では、超音波を用いて健全なコンクリート床版に弾性波を励起させ、弾性波の解析手法として第 3 章で述べた周波数応答関数を適用し、その結果から距離減衰の影響を検証した。

第 5 章では、第 4 章で行った実験を基に、劣化要素を含めた供試体に基礎実験を行うことで、周波数応答関数の解析手法に対する妥当性を検証した。

第 6 章では、本研究で得られた知見についてまとめる。最後に、本研究により明らかになった問題点と今後の展望について示す。

## 第 2 章 弾性波法

本章では、本研究に弾性波法を用いるにあたって、AE 法と弾性波法についてそれぞれどのように土木構造物、とりわけコンクリート構造物に適用されてきたのか既往の研究と、理論的な背景を概説する。

### 2.1 コンクリート中での弾性波の特性

#### 2.1.1 はじめに

金属材料では、数ミリ程度の寸法の亀裂が超音波で探査可能である。また、医療分野では、超音波エコーを用いることで、胎児の性別までもが判断可能になっている。しかしながら、同様の手法をコンクリートに適用しても、内部の空洞の形状すら十分に把握できない。つまり、コンクリートは、水、セメント、骨材および空隙からなる不均質な複合材料であり、モルタル部と粗骨材あるいは空隙との境界面など、音響インピーダンスの異なる物質どうしの境界（不連続）面が数多く存在するため、弾性波の減衰が著しい。したがって、コンクリートではより低周波数帯の弾性波を利用することとなり、波長が長く分解能が劣る結果を招いている。

#### 2.1.2 コンクリート中での弾性波の周波数帯域

各分野での非破壊検査で用いられている、弾性波の使用周波数帯域を図 2.1.1 に示す。土木分野で適用される周波数範囲は、一般に機械分野（数 10 kHz～10 MHz）や医療分野（10 MHz～1 GHz）と比較して低いことが確認できる。そのため、一般によく知られている弾性波を用いた機器を比較すると、コンクリートのための弾性波法は、使用している弾性波の周波数帯が数 kHz～数 100 kHz であり、金属や人体を対象とした診断装置と比較して極端に低い。

#### 2.1.3 コンクリート中の弾性波伝播挙動に影響を与える要因

コンクリートの各性質が、コンクリート中の弾性波伝播挙動に与える要因をまとめる。一般に弾性波伝播速度（縦波速度）は、式(2.1)のように定義され、材料の物性と密接な関係がある。

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.1)$$

ここで、 $V_p$ ：縦波の弾性波伝播速度(m/sec)、 $E$ ：ヤングの弾性係数(N/m<sup>2</sup>)、 $\rho$ ：質量密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $\nu$ ：ポアソン比である。この式から、弾性波伝播速度は、コンクリートの弾性係数および密度に依存することがわかる。すなわち、これらのコンクリートの力学特性値に影響を及ぼす要因が、弾性波伝播挙動に影響を及ぼす要因ともいえる。

表 2.1.1<sup>9)</sup>に弾性波伝播挙動に及ぼす影響要因を示す。表 2.1.1 から分かるように、弾性波伝播速度や周波数特性は配合や打設・養生というような多くの条件に依存し、さらには、環境や外力による経年劣化など様々な外的要因によっても影響を受ける。つまり、たとえ同じコンクリート構造物であっても、部位や位置に依存して力学特性は異なるため、弾性波伝播速度や周波数特性は当然異なるのである。

#### 2.1.4 弾性波法

一般に弾性波法は、超音波法、衝撃弾性波法、打音法、AE法などに分類することができる。その概念を図 2.1.2<sup>10)</sup>に示す。基本的な原理はいずれも同じであり、違いは弾性波の発信・受信方法だけである。各弾性波法の測定概要を図 2.1.3 に示す。本研究では超音波法とAE法を用いたため、超音波法とAE法について詳述する。

#### 2.2 超音波法

超音波とは、一般的に可聴域より高い周波数 20 kHz 以上の弾性波をいう。また超音波法とは、この超音波がもつ音響学的性質を利用して、到達時間、波形、周波数、位相などの変化を測定装置で読み取ることにより、材質内に存在する亀裂、空隙、はく離などの欠陥を検出し、その品質や状態を調べる非破壊検査法である。超音波法においては、シリコングリスなどの接触触媒を介して非測定物中に超音波を発信したり、非測定物中を伝播してきた波を受信したりするために探触子(超音波センサ)を使用する。

超音波法は圧電素子を利用して発生させた弾性波を用いているため、コンクリート中に入射されるエネルギーは衝撃弾性波法や打音法に比較して小さい。したがって、コンクリート中に超音波を有効に輸入した場合、伝播可能な距離は用いる周波数やコンクリートの劣化状況にもよるが、最大で 50 cm～1 m といわれている。

超音波法は、**図 2.2.1** に示す探触子の配置方法により、透過法（対称法）、斜め透過法（斜角法）、反射法、表面法に分類される。透過法は、コンクリート対向面に発信・受信用の 2 つの探触子を設置して測定するため、測定精度が最も高い。

## 2.3 AE 法（アコースティック・エミッション法）

### 2.3.1 既往の研究

AE とはアコースティック・エミッション（Acoustic Emission）の略であり、直訳すると「音響の放出」となる。つまり、構造物に関していえば、「物体が破壊したり変形したりすることによる音響の放出」ということである。

コンクリート構造物においては「ひび割れ」などの微小な破壊、あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって AE は発生する。この点が他の弾性波法と決定的に異なる部分であり、能動的に弾性波を発生させる必要がない。

実際に、コンクリートで AE を検出し、破壊機構を研究しようという試みが始められたのは 1950 年代である。1959 年に R ü sch<sup>11)</sup>、1960 年には L'Hermite<sup>12)</sup>、1965 年には Robinson<sup>13)</sup>らがコンクリートの破壊にともなう内部構造の変化と AE の発生特性の関係について報告している。日本でも横道ら<sup>14)</sup>が 1964 年に「コンクリートにひび割れが生じるときの弾性波」として研究成果を発表している。

### 2.3.2 AE 法の基本原理

材料中に生じた AE 波は原理的に、**図 2.3.1** に示すような計測装置で検出される。まず AE センサで電気信号に変換され、その後プリアンプやメインアンプと呼ばれる増幅器によって増幅され、帯域フィルタでろ過された後検出される。

検出波形は、地震波形と同様で縦波(P波)、横波(S波)、表面波、境界での反射波などが重なり合って非常に複雑な形をしている。さらに、これらの波形は計測機器の周波数特性にも大きく依存する。そのため、各計測機器に関する事項につ

いて詳しく以下に説明する。

### 2.3.3 AE 法における計測機器

#### (1) AE センサ

AE センサは図 2.3.2 に示すようにさまざまな種類・形状が存在するが、土木構造物に適用するにあたっていくつかの注意点を踏まえる必要がある。まず 1 つ目に、AE 信号が非常に微弱なため AE センサが高感度のものでなければならないことであり、もう 1 つは非常に広い周波数帯を対象としなければならない点である。

数 MHz までの高周波成分を検出できるセンサは主に PZT などの圧電材料を素子として使用している。金属では電気容量型のセンサや、レーザー光干渉型のセンサなども考案されているが、いずれも感度と応答特性に関する一般的機器が有するのと同様な問題が存在する。それは、感度のよいセンサは一般にセンサの共振周波数を利用しているため、周波数領域の応答は平坦ではなく、共振点付近の成分を中心に検出することになる。一方、周波数応答が平坦に考案されている広帯域型センサは感度が非常に悪いことから実務では用いられず、室内実験での小規模試験体や市販のセンサの較正などに限り用いられている。

#### (2) 増幅器とフィルタ

増幅器やフィルタと呼ばれるものは音響機器でよく見られるものであり、電気信号に変換された音をひずみなく処理するための仕様は、AE でも同じように必要となる。増幅器は、小さなエネルギーの現象に対して飽和しないように増幅可能な振幅域を大きくとり、雑音を低くし、微小な AE も感度よく検出できるように S/N 比（増幅信号の振幅に対する雑音レベルの比）も大きくとる必要がある。

また、センサにより変換された電気信号が、回路の影響によってひずみが生じないためには、入力インピーダンスの大きなプリアンプで受け、その後メインアンプで増幅することが必要になる。

フィルタの目的は、本質的には雑音の除去である。最近では機器の性能の向上により雑音の問題といえ、多くは載荷装置等から発生する機械的雑音であり、数 kHz 以下の振動雑音が主のため、低周波数を遮断する適当なハイパスフィルタが用いられている。

#### 2.3.4 AE 波形データに関する各パラメータ

AE 計測により得られた AE 波形から様々な特性パラメータについて分析することができる。図 2.3.2 に示すのが AE 波形の一例である。

##### (a) AE 発生頻度

AE は微小な破壊に対応して発生する弾性波であることから、その破壊過程を検討する上で AE の発生頻度に着目することは非常に有益であり、これまでも主破壊の予知を目的として、最も古くから用いられているパラメータの一つである。

AE の計数については、図 2.3.2 に示す AE 波形に対して、しきい値電圧を設定する。最初にしきい値を超える振幅があると 1 パルスをカウンタへ送信し、その後信号が減衰するのに必要な不感時間を設ける。この方法はパルス方式と呼ばれ、その波形信号の個数を計測する方法が使用されている。

##### (b) AE 最大振幅

AE の最大振幅とは図 3.3.2 に示すように波形の尖頭値を示す。これは、AE 発生源での破壊の規模と関係しているパラメータと考えられており、破壊の規模に応じて大小の振幅値が得られる。ただし、波動伝播中の減衰の影響を考慮する必要があり、例えば岩質材料では、金属材料に比べ減衰の影響が大きいため、伝播距離により振幅は大きく減少する。その結果、AE 発生位置が不明な場合には検出点近くの微小な現象とある程度離れた点での大きな現象が同じ程度の振幅値の AE として得られることもあることに注意すべきである。

##### (c) AE 実効値電圧 (RMS 電圧)

AE 波形の実効値とは、図 2.3.2 に示す AE 波形を関数形として  $x(t)$  と仮定すれば、以下のように与えられる

$$RMS\text{値} = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} x^2(t) dt} \quad (2.2)$$

ここで  $T_d$  は継続時間である。一般には AE エネルギーと呼ばれており、波形の持

つエネルギーの相対的な値を示している。

#### (d) RA 値と平均周波数

RA 値と平均周波数の関係は、(社)日本建材産業協会規格「アコースティック・エミッション法によるコンクリートのひび割れ試験方法」JCMS-B5706 で示されているパラメータであり、図 2.3.2 の AE 波形より、到達時刻から最大振幅までの経過時間を「立ち上がり時間(Rise time)」として、これを最大振幅で除すことで求められる。この RA 値(立ち上がり時間/最大振幅)と平均周波数(リングダウンカウント数/継続時間)を用いた、ひび割れの識別方法が提案されており、RILEM(国際材料構造試験研究機関連合)の基準にも採用されている。

#### 2.3.5 AE 法における破壊源探査

AEは地震の震源探査と同様の手法を援用することでその発生位置である破壊源を決定することができる。金属分野では圧力容器などでの板材を対象にした二次元の探査手法の実用化がすでに行われている<sup>15)</sup>。室内試験においては、岩石実験において、茂木<sup>16)</sup>、Scholz<sup>17)</sup>、Byerlee<sup>18)</sup>、らの研究が、コンクリートに関しては大津ら<sup>19)</sup>の研究で適用された例がある。以下については、AEの発生位置の探査手法について概説する。

AE波が弾性波動としてAEセンサに最初に到達するのはP波である縦波であり、その後S波である横波、表面波の順に伝播する。しかし、外部に面している境界からの反射やセンサの共振などがあるので、破壊源探査として有用な情報は初動であるP波のみということになる。

ここで、P波の伝播速度を $v_p$ として、配置されたAEセンサの三次元座標を考える。そして、三次元に配置されたセンサを $C_0$ を原点とし、 $C_1, C_2, \dots, C_N$ でのP波の到達時刻とセンサ $C_0$ への到達時刻 $t_0$ との時間差を $t_1, t_2, \dots, t_N$ とする。このとき、AE発生源の座標を $S(x, y, z)$ 、センサ $C_i$ の座標を $(a_i, b_i, c_i)$ とすると、座標原点に位置するセンサ $C_0$ とセンサ $C_i$ へのAE波動のP波到達時間差 $t_i$ と距離 $R_i$ に関して、次のような式が得られる。

$$R_i = \sqrt{(x-a_i)^2 + (y-b_i)^2 + (z-c_i)^2} \quad (2.7)$$

$$R_0 = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$R_i - R_0 = v_p t_i \quad (i=1,2,\dots,N)$$

式(2.7)の破壊源の解は  $N$  個の双曲面の交点として得られる。しかし、これらの式は非線形連立法的式であるため、これらを平方し、 $i$  番目と  $j$  番目の方程式で差をとることで以下のような線形連立方程式を導く。

$$\begin{aligned} A_{ij}x + B_{ij}y + C_{ij}z + D_{ij}v_p^2 &= E_{ij} \\ A_{ij} &= 2(a_i T_j - a_j t_i) \\ B_{ij} &= 2(b_i t_j - b_j t_i) \\ C_{ij} &= 2(c_i t_j - c_j t_i) \\ D_{ij} &= t_i t_j (t_i - t_j) \\ E_{ij} &= t_j (a_i^2 + b_i^2 + c_i^2) - t_i (a_j^2 + b_j^2 + c_j^2) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$(i, j = 1, 2, \dots, N)$$

このとき、 $t_i (i=1, 2, \dots, N)$  がいずれも 0 でなければ、式(2.8)は一次独立で解が  $N-1$  個存在する。AE センサの数は、センサ  $C_0$  に加え  $N+1$  個なので、未知数である  $x, y, z$  の決定を行うには  $N-1=3$  となる必要があり、5 チャンネルの計測システムが必要となる。

## 第 3 章 周波数応答関数

### 3.1 計測系の周波数応答

AE 波（弾性波）のスペクトル分析を行って、その特徴を検討する場合には、得られたスペクトルが発生源での周波数成分のみを表しているのではないことに注意しなければならない。つまり、計測して得られた周波数分布は、発生源から検出され記録されるまでにいくつかの変化を受けている。フーリエ解析の概念に従って、その大略は図 3.1.1 のように示すことができる。つまり、周波数を  $f$  として、検出された AE 波形のフーリエ変換を  $X(f)$ 、発生源のそれを  $S(f)$  とすると、

$$X(f) = U(f)T(f)D(f)S(f) \quad (3.1)$$

のように、各要因の影響は周波数領域での積になると考えられる。ここで、 $D(f)$  は伝播する際の系の応答フーリエ変換であり、 $T(f)$  と  $U(f)$  はそれぞれ AE センサとその後の計測系（増幅器、フィルタなど）の応答フーリエ変換を表している。仮に  $D(f)$ 、 $T(f)$ 、 $U(f)$  の影響が大きいのであれば、検出された AE 波形のスペクトル  $X(f)$  は発生源でのスペクトル  $S(f)$  とは無関係になる可能性がある。

現在までの計測装置の開発によって、計測系の応答  $U(f)$  は平坦であり、よほどのことがない限り  $X(f)$  には影響のないことが知られており、以下この  $U(f)$  については無視することにする。

### 3.2 材料内の伝播

既往の研究により、コンクリート中では、劣化の進行に従って伝播した弾性波の高周波成分が減衰していくことが確認できている<sup>20)</sup>。そこで、この挙動特性から直接的に劣化を評価することも試みられている。しかし、劣化の進行とは別に弾性波の伝播距離の長さによっても高周波成分は減衰する。これはコンクリートの不均質性に依るものであり、コンクリートが健全であっても、高周波は散乱しやすく長い距離を伝播できない。そのため、周波数の挙動特性について解析する際には、高周波成分の減衰が劣化の進行に依るものなのか距離に依るものなのか判断できず、一概に高周波減衰を直接的に劣化程度に対応させることは容易ではない。

材料が完全弾性体であれば、系内での反射・屈折により弾性波の周波数成分は変化しないが、非弾性体であれば、材料を構成する結晶粒の境界（結晶粒界）で反射や屈折をすることにより散乱減衰が生じる。弾性波が伝播する際の、減衰の主要因はこの散乱減衰と考えられている。

エネルギー  $E$  を持つ波動が一波長の距離を進む間に失うエネルギーを  $\Delta E$  とすると、材料の距離減衰特性を表す  $Q$  値は、式(3.2)のように定義できる。

$$Q = 2\pi \frac{E}{\Delta E} \quad (3.2)$$

$Q$  値は、距離減衰の小さな材料ほど大きくなる量で、金属材料では 1000 以上となるのが普通で、完全弾性体であれば、 $\Delta E = 0$  なので無限大となる。同一の材料であっても弾性波の波のモード（P 波、S 波、表面波など）によって  $Q$  値は異なる。

ここで、材料内の AE 波の伝播過程における周波数応答関数  $D(f)$  が距離減衰によるものと考えると、 $D(f)$  は  $Q$  値を用いて式(3.3)のように表現できる<sup>11)</sup>。

$$D(f) = \exp\left(-\frac{\pi f}{V_p Q} d\right) \quad (3.3)$$

ここで、 $f$  は周波数 (Hz)、 $V_p$  は弾性波速度 (m/s)、 $d$  は伝播距離 (m) である。ある実験により、健全なコンクリートでは平均的に  $Q \cong 12$  と求められており<sup>12)</sup>、 $V_p = 4000 \text{ m/s}$  とすると、たとえば伝播距離 10 cm における 100 kHz の周波数成分の周波数応答は  $e^{-0.65}$  で、1/2 程度の減衰であるといえる。また、伝播距離が 1 m で 1 MHz の周波数成分ならば、周波数応答は  $e^{-65}$  で約  $5 \times 10^{-29}$  の減衰にも及ぶ。つまり、コンクリートのような減衰が大きな材料では、AE 発生源で高周波成分が含まれていても伝播中に急速に減衰することがわかる。

### 3.3 周波数応答関数の劣化評価への適用

本研究で着目した解析手法としては、材料の距離減衰の問題を考慮可能な周波数応答関数である。

図 3.3.1 に示すように、1 つの発信源から様々な経路を通りセンサの個数だけ波形が検出できる。それぞれの経路について、式(3.1)の通りに計測系の周波数応答の関係を示すと、

$$\begin{aligned} X_1(f) &= T_1(f)D_1(f)S(f) \\ X_2(f) &= T_2(f)D_2(f)S(f) \\ &\vdots \\ X_n(f) &= T_n(f)D_n(f)S(f) \end{aligned} \quad (3.4)$$

のように示される。

ここで、1 つの関係式から内部情報を持つ  $D(f)$  を求めようとしても、AE 波においては発信源の情報がなく  $S(f)$  が未知であるため、 $D(f)$  の特性を求めることはできない。そこで、2 つの応答関係を利用し、式(3.5)のように両辺をそれぞれ除することで  $D(f)$  の特性を評価する。

$$\frac{X_i(f)}{X_1(f)} = \frac{T_i(f)}{T_1(f)} \cdot \frac{D_i(f)}{D_1(f)} \quad (i = 2, \dots, n) \quad (3.5)$$

ここで分母に用いる計測系は AE 源から 1 番近い経路を通して検出されたものに固定する。式(3.5)では、図 3.3.1 に合わせて AE 源に最も近いセンサをセンサ 1 とする。また、 $\frac{T_i(f)}{T_1(f)}$  は同じセンサを用いればほぼ 1 になり影響がないと仮定する。

このような処理を行うことで、発信源の情報がなくても材料内の特性を表す  $D(f)$  の評価ができると考えた。

また、式(3.5)を変形させると式(3.6)になる。

$$X_i(f) = T_i(f) \cdot \frac{D_i(f)}{D_1(f)} \cdot \frac{X_1(f)}{T_1(f)} \quad (i = 2, \dots, n) \quad (3.6)$$

ここで、図 3.3.2 のように、 $i$  番目のセンサで検出された波は、1 番目のセンサ

で検出された波からセンサ特性を除いた波、つまり  $\frac{X_i(f)}{T_1(f)}$  という波が距離  $d_1$  を通過した点で擬似的に発生したと考えられる。

さらに式(3.3)を用いて、 $V_p$ 、 $Q$ が一定であれば式(3.5)は次のように表現できる。

$$\frac{X_i(f)}{X_1(f)} \cong \frac{D_i(f)}{D_1(f)} = \exp\left(-\frac{\pi f}{V_p Q} \Delta d_i\right) \quad (3.7)$$
$$\Delta d = d_i - d_1 \quad (i = 2, \dots, n)$$

つまり、式(3.3)の仮定が成り立つとき  $i$  番目のセンサで検出された波形のフーリエ変換を 1 番目のそれで除したものは、その伝播距離の差  $\Delta d$  に依存するといえる。この「伝播距離の差」に着目し、以下解析を進めていく。

## 第 4 章 周波数応答関数の健全コンクリート供試体への適用性

### 4.1 目的

第 3 章で説明した周波数応答関数の理論が実際のコンクリートに適用できるか確認する必要がある。そこで、まず超音波法を用いて健全とみなしたコンクリート供試体の様々な点から能動的に弾性波を発信させる実験を行い、距離差ごとに周波数応答を求め、先に述べた理論値と比較し検討する。

### 4.2 概要

#### a) 試験体と測定箇所

図 4.2.1 に実験に用いたコンクリート供試体を示す。寸法は 500 mm×500 mm×100 mm である。発信点と受信センサの配置を図 4.2.2 に示す。発信点は供試体表面の 2 つの対角線上に 10×2 の点で発信し、受信センサは供試体裏面に 4 つ配置した (ch1 : 発信点 1 の裏、ch2 : 発信点 11 の裏、ch3 : 発信点 20 の裏、ch4 : 発信点 10 の裏)。

#### b) 発信装置と発信センサ

発信装置には、エネルギーが大きく、単一の周波数の超音波を発生させることのできる PUNDIT (CNS Electronics 製) を使用し、発信センサには型式 1045S の広帯域型センサ (富士セラミックス社製) を使用した。PUNDIT と 1045S をそれぞれ図 4.2.3 と図 4.2.4 に示す。送信波の条件として、どの発信点においてもエネルギーと周波数を一定にして発信した。

#### c) 受信センサと計測システム

図 4.2.5 に実験で使用した富士セラミックス社製の 60 kHz 共振型の受信センサとプリアンプを示す。プリアンプには日本フィジカルアコースティック社製のものを使用し、センサで得られた弾性波信号を 40 dB 増幅した。増幅された信号は、図 4.2.6 に示す 16 チャンネル AE 計測処理装置 (SAMOS、PAC 社製) に収録した。

#### d) 波形データ

本実験では、サンプリング周波数を 1 MHz とし、波形の記録時間を 1024  $\mu\text{sec}$  とした。また、波形収録時におけるしきい値は 35 dB に設定した。

### 4.3 結果と考察

#### 4.3.1 検出波形と周波数分布

本実験によって得られた ch1～ch4 における検出波形と、そのフーリエ変換によって得られる周波数分布について考察する。一例として、**図 4.3.1** に発信点 1 の ch1～ch4 における検出波形と周波数分布、および発信点からセンサまでの距離を示す。発信点 1 は ch1 の真上であり、ch1 までの距離が極端に近いため、波の振幅や到着時間の違いが顕著に現れている。また、周波数分布をみると 3.2 節で概説したように、距離による高周波減衰が著しいことが明確に現れている。

次に、ch2 と ch3 に着目する。対角線を挟んで対称に位置する ch2 と ch3 は発信点からの距離が等しい。この 2 つのセンサで検出した波形と周波数分布を比較する。**図 4.3.1** から ch2 と ch3 の波形と周波数分布を取り出したものを **図 4.3.2** に示す。同図の波形を見ると、時間初期においては波の位相が一致しているのに対し、時間経過にともない位相がずれていく様子が見られる。これは、センサが供試体壁面の近くに配置されているために、時間経過にともなってセンサが様々な反射波を検出してしまうことが原因であると考えられる。また、周波数分布を比較すると、伝播距離が等しいにも関わらず周波数分布に差異が見られる。これはコンクリート材料の不均質性によるものと考えられ、伝播距離が等しくても伝播経路や媒質が一様でなければ、当然取得波形が異なるわけである。この不均質性による影響の程度について次項 4.3.2 で記述する。

#### 4.3.2 距離差ゼロの周波数応答（同距離比較）

式(3.7)によれば、同距離にある 2 つのセンサの検出波形の周波数応答は、距離差ゼロのため 1 になる。しかし、前項で述べたように、金属のような均質材料と違ってコンクリートのような不均質材料では、伝播距離が等しくても波線が異なれば、材料の不均質性に起因して、得られる波形および周波数分布は変化する。そのため、周波数応答は 1 にはならないと予想される。そこでコンクリートの不均質性が周波数応答に与える影響について検討する。

同距離比較するにあたって、対角線上にある発信点 1～10 では ch2 と ch3 への距離が等しいことを利用する。

まず、一例として発信点 1 における ch2 と ch3 の周波数応答に着目し、**図 4.3.3** に示す。青線が ch2 で得られた波形のパワースペクトルを ch3 のそれで割ったものを示し、4 区間（約 3.9 kHz 間）の移動平均を取って平滑化したものを黄線で示す。ここで周波数応答を表す縦軸には対数目盛を用いているが、その理由として以下の点が挙げられる。

- ・周波数応答は式(3.7)のように指数関数に依存した形で表されるため、対数グラフ上では直線になるというメリットがある。
- ・同距離比較する際、2 つのパワースペクトルの内どちらを分母としても、両者の値は同じ価値を持たなければならない、つまり周波数応答は 10 と 0.1（あるいは 2 と 0.5 など）が同じ意味合いを持たなければならない。

これらの理由のため、以下、周波数応答は対数目盛上にプロットする。また、対数目盛を用いるため、移動平均は相加（算術）平均ではなく相乗（幾何）平均によって算出した。以下に相加平均  $\mu$  と相乗平均  $\mu_G$  を示す。

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \\ \mu_G &= \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdots x_n}\end{aligned}\tag{4.1}$$

ここで  $x_i$  が全て正のとき、式(4.1)を変形させると式(4.2)が得られる。

$$\begin{aligned}n \cdot \mu &= \sum_{i=1}^n x_i \\ n \cdot \log \mu_G &= \sum_{i=1}^n \log x_i\end{aligned}\tag{4.2}$$

式(4.2)により、相乗平均  $\mu_G$  は対数軸上で相加平均と見なせることが確認できる。

発信点 1 と同様の処理を発信点 2～10 についても行い、ch2/ch3 の周波数応答を

求め、それらをまとめたものを図 4.3.4 に示す。また、対角線 2 (発信点 11~20) における ch1/ch4 の周波数応答の結果を図 4.3.5 に示す。ここで、黒線が 10 点の平均を示しており、黄線が平均  $\mu$  と標準偏差  $\sigma$  の和と差を示している。平均値を見ると、周波数応答は最小で 0.4 程度の値を取っており、理論値 1 に対して約 2.5 倍のばらつきが見られるといえる。平均値を取ったこの黒線は、2 つの受信センサの影響、つまり式(3.5)における  $\frac{T_i(f)}{T_1(f)}$  の影響によるものと考えられる。また、波

線の違い (発信点の違い) によるばらつきの大きさは黄線で表され、これが材料の不均質性による影響と考えられる。また、標準偏差  $\sigma$  の最大値は 0.347 であった。つまり、複数の距離差ゼロ (同距離) の周波数応答を考えると、この程度のばらつきであれば、その影響はコンクリートの材料物性の不均質性によるものと考えられる。つまり、供試体は健全と同程度の状態と評価できるものとする。一方で、この範囲を大きく逸脱する周波数応答を示せば、損傷の有無を疑うこととなる。

### 4.3.3 距離差のある周波数応答

次に、伝達距離に差がある 2 つの波の周波数応答を検討する。様々な距離差が存在するが、図 4.3.6、表 4.3.1 に示すように 4 つの距離差 (0.201 m, 0.332 m, 0.451 m, 0.544 m) について検討することにする。1 つの距離差について 4 種類の周波数応答が得られるので、それらの平均値を代表値とした。解析結果を図 4.3.7~4.3.10 に示し、さらにそれらをまとめたものを図 4.3.11 に示す。図 4.3.7~4.3.10 には、4 種類の周波数応答 (移動平均) とそれらの平均値の他に、式(3.7)による理論式を載せた。いずれの距離差の周波数応答においてもばらつきが見られるが、このばらつきは前述したコンクリートの不均質性によるものと考えられる。図 4.3.11 により、各距離差における周波数応答のまとめを見ると、約 60 kHz~180 kHz において線形性をもち、その傾きが距離差の増加に従って順に大きくなっていくことが明確に読み取れる。

続いて、式(3.7)による理論式の妥当性について検討する。弾性波速度は別測定により約 3,400 m/sec と測定されており、Q 値については 3.2 節で述べたように 12 を利用して、さらにそれぞれの距離差を代入すると周波数応答関数が求められる。また、約 60 kHz~180 kHz において線形性が確認できるため、図 4.3.7~4.3.10 に

60 kHz～180 kHzにおける指数近似曲線を示す。対数軸上であるので、指数近似曲線が直線で表されている。この近似曲線と理論式について、傾きを比較すると、距離差 0.201 m では両者の傾きに大きな差は見られないが（図 4.3.7 参照）、距離差が大きくなるに従って両者の傾きの差が広がっていくことが確認できる（図 4.3.8～4.3.10 参照）。ここで、伝達関数の傾きと距離差の関係を図 4.3.12 に示す。同図より、伝達関数の傾きが距離差に比例していることが示される。ここで得られた傾きから式(3.7)に基づいて Q 値を求めると 18.57 と算出された。Q 値はコンクリートの材質、また波のモードによって大きく変化するため、この供試体の平均的な Q 値が 18.57 だったと推察できる。この結果により、コンクリート供試体の劣化度合いが均一であるという条件下であれば、高周波帯における周波数応答関数は距離差と周波数に依存した指数関数になることが得られた。

#### 4.4 まとめ

本実験によって得られた結果を周波数応答関数という観点から考察し、以下にまとめる。

コンクリート材料中の弾性波は、2.1 節で概説したように様々な要因から影響を受けるため、伝達距離が等しい 2 つの波の周波数応答関数は理論値通り 1 にはならない。本実験で得られた距離差ゼロの周波数応答関数により、そのばらつきの程度が検証され、ばらつきがその範囲内であれば供試体は健全である可能性があるが、逆にこの範囲から大きく逸脱していれば損傷を疑う必要がある。

健全なコンクリート供試体において、距離差  $\Delta d$  の周波数応答関数はある周波数帯（本実験では 60 kHz～200 kHz 程度）において対数軸上で線形性を示し、その傾きが距離差  $\Delta d$  に比例することが明確に示された。つまり、周波数応答関数を評価する場合、距離減衰の理論式に従って検討してよいことが示された。

## 第 5 章 モルタル供試体を用いた多重反射実験

### 5.1 目的

第 4 章における実験では、健全と見なしたコンクリート供試体を用いてその周波数応答特性を確認した。しかし、劣化評価を行うためには劣化度の異なる供試体に対して同様に周波数応答特性を評価し、劣化の進行に従って健全時の周波数応答がどのような挙動を示すかを調べなければならない。そこで、モルタルを母材とした円柱供試体を作成し、劣化を再現するために疑似欠陥としてスチロール材を混入させ、その混入率の違いによる周波数応答の変化を検討する。

### 5.2 概要

#### a) 供試体

標準モルタルに疑似損傷として内部空隙を 3 種類（空隙なし、10 %、20 %）変化させた円柱型（直径 50 mm、高さ 100 mm）のモルタル供試体を作成した。内部空隙はスチロール材（直径 6 mm）を用いて再現した。図 5.2.1 にモルタル供試体を示す。以下、健全供試体を N、内部空隙 10 %、20 %の供試体をそれぞれ V10、V20 と呼ぶことにする。

#### b) 発信方法

発信方法として、図 5.2.2 に示すペンシルブレイク（鉛筆圧折）と、図 5.2.3 に示すパルサー（PAC 社製）による超音波発信の 2 種類の方法で弾性波を励起させた。ここで用いたパルサーは図 5.2.4 に示すようなパルス波を発信するため、高周波まで比較的平坦な特性の波を発信できる。また、パルサーを用いる際の発信センサは、送信波の平坦特性を保ったまま発信できるように、図 4.4.4 に示した型式 1045S の広帯域型センサ（富士セラミックス社製）を用いた。

#### c) 受信センサと計測システム

受信センサは各供試体ともに、上述した型式 1045S の広帯域型センサを使用した。その他の計測システムは第 4 章で行った実験と同様である。

#### d) 波形データ

本実験では、サンプリング周波数を 1 MHz とし、波形の記録時間を 1024  $\mu\text{sec}$  とした。また、波形収録時におけるしきい値は 38 dB に設定した。超音波は各供試体に対して 5 回以上発信し、少なくとも 5 つの波形データを収録した。

#### e) 実験の特徴

この実験では、**図 5.2.5** に示すイメージのように、鉛直方向に伝播する波の多重反射を利用する。つまり、反射波を繰り返し計測できるので、供試体の長さは 100 mm と一定であるが、伝播距離が 300 mm、500 mm の波も続いて計測できる。

また、この実験では各供試体でセンサは変えないので、発信側と受信側の条件は変わらず、伝播距離の異なる波（第 1 波と反射して得られる第 2 波）の伝播空間は同じであるというメリットがある。つまり、供試体を変更した場合でも、式 (3.1) における  $U(f)$ ,  $T(f)$ ,  $S(f)$  は変更されず、それぞれの供試体における伝播空間も変わらないため、理想化された条件下での実験であるといえる。

逆に、デメリットとして、供試体の寸法が小さく 3 次元的な波の拡散がないという点が挙げられる。

### 5.3 結果と考察

#### 5.3.1 検出波形と周波数分布

まずは、多重反射の影響を考慮せずに、ペンシルブレイクとパルサーによる超音波発信によって検出された波形とその周波数分布について、疑似空隙の混入による変化とともに考察する。

##### a) ペンシルブレイク

供試体 N、V10、V20 の 3 種について、ペンシルブレイクによって検出された波形とその周波数分布を **図 5.3.1** に示す。波形をみると、その概形は疑似損傷の混入率の差異に対してあまり変化せず、振幅が若干減少するだけということが読み取れる。周波数分布をみるとペンシルブレイクにより得られる波は約 16 kHz の周波数が卓越している。疑似損傷の混入率、すなわち劣化の進行による高周波減衰傾向を見るために **図 5.3.1** の周波数分布を拡大したものを **図 5.3.2** に示す。同

図より、劣化の進行による高周波の減衰が視覚的に確認できる。

#### b) パルサー

同様に、パルサーの超音波発信によって検出された波形とその周波数分布を図 5.3.3 に示す。検出波形を見ると、N から V10 に移る時点で振幅が大きく減衰し、V10 と V20 では顕著な差異が見られなかった。つまり、疑似損傷 10% の時点で劣化が大きく進行していることを示している。周波数分布をみると、N では高周波成分が大きく減衰することなく伝達できているのに対し、V10 では高周波が大きく減衰する結果となった。V10 と V20 を比較すると 250~300 kHz 付近で V20 に減衰が見られる。この減衰率の大きさと比べて、0~100 kHz 付近のスペクトルの大きさはほぼ変化していない。この理由の 1 つとして、モルタル供試体内のスティロール材の大きさの影響が挙げられる。この実験で用いたスティロール材の直径が 6 mm なので、この大きさに対応した弾性波の波長が著しく減衰した可能性も考えられる。

#### 5.3.2 反射波の解析

検出された波形から、第 1 波、第 2 波、第 3 波に相当する部分を抜きだして、それぞれの波について解析する。ペンシルブレイクとパルサーの 2 種類の発信方法で弾性波を発生させたが、多重反射の解析はパルサーにおいてのみ行う。その理由として以下の 2 点を挙げる。

- ・ペンシルブレイクによって得られる波の周波数分布は、一般的な AE 計測で得られる波形の周波数分布と比較して特異的で、もとより高周波成分が小さいという点。
- ・パルサーによる検出波形の高周波減衰の方がペンシルブレイクのそれより顕著であるという点。

反射波ごとに解析するにあたり、まず弾性波がモルタル供試体を 1 往復するのにかかる時間を計算する必要がある。供試体の一端から弾性波を発信してからその対面で到達するまでの時間を読み取り、到達時間を求めたところ、その平均値が 23.63  $\mu\text{sec}$  であった。よって、1 往復するのにかかる時間は 47.26  $\mu\text{sec}$  となり、

弾性波速度は 4223 m/sec と測定され、一般的にモルタルにおける速度と大きな差異がない結果が得られた。また、解析にあたり反射波ごとの信号継続時間 (Duration) は 100  $\mu$ sec とした。検出波形と第 1 波から第 3 波の波形の関係を **図 5.3.4** に示す。Duration を 100  $\mu$ sec とすると第 1 波に第 2 波の波の成分を含むため問題が生じると思われるが、Duration が 50  $\mu$ sec と 100  $\mu$ sec の第 1 波同士を比較すると卓越する周波数分布に大きな差異はなく、一方で 100  $\mu$ sec とした方がデータ量は多いため、精度がよくなるという結果が得られた (**図 5.3.5** 参照)。よって Duration を 100  $\mu$ sec としてよいものとして解析を進めた。

供試体 N、V10、V20 のそれぞれの第 1 波から第 3 波の周波数分布を **図 5.3.6** に示す。**図 5.3.6** の供試体 N における、第 2 波を表す赤線に着目すると、第 1 波に対して高周波が大きく減衰しており、伝播距離 0.3 m の波の予測される周波数分布と差異がないと思われる。一方、第 3 波である緑線に着目すると、伝播距離が 0.5 m であるのかかわらず、周波数分布を見ると高周波が卓越している波形であり、これを第 3 波と捉えるのは問題があると考えられる。コンクリート中を伝播する弾性波は距離に伴う粘性減衰の影響を受ける。本実験においても、実際の第 3 波は伝達距離が長く、大きく減衰していると考えられる。一方で、第 3 波を受信する時刻において、側面からの反射波なども同時に検出されており、第 3 波がそれらの波に埋もれてしまっていると考えられる。

次に、それぞれの供試体について、距離差 0.00 m、0.20 m、0.40 m の 3 種類の周波数応答関数を求めた。ここで、距離差 0.00 m の周波数応答関数とは、供試体に励起した波からサンプリングした 5 つの波における第 1 波同士を比較したものである。また、距離差 0.20 m、0.40 m の周波数応答関数は、**図 5.3.4** のように、1 つの検出波形から得られた第 1 波と第 2 波、第 1 波と第 3 波を比較したものである。それぞれの周波数応答関数の平均値を **図 5.3.7** に示す。どの供試体においても、同距離で比較した場合には周波数応答関数は 1 に漸近する結果となった。つまり、第 4 章でコンクリートの不均質性による影響について述べたが、比較する波の波線と受信センサが等しければ周波数応答は 1 になることが示された。また、距離差 0.20 m の周波数応答関数については、高周波帯 (150~300 kHz) における傾きに注目する。それぞれの供試体において、150~300 kHz の周波数応答を指数関数で近似したグラフを **図 5.3.8** に示す。同図において、3 つの傾きに注目すると、疑似損傷の増加に従って傾きが小さくなっていく結果が得られた。これは、健全

な供試体であれば第 1 波と第 2 波には高周波成分に大きな差があるが、劣化の進行に従って第 1 波の高周波成分も減衰していき、この差がなくなっていくからである（図 5.3.6 の赤線と青線の関係参照）。また、N~V10 の間に比べて V10~V20 の間の傾きの変化が小さかった。V10 の時点で劣化が進行しており、また、V10 と V20 には検出された波形に大きな差異は見られず、両者の劣化度にも大きな差がないと考えると、この傾きの値を利用して劣化度を表せると考えられる。また、今後初期損傷を評価するにあたっては、健全供試体 N と内部空隙 10 % である供試体 V10 の間の結果が必要である。追加実験として疑似損傷与える際には、内部空隙を 1 %、3 %、5 %、10 % のように 0 から 10 % の間を細分して与える必要がある。第 4 章の結果により、劣化度が一定ならば、周波数応答関数の傾きは距離差  $\Delta d$  に依存した関数である。ここに劣化度  $D$  が導入されて、この傾きは距離差  $\Delta d$  と劣化度  $D$  の関数である。この関数モデルを決定できれば、劣化度  $D$  が不明な供試体でも、既知データである距離差  $\Delta d$  と周波数応答関数の傾きから劣化度が評価できると考えられる。また、近似式の誤差を表す  $R^2$  値を比較すると、疑似損傷の増加に従って小さくなってしまい精度が落ちてしまうが、これは 4.3.2 節で述べたように、劣化の進行に従って理論値との誤差が大きくなることに起因していると思われる。

### 5.3.3 AE 法への適用性

これまでの実験では弾性波の発生方法として超音波を用いて解析を進めてきたが、それは周波数応答関数の理論が適用できるか検討する際に、発信点から受信点までの距離が正確に判明している必要があったからである。これまでの結果により周波数応答関数の適用性が確認できたため、発信波が未知である AE 法にも同手法を適用すれば本実験と同様の傾向が得られると考えられる。AE 計測では、3次元の位置標定を行い、AE 源から最も近いセンサで計測した波を分母にして解析することにより、一つの AE 源に対して、位置標定に使われたセンサの個数から 1 引いた数の距離差を持った周波数応答関数が得られる。ただし、周波数応答関数を用いる際には、距離が重要な要素になるため精度の高い位置標定が求められることに注意しなければならない。

## 5.4 まとめ

本実験で得られた結果と考察をまとめる。劣化度が同じ場合の周波数応答特性に着目すると、高周波帯において負の傾きをもち、距離差が大きくなるに従って傾きが大きくなっていく傾向が得られた。また、この傾きは距離差一定の場合、劣化の進行に従って小さくなっていく。この傾きは距離差  $\Delta d$  と劣化度  $D$  の関数であると考え、この関数モデルを定めることができれば、劣化度  $D$  が不明な供試体において、既知データである距離差  $\Delta d$  と計測して得られる周波数応答関数の傾きから劣化度が評価できると考えられる。本実験では、同じ供試体における反射波について検討したために解析結果の妥当性に欠け、周波数応答の傾きの関数モデルを求めるまでには至らなかった。よって、今後追加実験が必要であり、その一例として、床版に対して輪荷重走行試験により繰り返し荷重を与えていく実験を挙げる。そして、超音波法を用いて劣化ごとの周波数応答特性を検証し、データベースの構築を図ることで、劣化度を定量的に評価できると考えられる。

また、距離と劣化度に対する周波数応答特性が確認できたため、発信源の波の特性が不明であり、その波の大きさもばらばらである AE 法にも同手法を適用すれば材料の劣化評価ができると考えられる。

## 第 6 章 結論

### 6.1 まとめ

本研究によって周波数応答関数のコンクリート材料への適用性が示され、周波数応答関数の傾きが距離差と劣化度に依存していることから、コンクリート材料を定量的に劣化評価できる可能性が示された。以下に第 4 章、第 5 章での実験結果から得られた本研究の成果を列挙する。

- 1) コンクリート材料中の弾性波は、材料の配合や打設・養生方法、さらに外的要因など様々な要因から影響を受ける。そのため、同一の発生源から発信された伝播距離の等しい 2 つの波でも伝播空間が異なれば周波数分布は異なり、周波数応答は理論値通り 1 にはならない。そこで、健全なコンクリートにおける距離差ゼロの周波数応答のばらつきを確認することで、材料の不均質性による影響の範囲が確認された。よって、同距離の周波数応答がこの範囲内であれば健全と同程度の状態にあり、逆にこの範囲から大きく逸脱していれば材料に損傷を含む可能性があるという 1 つの劣化指標が示された。(第 4 章参照)
- 2) 健全なコンクリート供試体において、距離差  $\Delta d$  の周波数応答関数は特定の高周波帯において対数軸上で線形性を示し、その傾きが距離差  $\Delta d$  に比例することが明確に示され、弾性波の距離減衰による高周波減衰が確認できた。(第 4 章参照)
- 3) 周波数応答関数の傾きは距離差  $\Delta d$  と劣化度  $D$  の関数であると考え、今後この関数モデルを決定することで、劣化度  $D$  が不明な供試体において、既知データである距離差  $\Delta d$  と計測して得られる周波数応答関数の傾きから劣化度が定量的に評価できると考えられる。(第 5 章参照)
- 4) 周波数応答関数の適用性が確認できたため、発信波が未知である AE 法においても、3次元位置標定を行い AE 源からセンサまでの距離情報を知ることができれば、同手法を適用し同様に材料の劣化を定量的に評価できるといえる。

(第 5 章参照)

## 6.2 今後の課題と展望

今後さらに検討すべき課題を以下に列挙し、今後の研究に繋げるものとする。

- 1) 本研究で行ったモルタルの多重反射実験では、伝播距離の異なる反射波を利用したが、この反射波の周波数分布の妥当性に問題あったため、今後追加実験を行う必要がある。その実験例として、比較的大きな床版に繰り返し荷重を与え損傷を与えて実験を行い、各損傷段階において超音波法を用いて様々な周波数応答を測定できれば、本研究で行った実験と比較して精度の高い結果が得られると考えられる。
- 2) さらに、そのような追加実験より得られた損傷ごとの周波数応答特性を検証し、データベースの構築を図りながら、その傾きを劣化度と距離差の関数で表現する必要がある。この関数を表現することによって定量的な劣化評価が可能になると考えられる。
- 3) モルタルを用いた実験では内部空隙 10 %の供試体の時点で減衰が大きかったために、目的としていた初期損傷の評価はできなかった。今後の実験で損傷を与える際には、内部空隙を 1 %、3 %、5 %、10 %のように細分して与えるようにし、初期損傷を詳しく把握できるよう損傷の与え方に注意が必要である。
- 4) 本実験では、前提として受信センサ同士の感度誤差  $\frac{T_i(f)}{T_1(f)}$  を 1 としたが、用いるセンサによっては一部の周波数帯において 1 にならないため、本研究のように周波数応答関数を用いて劣化評価する際には、事前にセンサの感度分析を行う必要がある。

## 参考文献

1. 原田吉信：橋梁の高齢化に向けたアセットマネジメント，建設の施工企画 679号，pp. 6，2006. 9.
2. 吉田英一，佐藤京，三田村浩，松井繁之：橋梁維持管理システムに用いる RC床版劣化予測に関する一検討，第 6 回道路橋床版シンポジウム論文報告集，2008.
3. 阿部 允：実践土木のアセットマネジメント，日経BP社，pp. 20-25，2006.
4. 林田宏，田口史雄，嶋田久俊，蓮井昭則：非破壊試験によるコンクリート及び構造物の健全度評価手法について，北海道開発土木研究所月報，No. 633，2006. 2.
5. T.Shiotani, D.G.Aggelis：Wave Propagation in Cementitious Material Containing Artificial Distributed Damage, Materials and Structures 42, pp. 377-384, 2009.
6. 濱田秀則，福手勤，阿部正美，堂園昭人：劣化した港湾コンクリート構造物の非破壊検査法としての AE 計測の適用性に関する基礎的研究，港湾技研資料，No.0872，1997. 6.
7. 中西康博，塩谷智基，羅休，羽矢洋，稲葉智明：AE 法による橋梁基礎の損傷調査，既設構造物の耐震補強に関するシンポジウム論文集，pp. 31-38，2002. 11.
8. 湯山茂徳，李正旺，吉沢勝，魚本健人：AE 法による鉄筋コンクリート床版の疲労劣化評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20，No. 1，1998.
9. 土木学会：弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，pp.8，2006.8
10. 土木学会：弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関する委員会報告およびシンポジウム論文集，pp.17，2006.8
11. V. H. R üsch: Physikalische Fragen der Betonprüfung, Zement-Kalk-Gips, pp. 131-145, 1959.
12. R. G. L'Hermite: Volume Changes of Concrete, Proc. 4th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Washington D.C., pp. 659-694. 1960.
13. G. S. Robinson: Method of Detecting the Formation and Propagation of Microcracks in Concrete, Proc. Int. Conf. on the Structure of Concrete, London, pp. 131-145, 1965.

14. 横道英雄, 池田郁雄, 松岡健一: コンクリートにひびわれが生ずるときの弾性波の伝達現象について, セメント・コンクリート, 212, pp. 2-6, 1964.
15. 日本非破壊検査協会規格: 高張力鋼を用いた球形タンクのアコースティック・エミッション試験方法と試験結果の等級分類方法, NDIS2412-80, 1980.
16. K. Mogi: Source Locations of Elastic Shocks in the Fracturing Process in Rocks(1), Bull. Earthq. Res. Ins., Vol.46, pp. 1103-1125, 1968.
17. C. H. Scholz: Experimental Study of the Fracturing Process in Brittle Rock, J. Geophys. Res., Vol.73, No.4, pp. 1447-1453, 1968.
18. J. D. Byerlee and D. Lockner: Acoustic Emission during Fluid Injection into Rock, Acoustic Emission, eds. H.R. Hardy, Jr. and F.W. Leighton, Trans. Tech. Publication, pp. 87-98, 1977.
19. 丹羽義次, 小林昭一, 大津政康: アコースティック・エミッションによる破壊源探査, 土木学会論文報告集, 第276号, pp. 135-147, 1978.
20. 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 1988.
21. 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 1988.

## 謝辞

最後になりましたが、本論文を作成する上で、お世話になった方々に感謝の意を表します。

まず、研究生生活の場所を提供していただくと共に、ご多忙の中においても熱心に指導していただいた京都大学・大津宏康教授に心から感謝いたします。研究を進める中で、自分では気付かかった切り口から考察の問題点を指摘していただき、的確なご助言の手をさしのべていただきました。厚くお礼申し上げます。

京都大学・塩谷智基准教授には、本研究の実験・解析・論文の作成など多岐にわたってご指導していただきました。先生の度重なる指導と激励のおかげで本論文を書き上げることができました。深く感謝いたします。

京都大学・乾徹准教授には、本研究の副査を務めていただき、審査では的確な指示をいただきました。深く感謝いたします。

京都大学・稲積真哉助教授には、研究面だけでなく生活面において非常にお世話になりました。また、秘書の伊東宏美さんには主に生活面のサポートしていただき、快適な研究生生活を過ごすことができ、充実した大学生活を送ることができました。心から感謝いたします。

徳島大学・渡辺健准教授には、ご多忙の中、本研究に用いた実験の供試体を作製していただきました。また、12月のAETCでは普段馴染みのない様々な興味深いお話を聞かせていただきましたことを心より感謝しています。

飛島建設株式会社の桃木昌平様には、本研究の実験の機会を与えていただいた他に、様々な計測法や計測器機の取り扱いなど教えていただき、現場でしか知ることのできない技術的な面の知識をつけることができました。本当に感謝しております。

また、大津研究室の先輩方、ならびに同回生の方々のおかげで有意義な研究生生活を過ごすことができました。先輩方には様々なアドバイスをしていただき、特に後藤さんと岩本さんには、同じ系列の研究をしている先輩として、研究に行き詰まった時いつもの的確な助言をしていただきました。また同回生の方々とはともに助け合い、刺激し合いながら研究に取り組むことができたと思います。本当にありがとうございました。

最後に、本論文を書き上げることができたのも、本研究だけに留まらず、大学で勉強できるという環境を与えてくださった両親をはじめとする家族のおかげであります。心から感謝の意を表します。

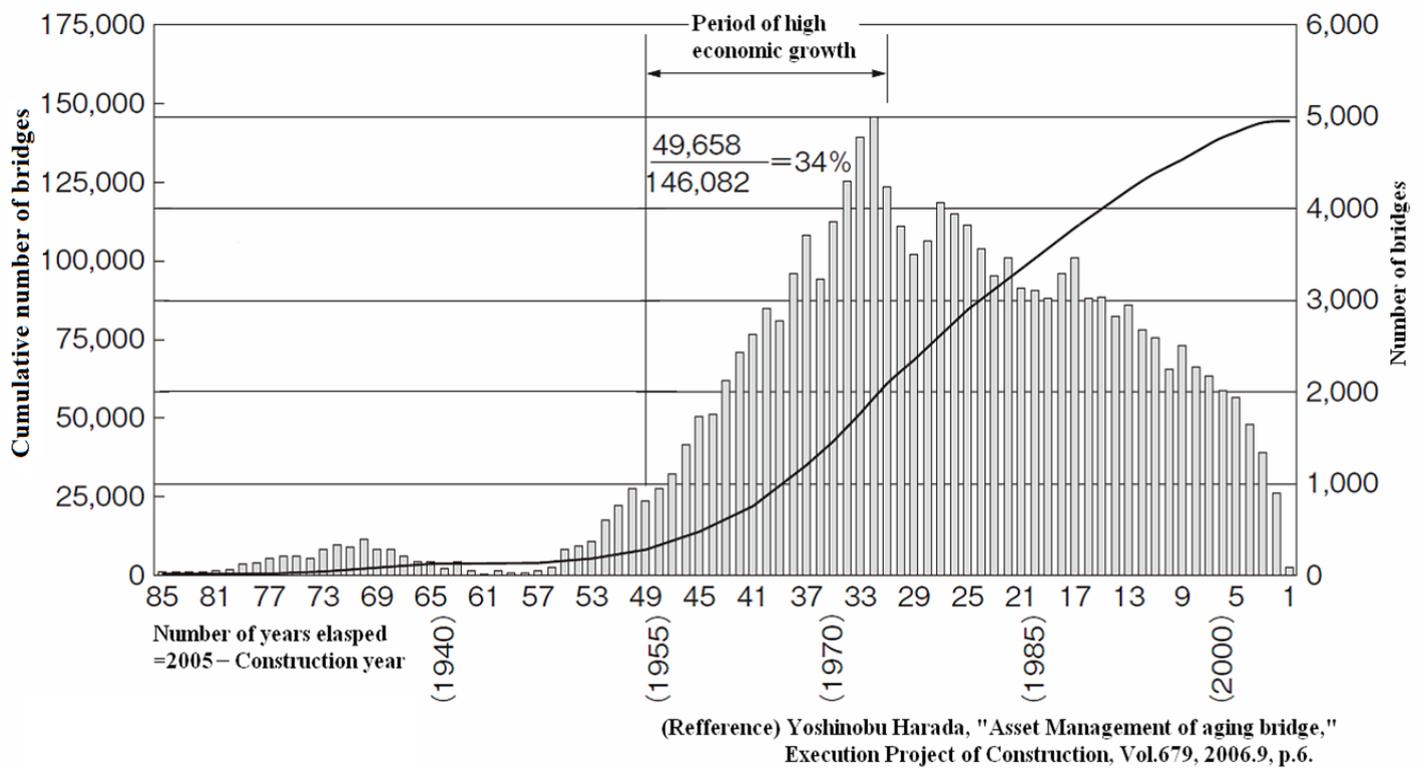


図1.1.1 日本の橋梁の累計と供用年数

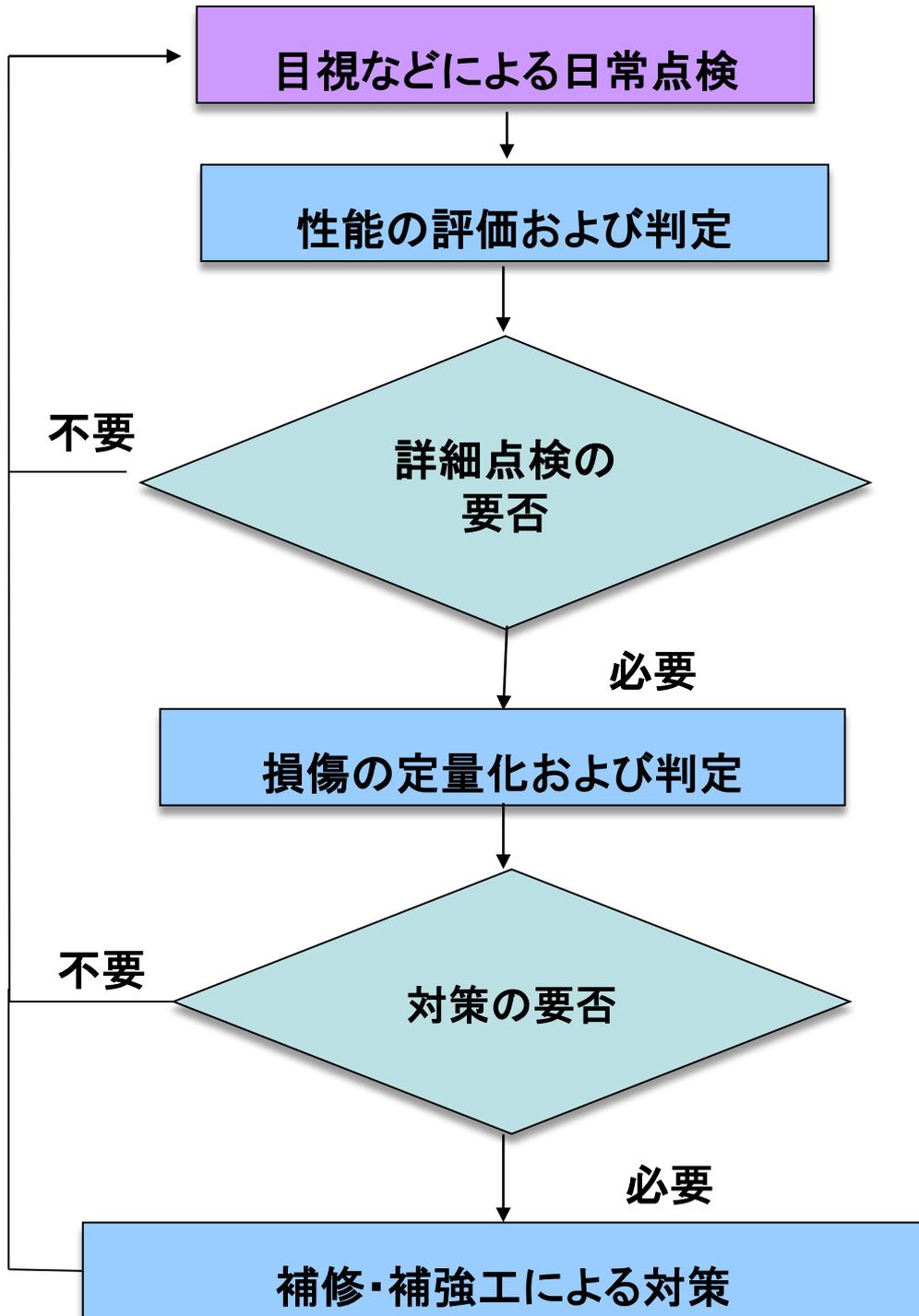


図1.1.2 道路床版の維持管理に関するフロー

表1.2.1 ひび割れ法における平均的な劣化度の判定基準

ひび割れ特性	劣化ランク				
	0	I	II	III	IV
平均ひび割れ間隔(I)	$I \geq 1\text{m}$	$I = 0.6 \sim 1\text{m}$	$I = 0.4 \sim 0.6\text{m}$	$I = 0.2 \sim 0.4\text{m}$	$I \leq 0.2\text{m}$
ひび割れ密度(D)	$D \leq 1\text{m/m}^2$	$D = \sim 3\text{m/m}^2$	$D = 3 \sim 5\text{m/m}^2$	$D = 5 \sim 7\text{m/m}^2$	$D \geq 7\text{m/m}^2$
ひび割れパターン	一方向	一または二方向	二方向	格子状	格子状
表面状態	良好	良好	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水漏れ</li> <li>・ 遊離石灰浸出</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水漏れ</li> <li>・ 遊離石灰浸出</li> <li>・ 亀甲状ひび割れ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水漏れ</li> <li>・ 遊離石灰浸出</li> <li>・ 亀甲状ひび割れ</li> <li>・ 欠落ち</li> <li>・ 舗装の陥没</li> </ul>

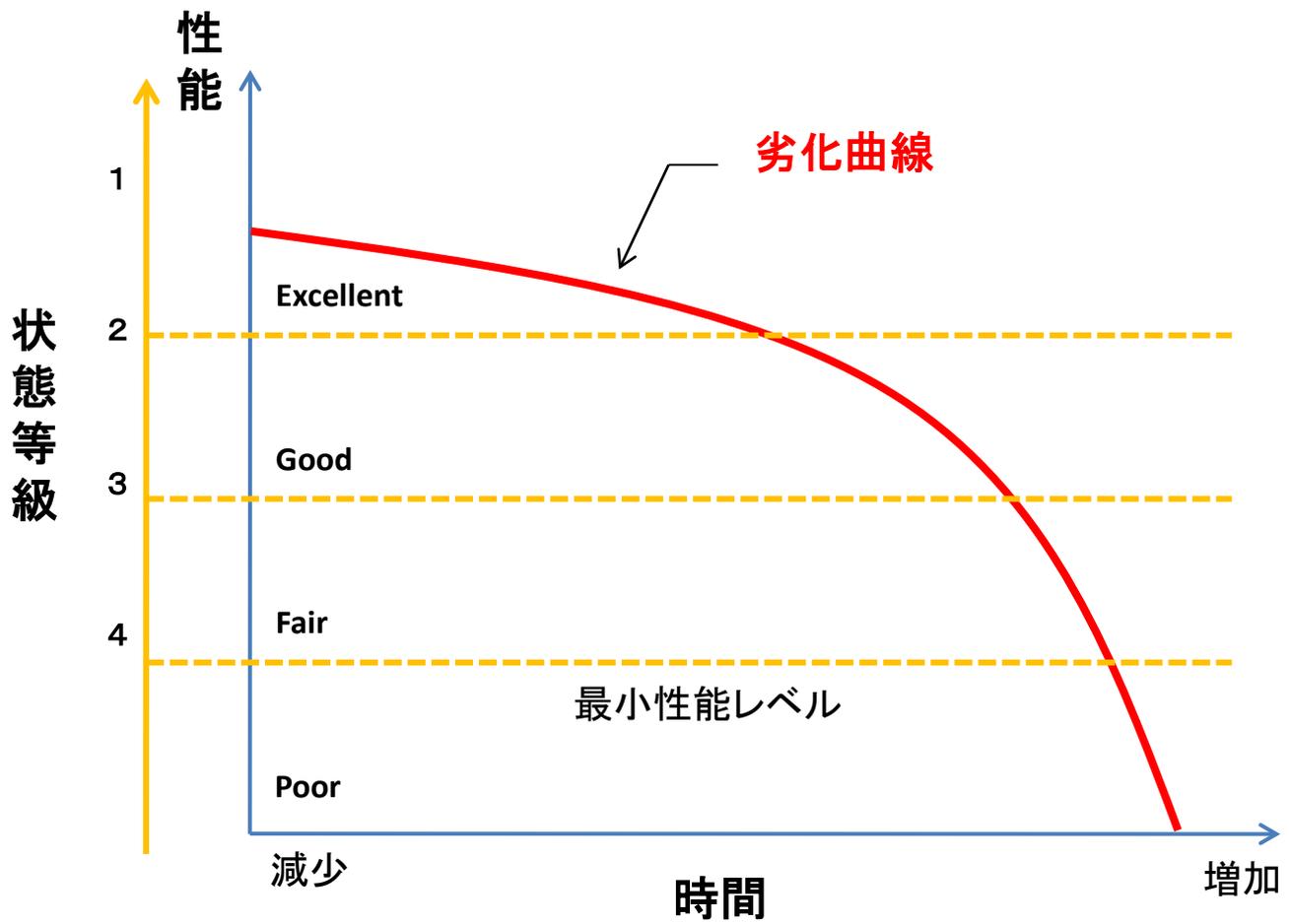


図1.2.1 状態等級に基づく資産の性能評価

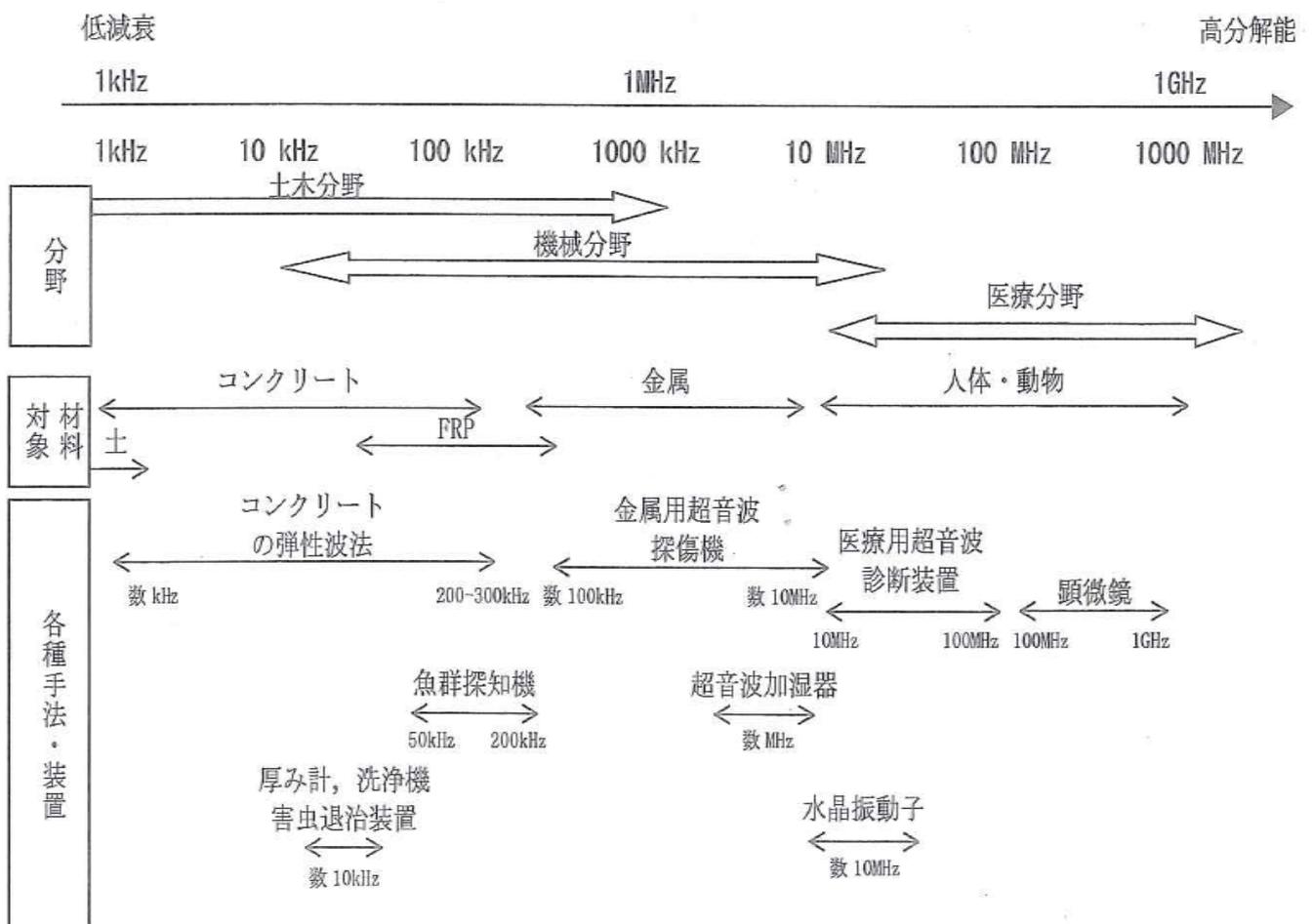


図2.1.1 各分野で利用されている弾性波の使用周波数帯域

表2.1.1 弾性波伝播挙動に及ぼす影響要因

項目	影響要因	弾性波伝播速度 <sup>注)</sup>	周波数特性 <sup>注)</sup>
配合	水セメント比 (増加)	減少する	○
	単位水量 (増加)	減少する	○
	粗骨材最大寸法 (増加)	減少する	△
	粗骨材種類	影響あり	影響あり
	骨材量 (増加)	増加する	○
	空気量 (増加)	減少する	○
打設・養生	養生方法 <sup>注)</sup>	影響あり	影響あり
	材齢 (増加)	増加する	○
	含水状態 (増加)	増加する	△
	空隙 (増加)	減少する	○
変状・劣化	種々の劣化要因による微細ひび割れ	減少する	○
	外力によるひび割れ	△	○
その他	鉄筋・繊維混入, 局所化, 異方性, 外力の存在	影響あり	影響あり

<sup>注)</sup> ○：より減衰しやすい, △：あまり影響がない

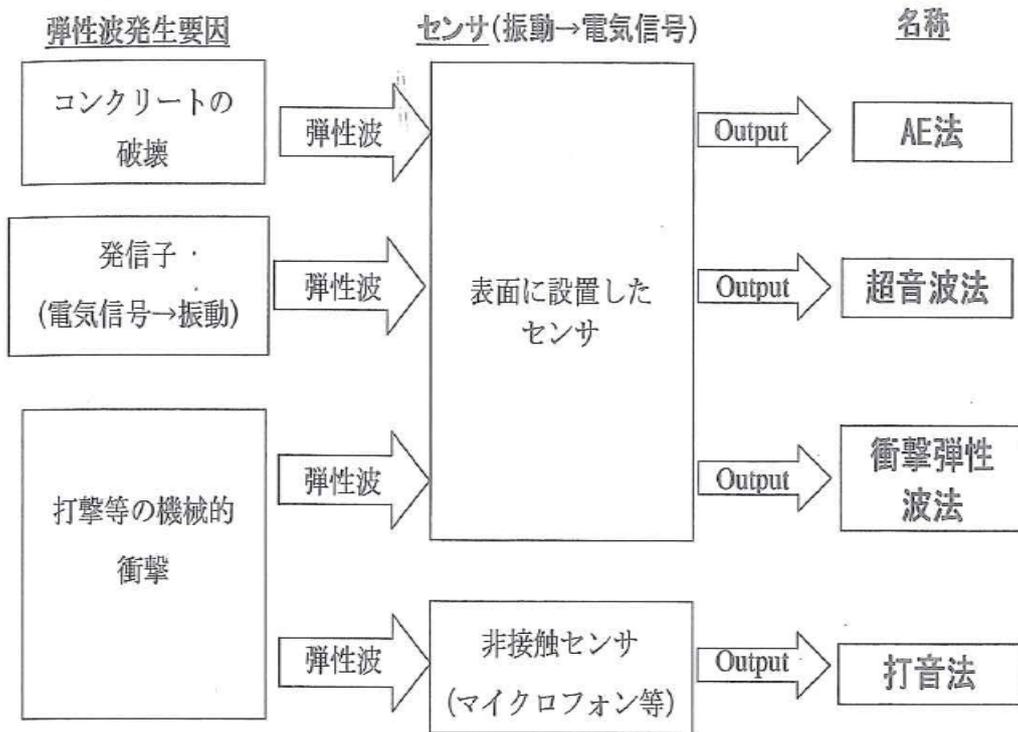


図2.1.2 弾性波法の分類

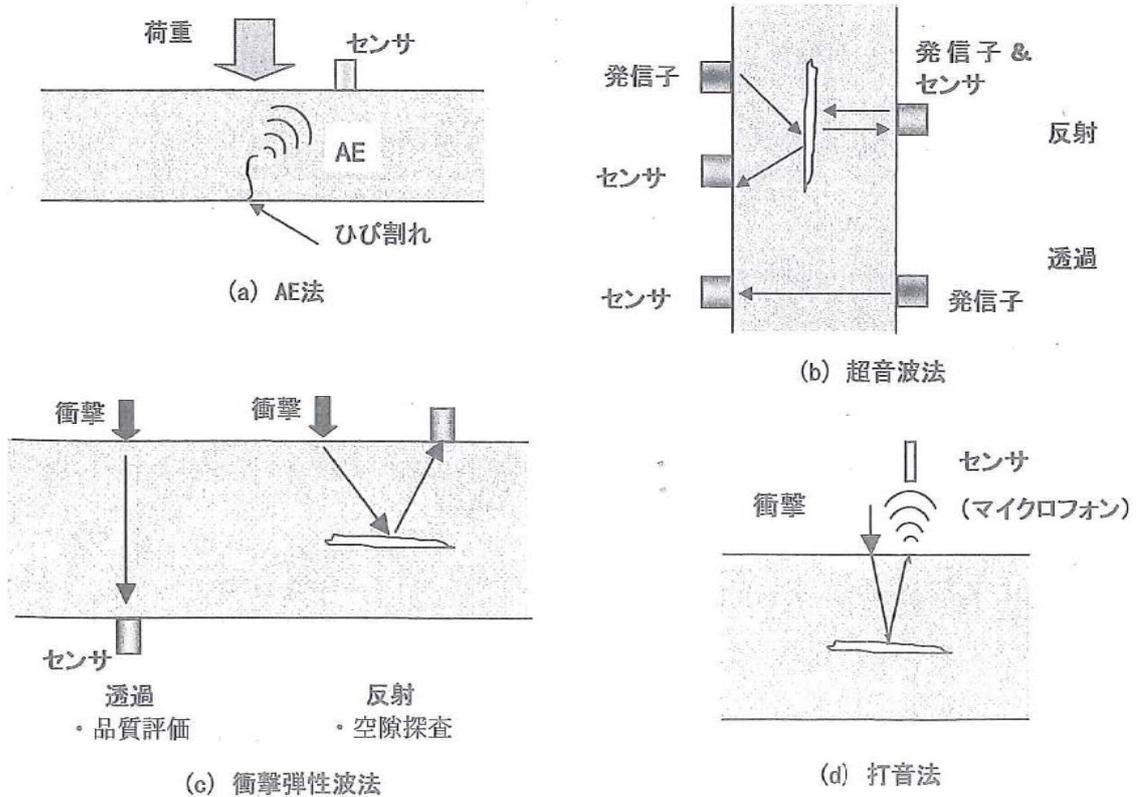


図2.1.3 各弾性波法の測定概要

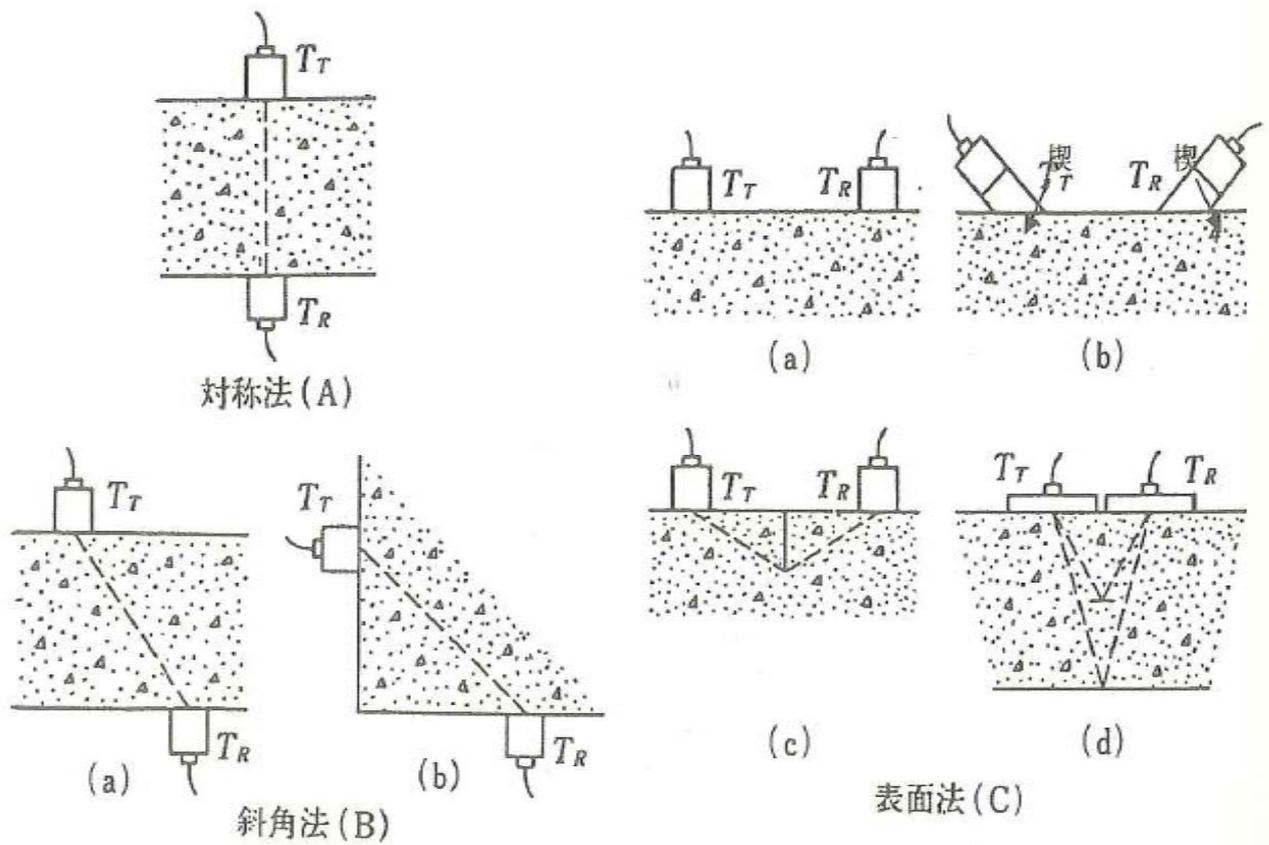
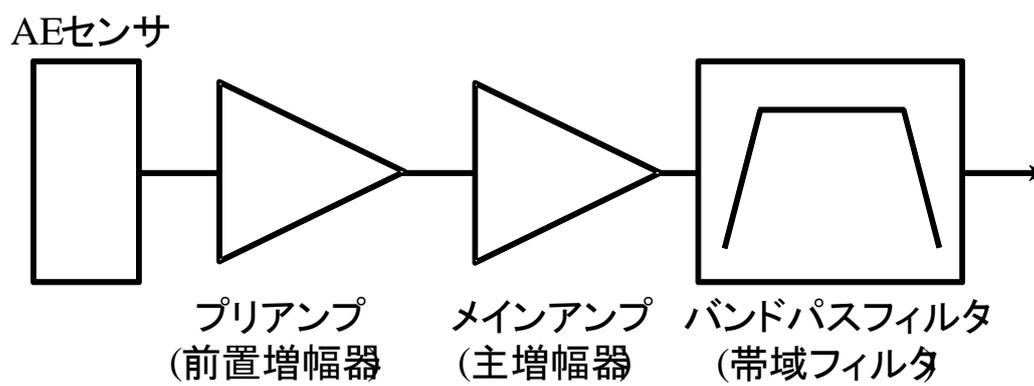


図2.2.1 探触子(発振子・受振子)の配置



**図2.3.1 基本的なAE計測装置**



**図2.3.2 各種AEセンサ**

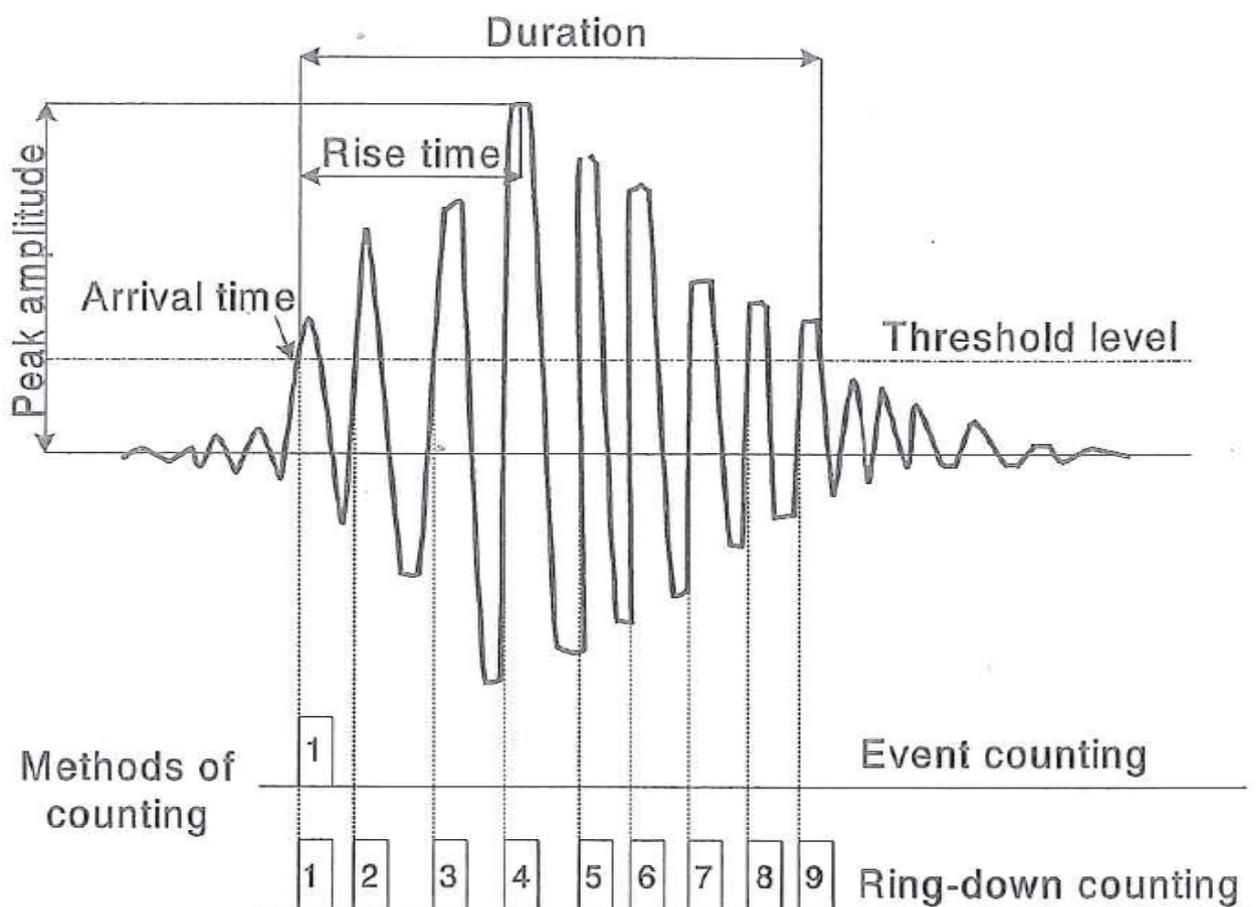


図2.3.2 AE波形とAE特性パラメータ

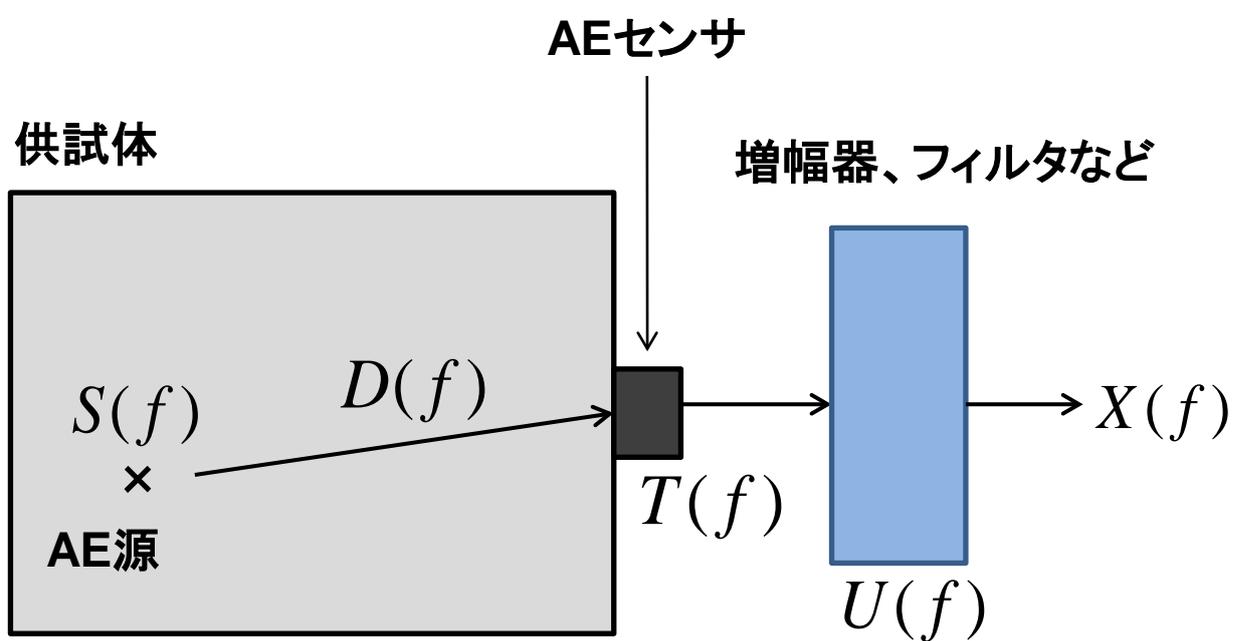


図3.1.1 AE波形の検出経路

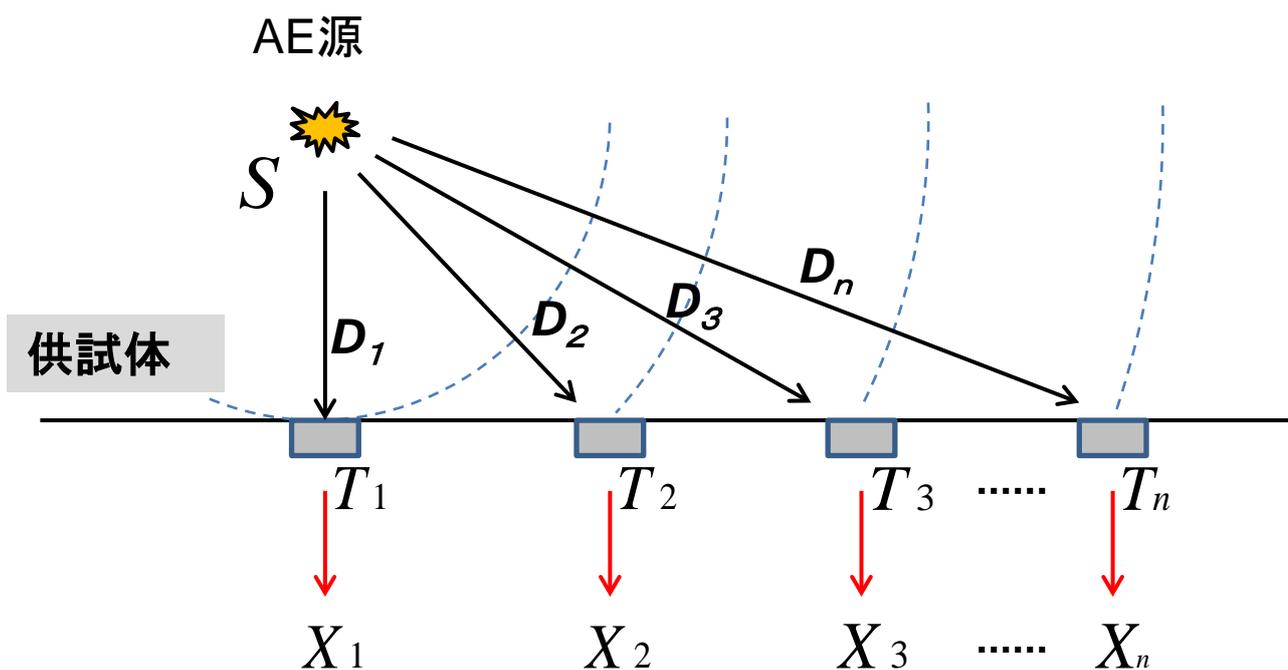


図3.3.1 AE源と各センサの検出波形の模式図

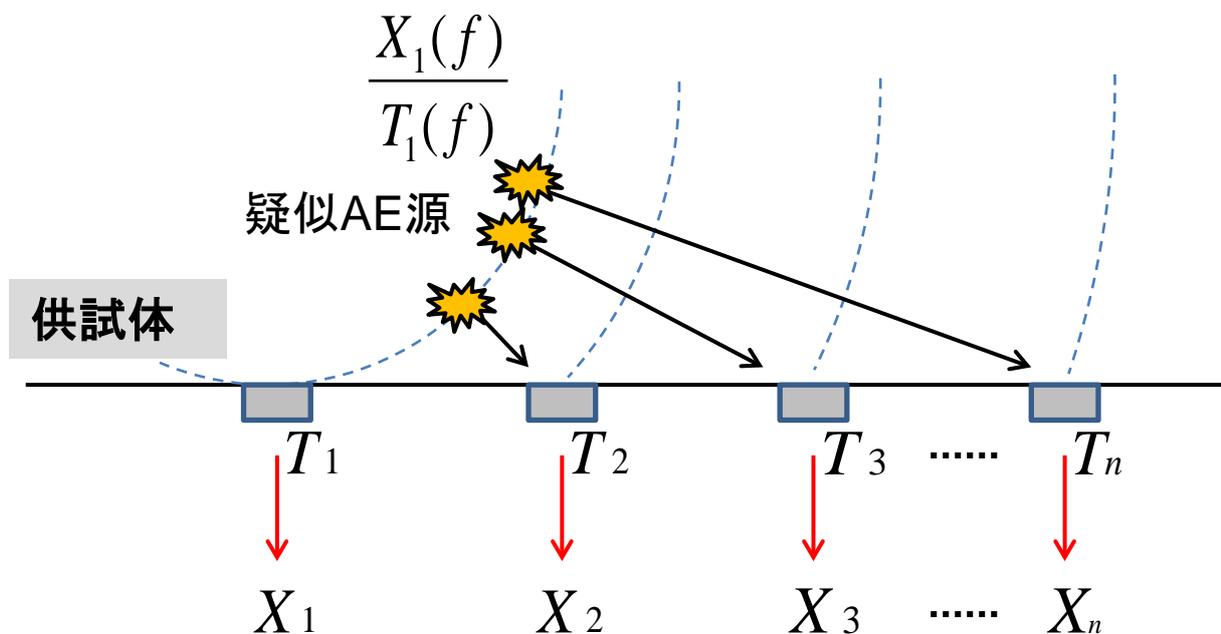


図3.3.2 疑似AE源と各センサの検出波形の模式図

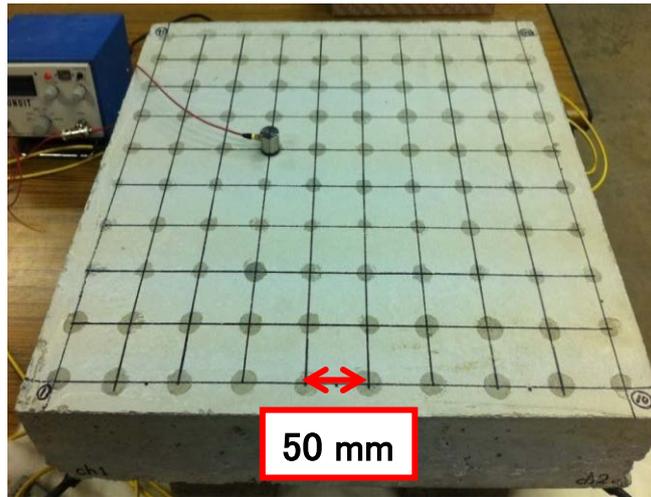
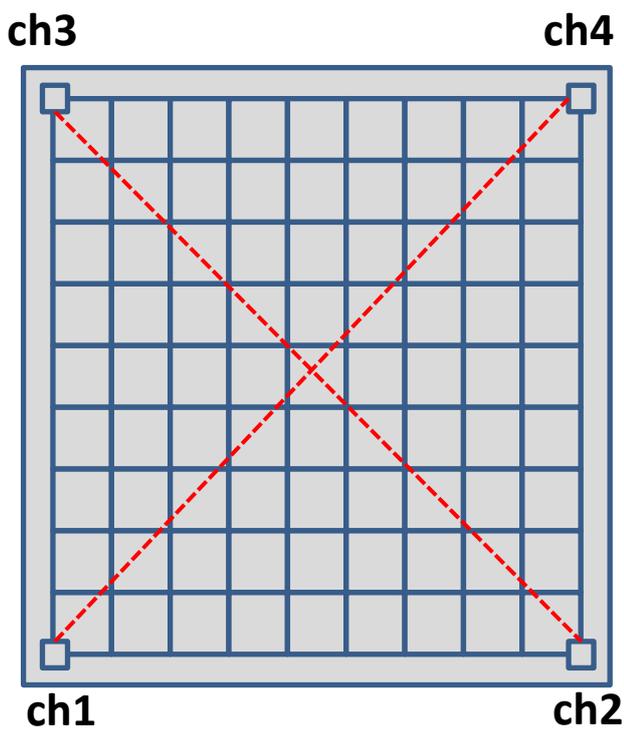
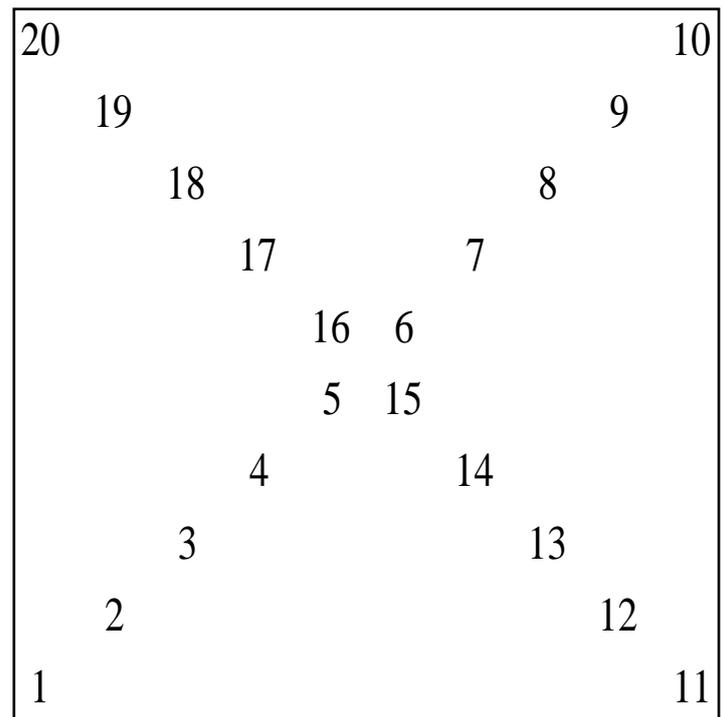


図4.2.1 コンクリート床版



センサ配置



発信点番号

図4.2.2 発信点番号と受信センサの配置



図4.2.3 PUNDIT (CNS Electronics製)



図4.2.4 1045S(広帯域型センサ、富士セラミックス社製)



図4.2.5 60 kHz共振型センサ(富士セラミックス社製)と  
プリアンプ(PAC社製)

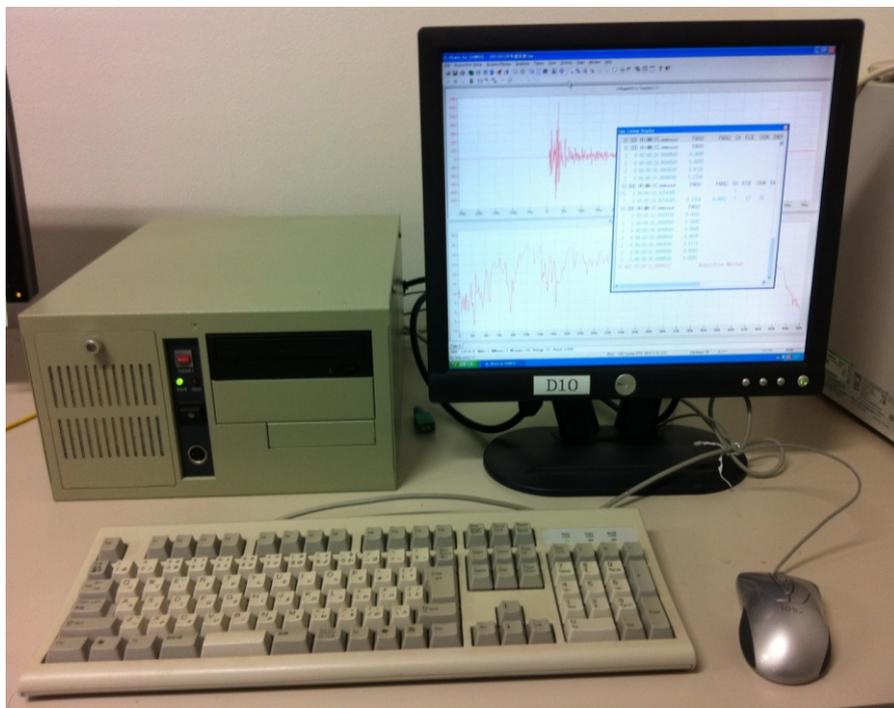
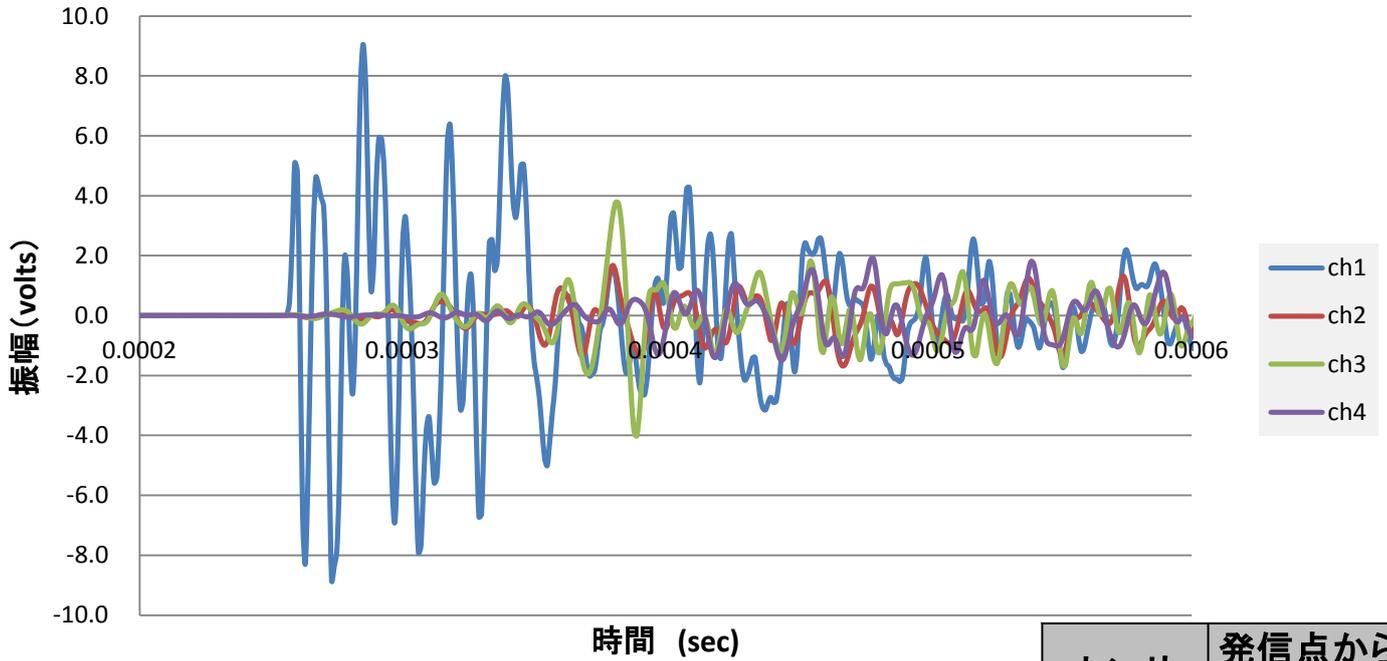


図4.2.6 AE計測処理システム(SAMOS,PAC社製)

### 波形 発信点1



センサ	発信点からの距離(m)
ch1	0.10
ch2	0.46
ch3	0.46
ch4	0.64

### 周波数分布 発信点1

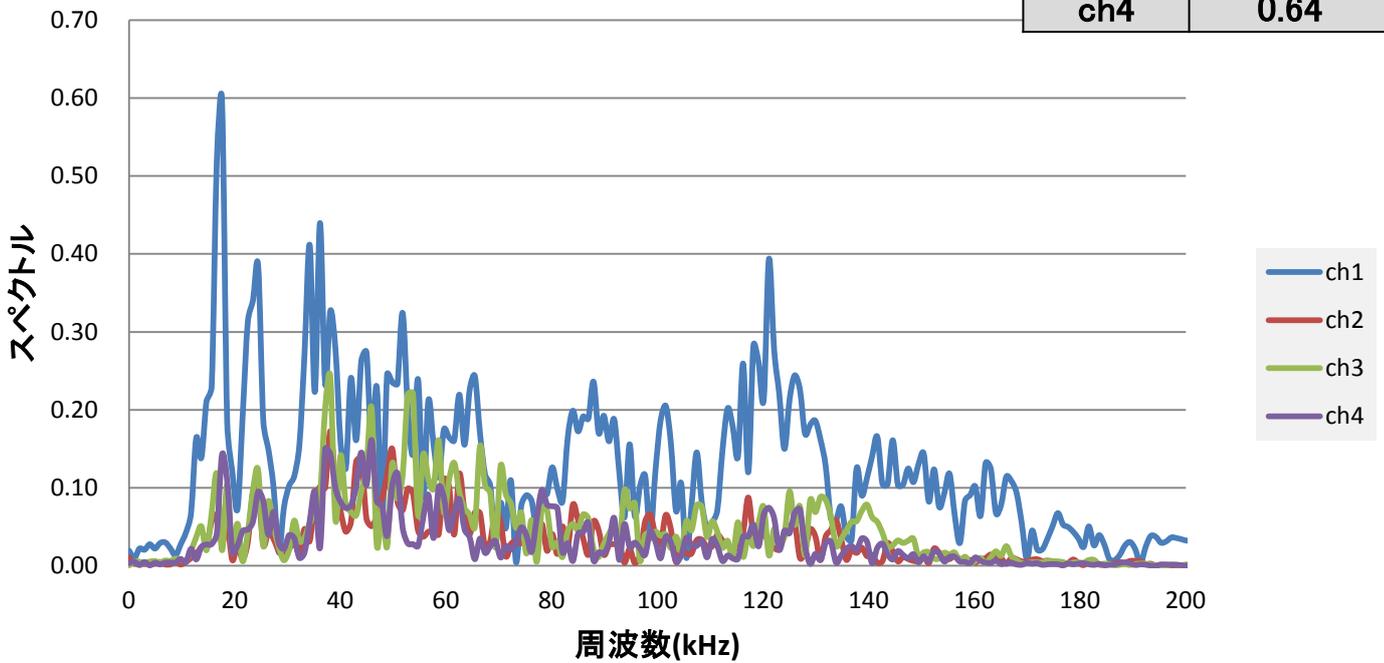
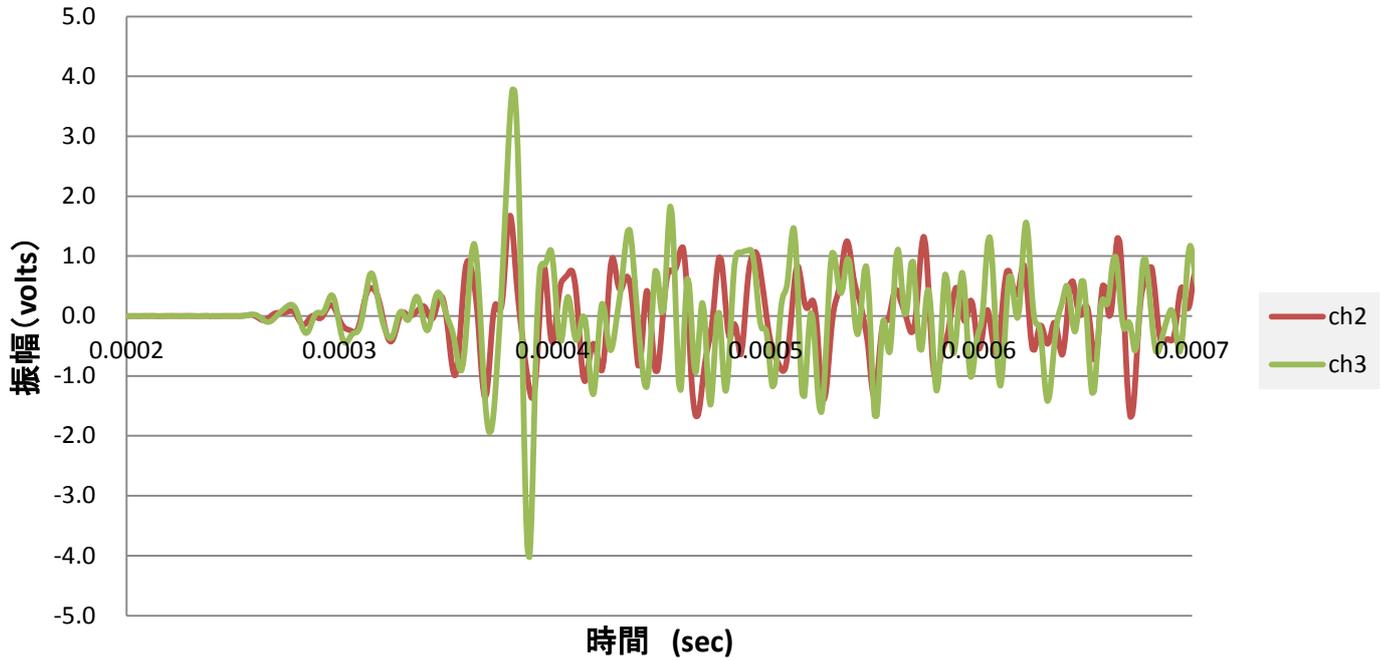


図4.3.1 発信点1のch1～ch4における検出波形と周波数分布および発信点からセンサまでの距離関係

### 波形 発信点1



### 周波数分布 発信点1

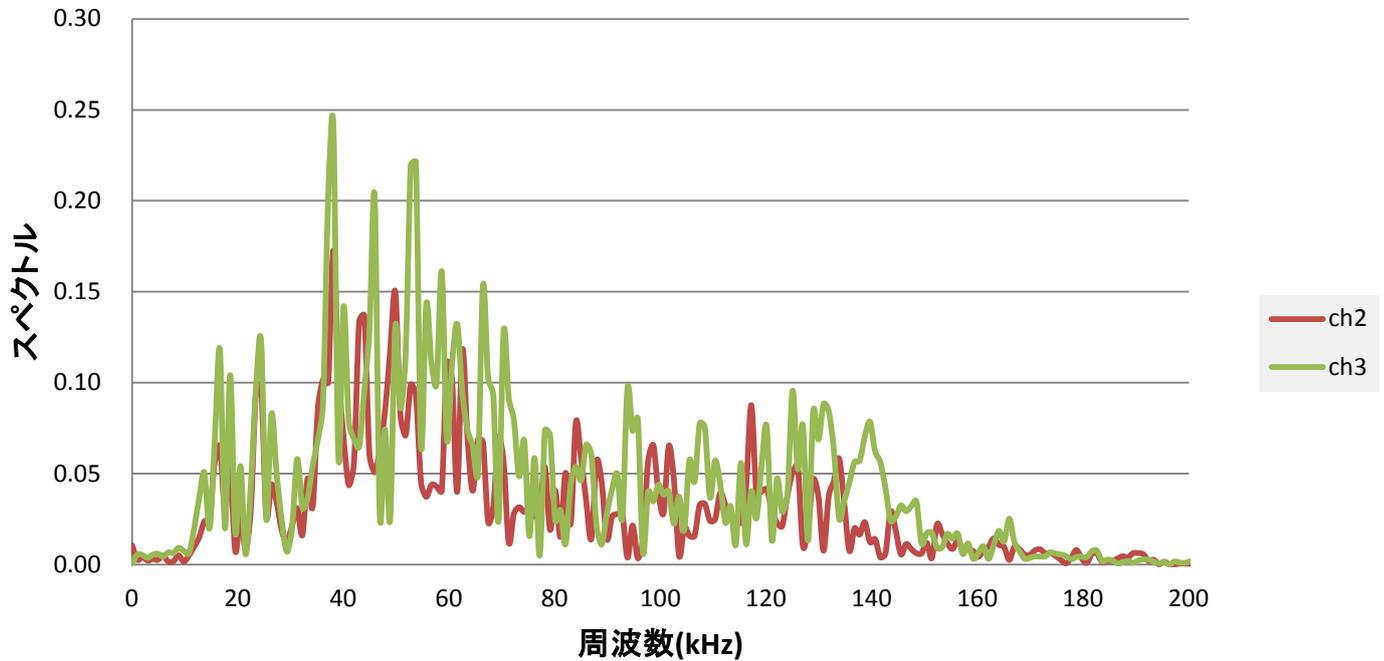


図4.3.2 発信点1のch2,ch3における検出波形と周波数分布

### 周波数応答ch2/ch3 (発信点1)

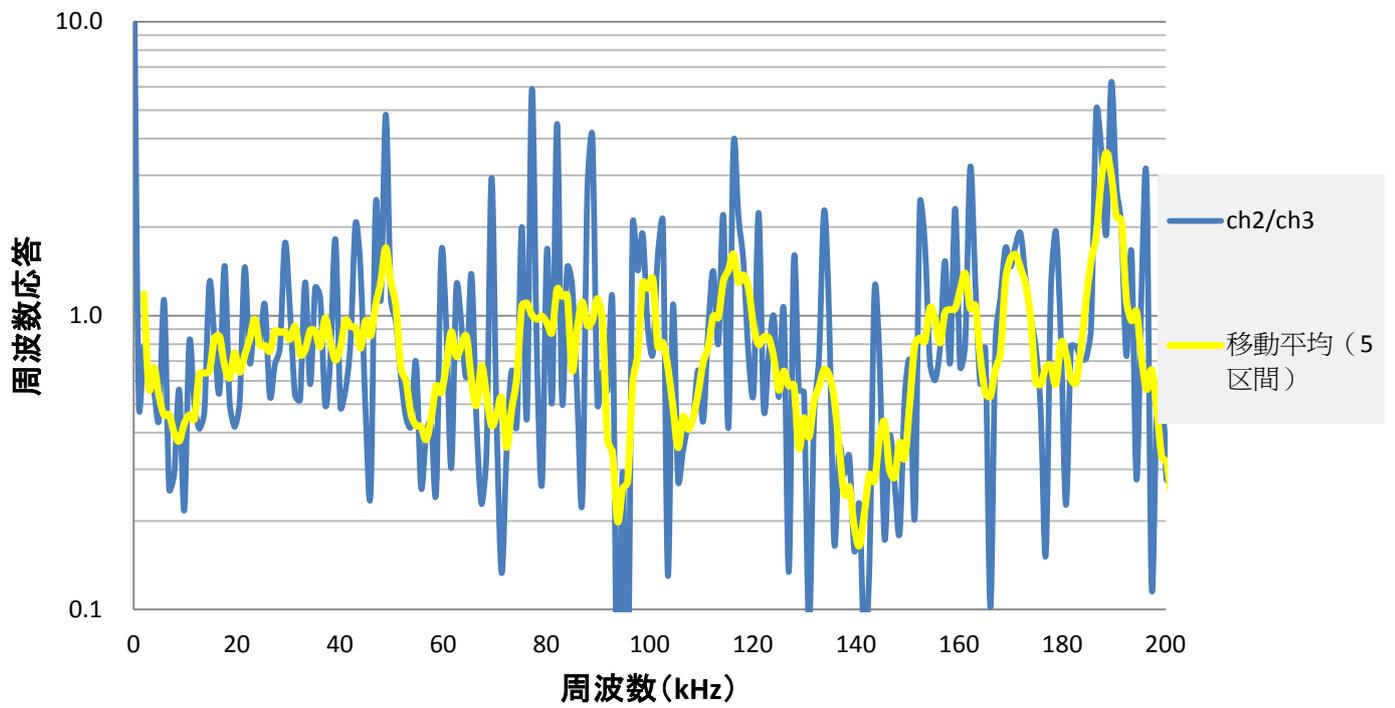


図4.3.3 発信点1の周波数応答(距離差ゼロ)

### 周波数応答ch2/ch3 (発信点1~10)

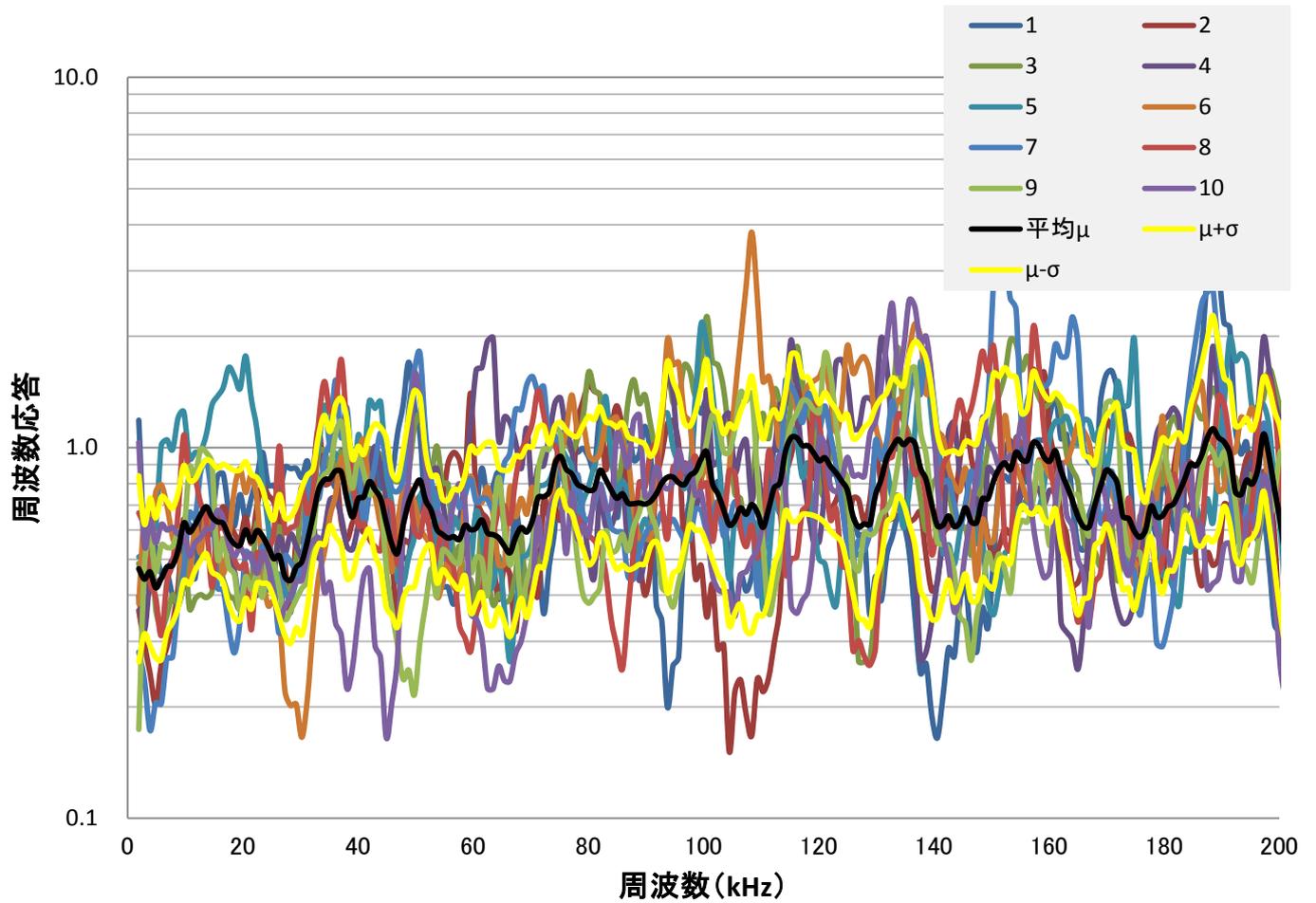


図4.3.4 距離差ゼロの周波数応答(発信点1~10)

### 周波数応答ch1/ch4 (発信点11~20)

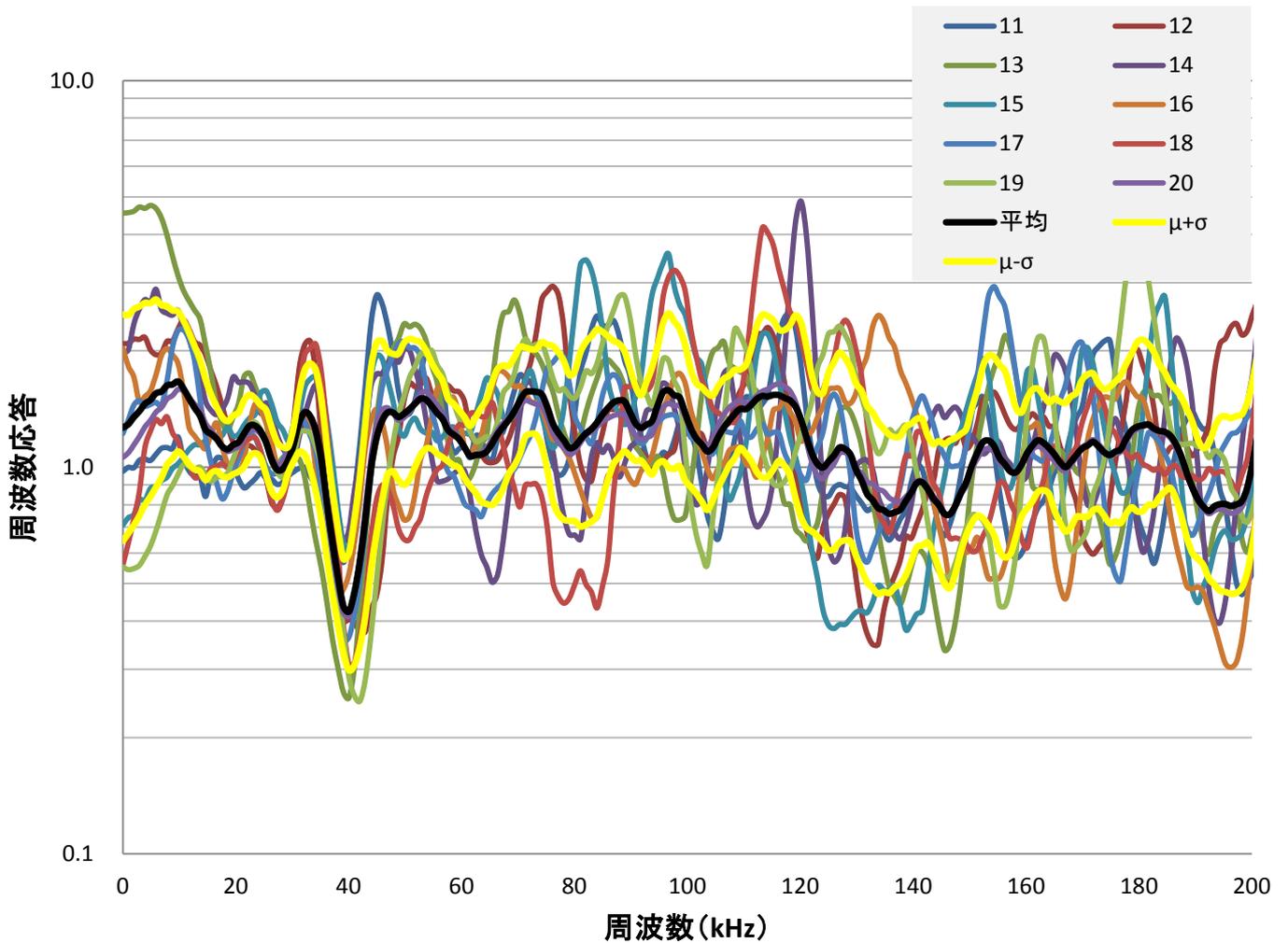


図4.3.5 距離差ゼロの周波数応答(発信点11~20)

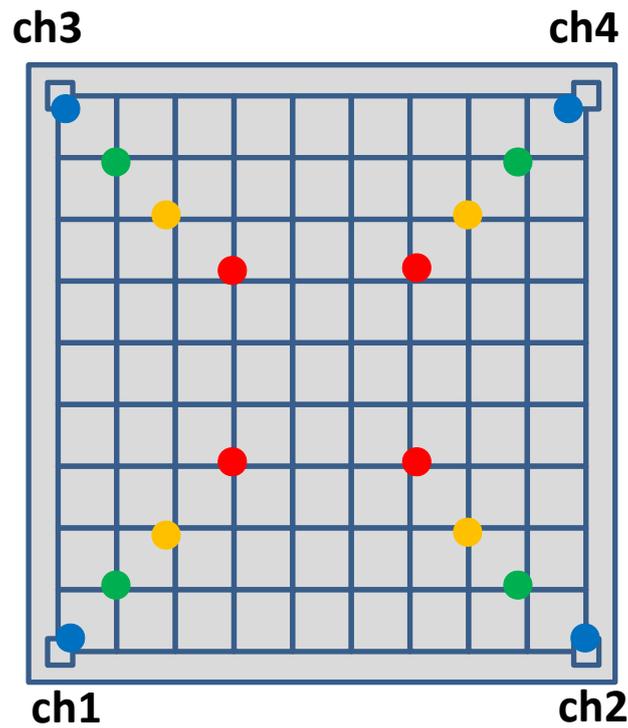


図4.3.6 発信点

表4.3.1 発信－受信センサ間の距離差の関係

発信点	センサ間の最大距離	センサ間の最小距離	距離差
●	0.436	0.335	0.201
●	0.505	0.173	0.332
●	0.574	0.122	0.451
●	0.644	0.100	0.544

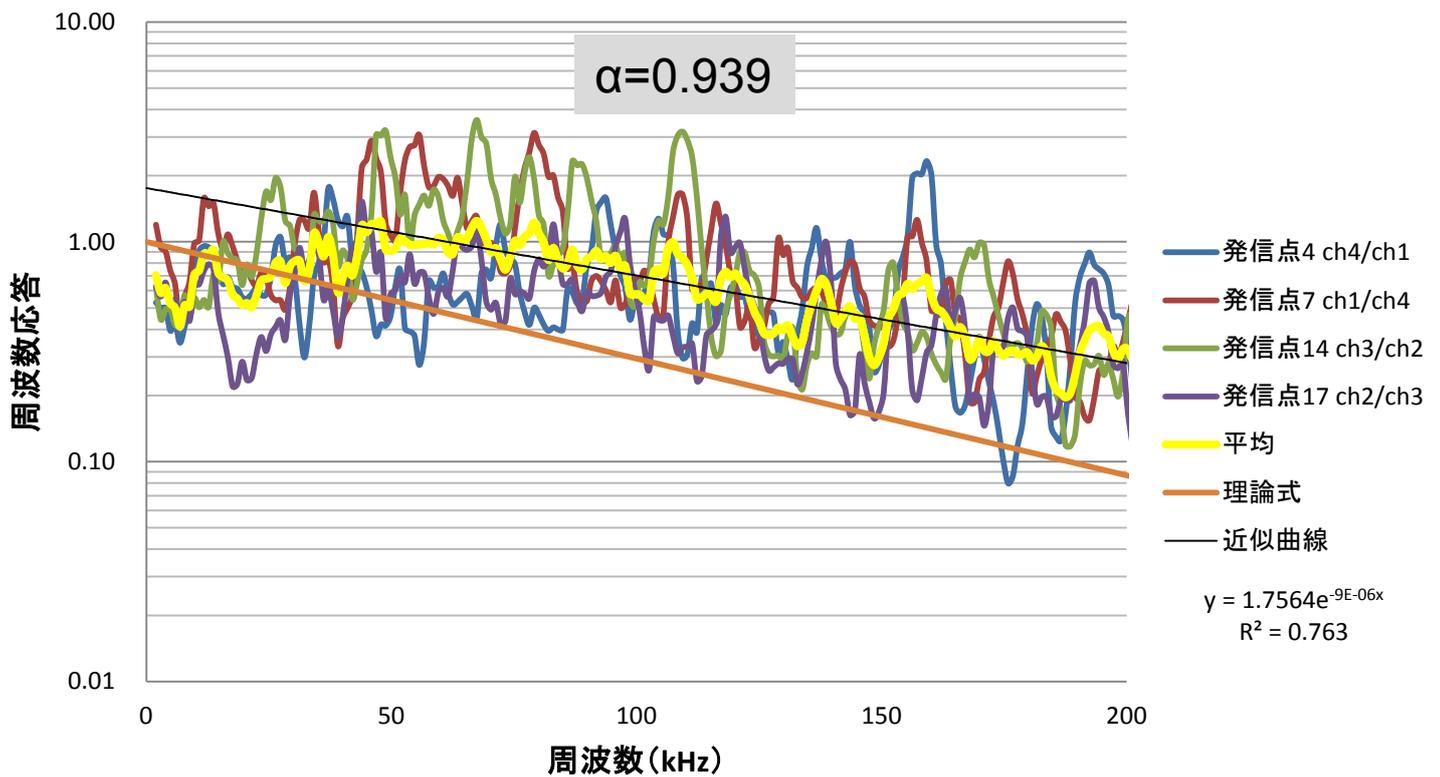


図4.3.7 周波数応答関数 (距離差0.201 m)

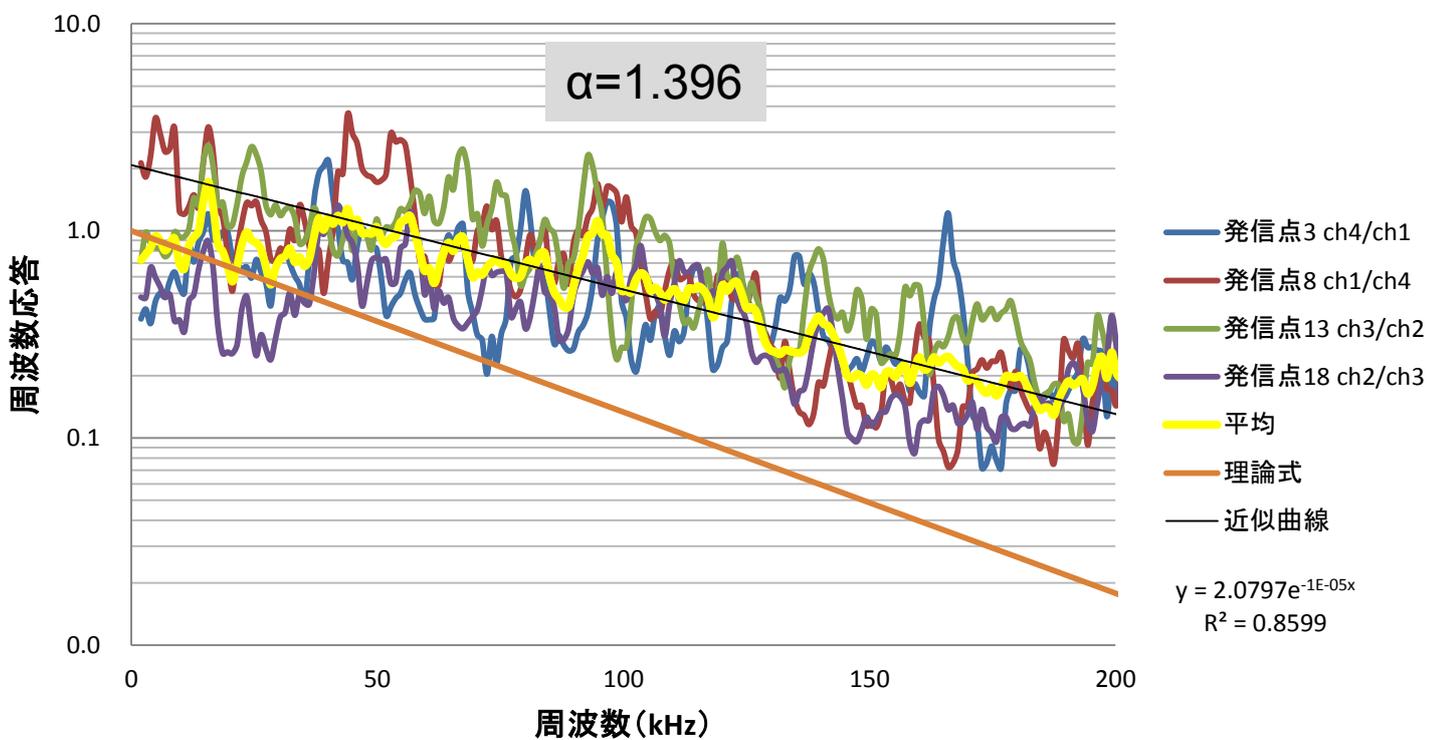


図4.3.8 周波数応答関数 (距離差0.332 m)

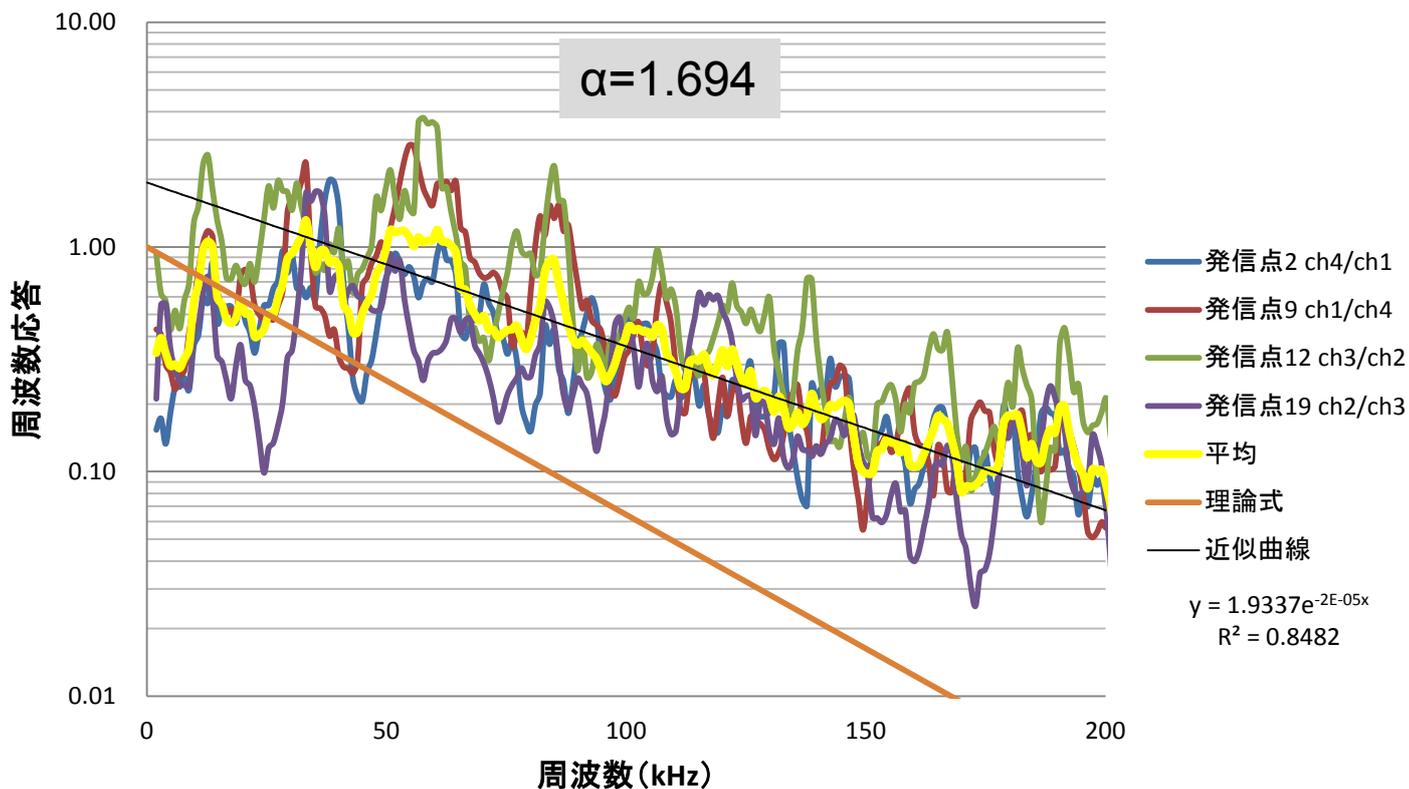


図4.3.9 周波数応答関数 (距離差0.451 m)

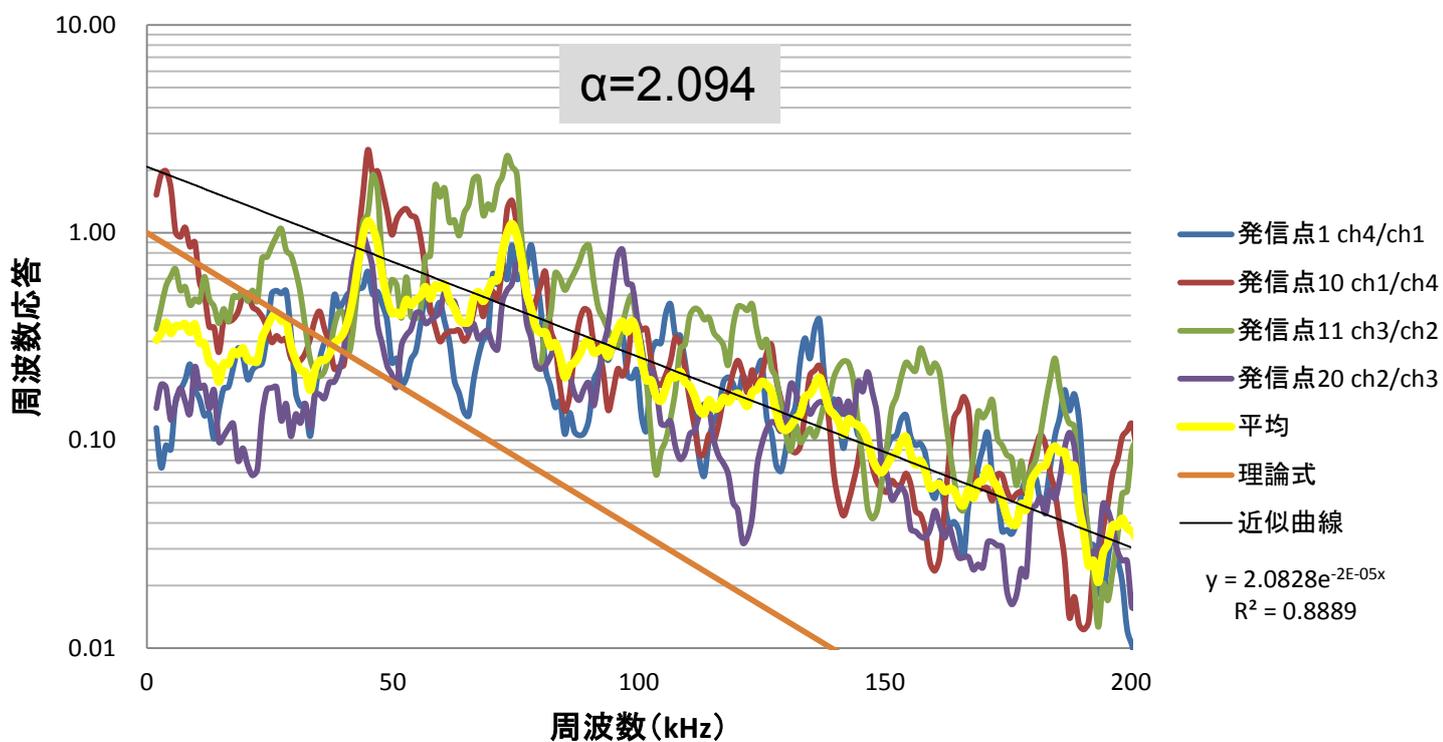


図4.3.10 周波数応答関数 (距離差0.544 m)

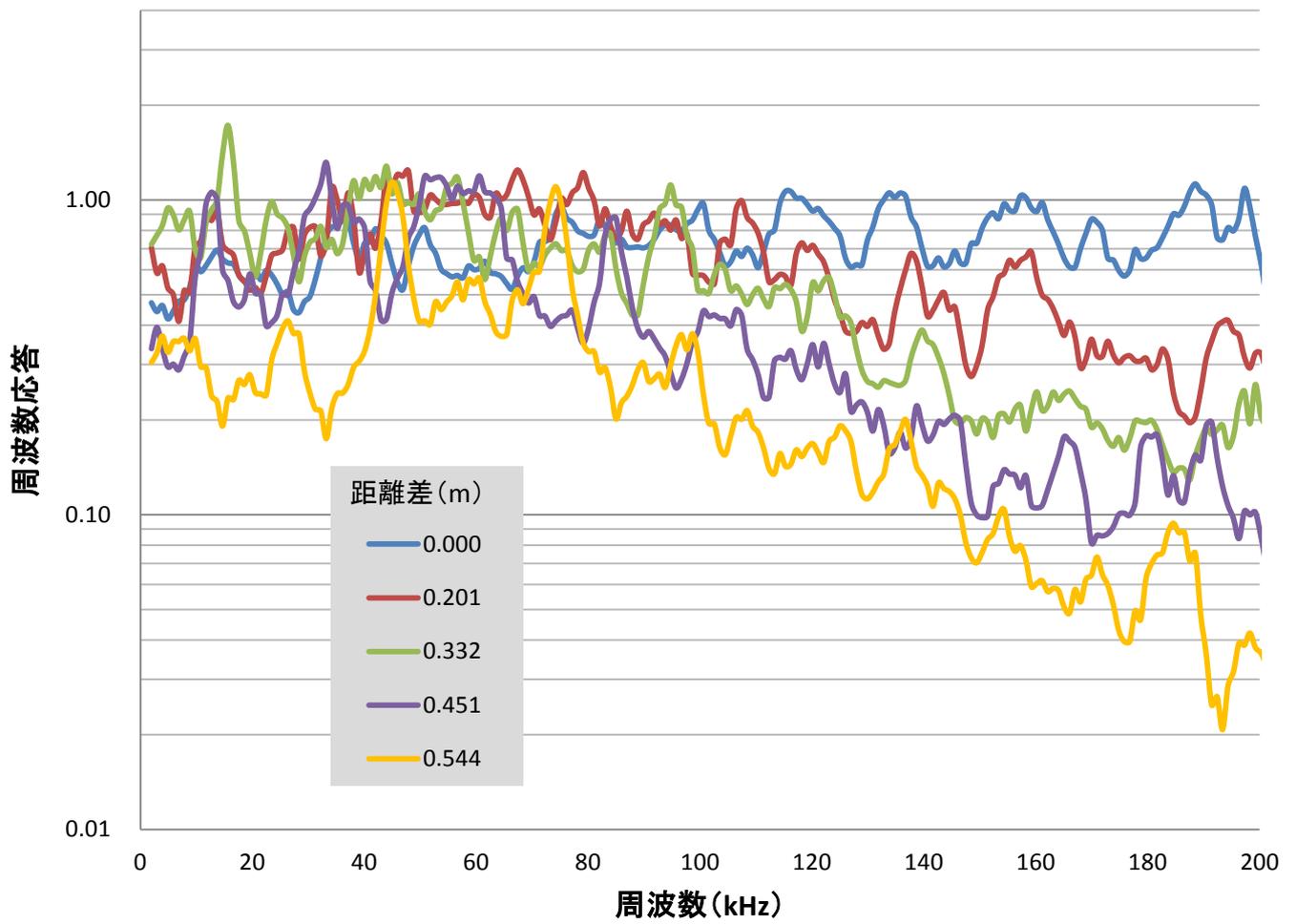
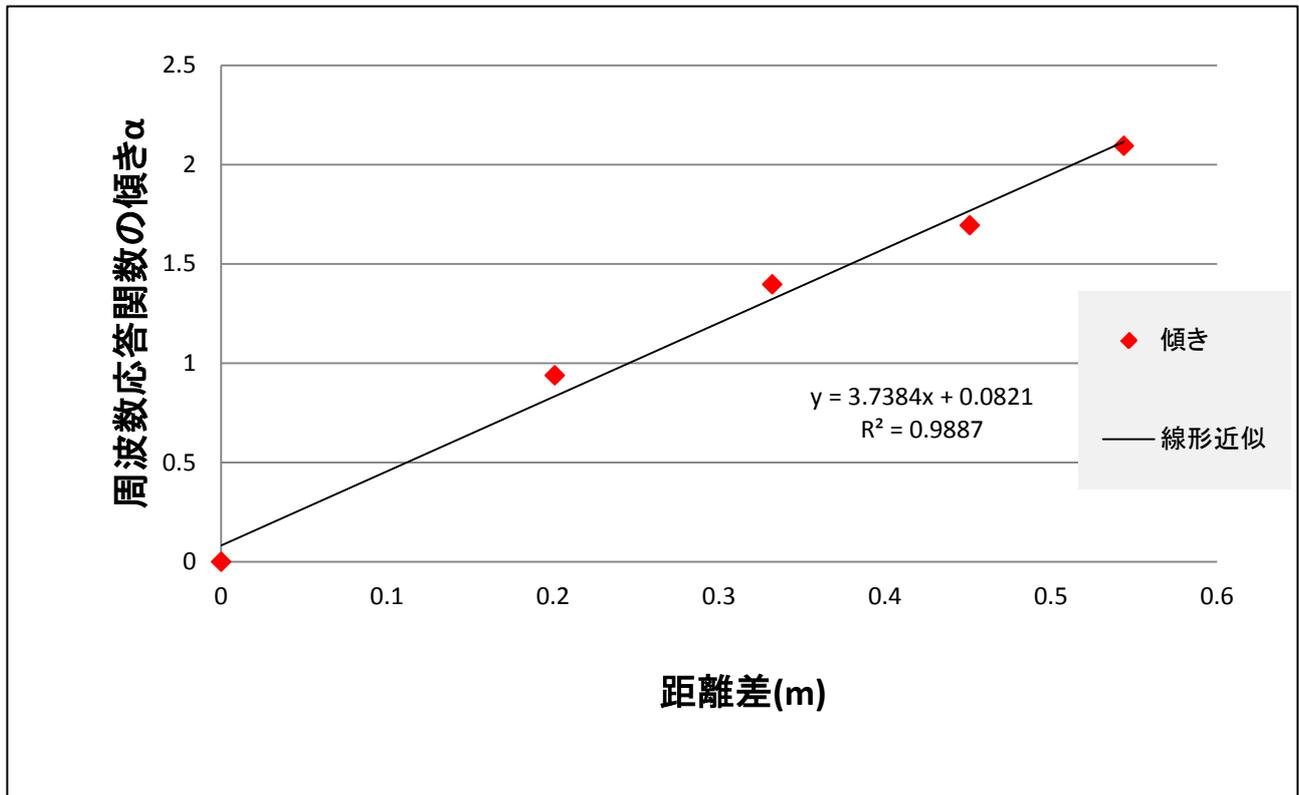


図4.3.11 距離差ごとの周波数応答関数



$$\frac{X_i(f)}{X_1(f)} = A \exp(-\alpha f)$$

図4.3.12 周波数応答関数の傾きと距離差の関係



図5.2.1 モルタル供試体

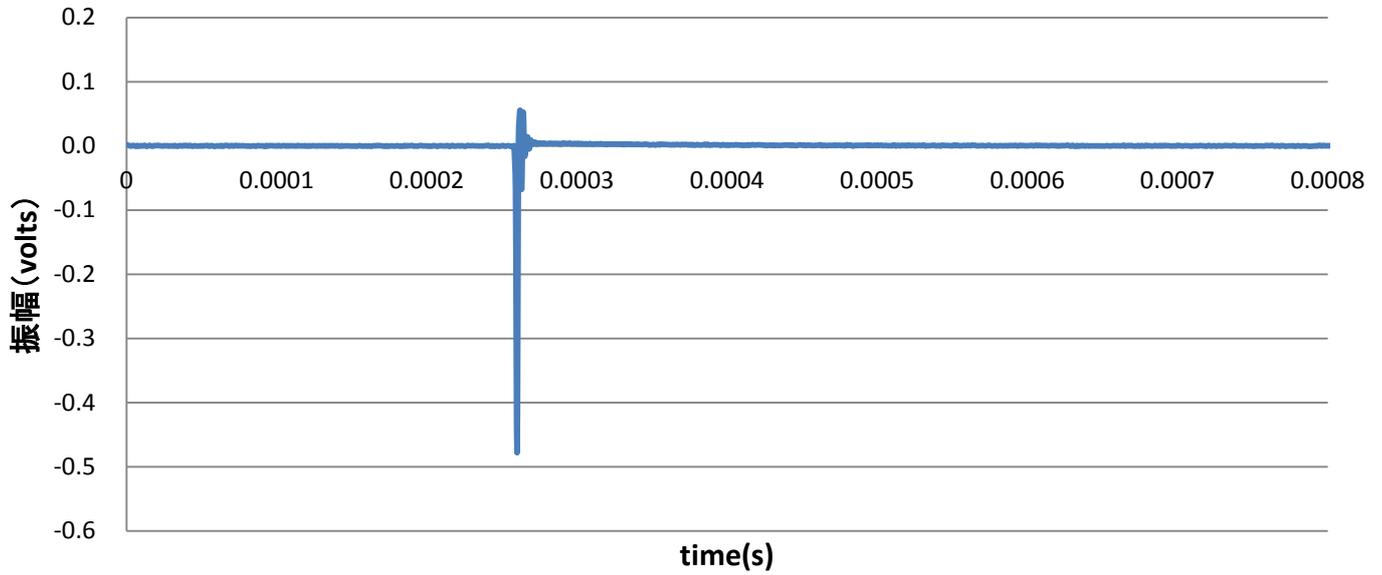


図5.2.2 ペンシルブレイク(鉛筆圧折)



図5.2.3 パルサー(PAC社製)

pulser 原波形



pulser 原波形の周波数分布

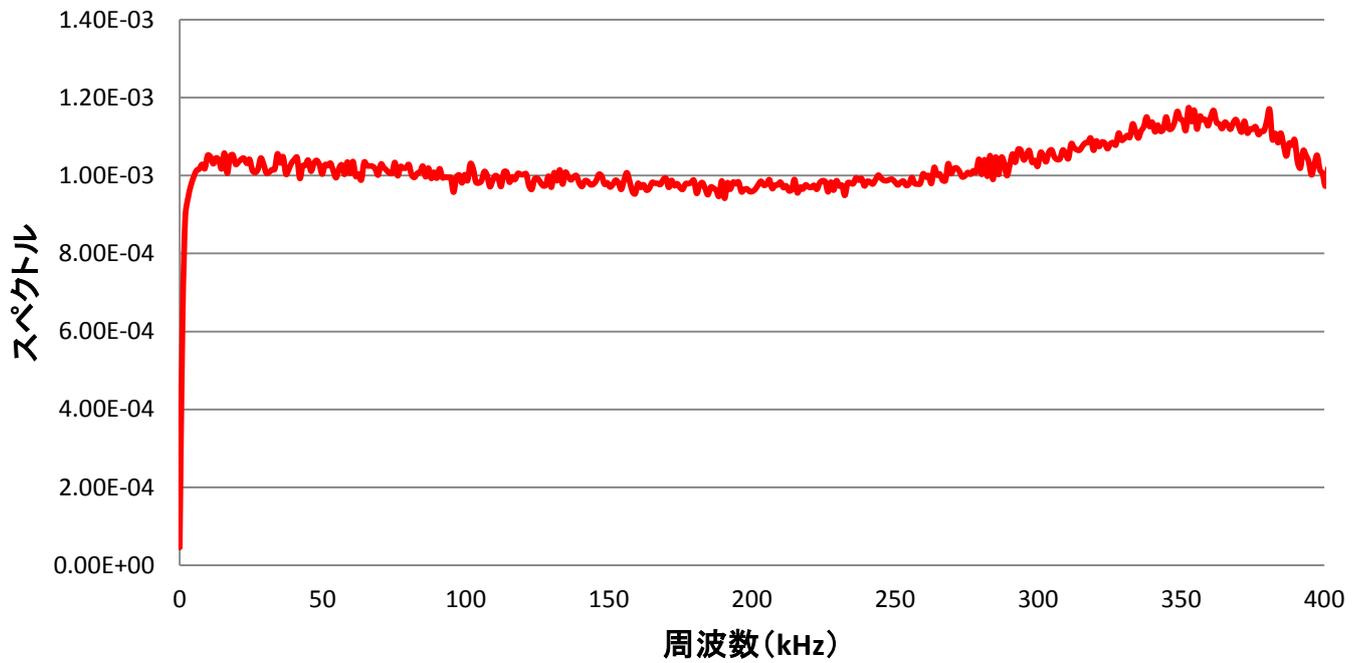
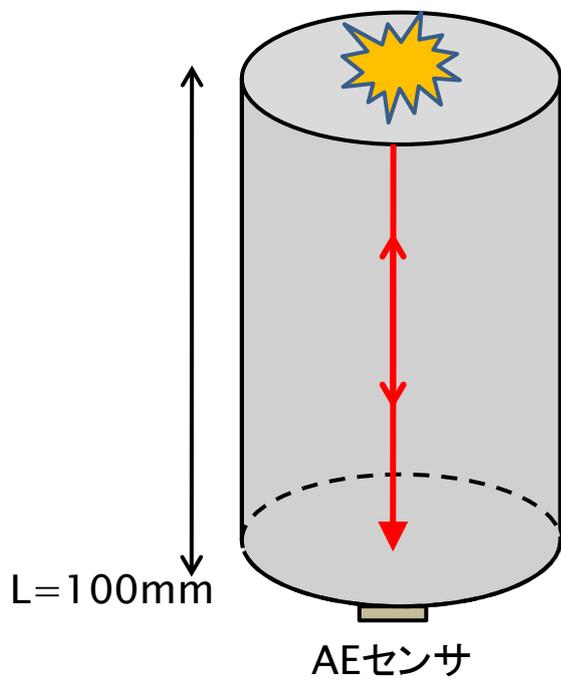


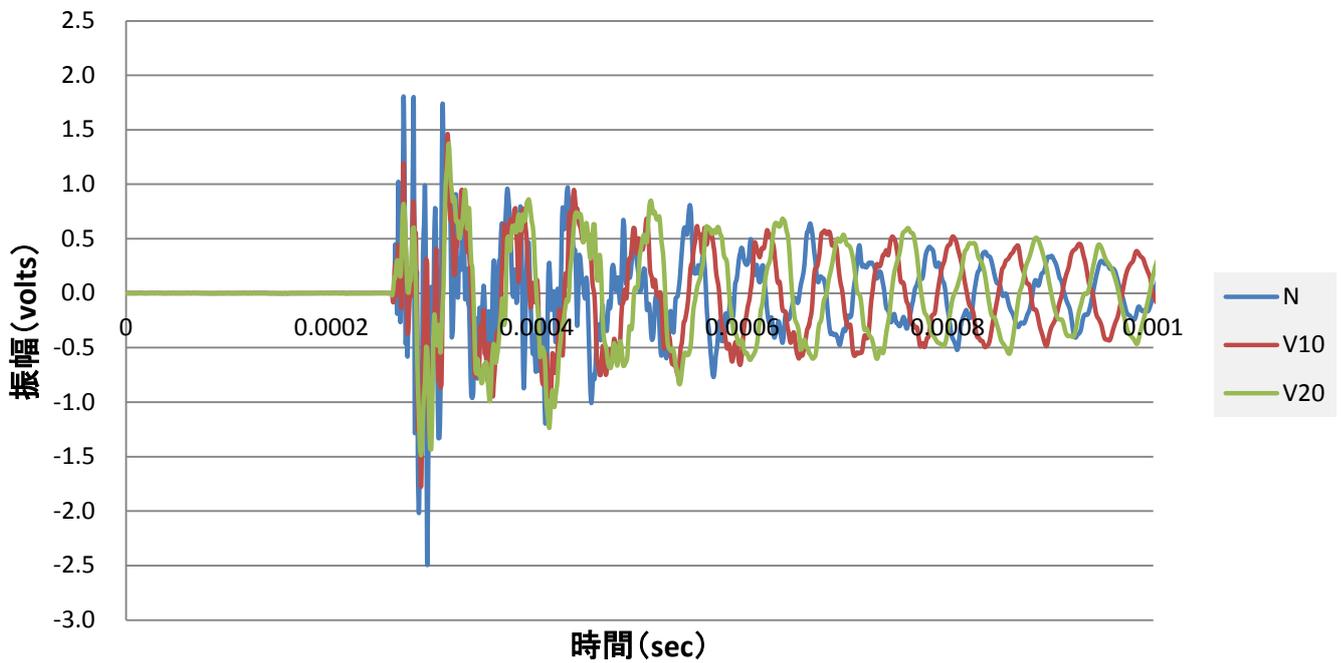
図5.2.4 パルサーによる発信波形とその周波数分布



	反射回数	伝播距離
第1波	0	100 mm
第2波	2	300 mm
第3波	4	500 mm

図5.2.5 多重反射のイメージ

### 検出波形 (ペンシルブレイク)



### 周波数分布 (ペンシルブレイク)

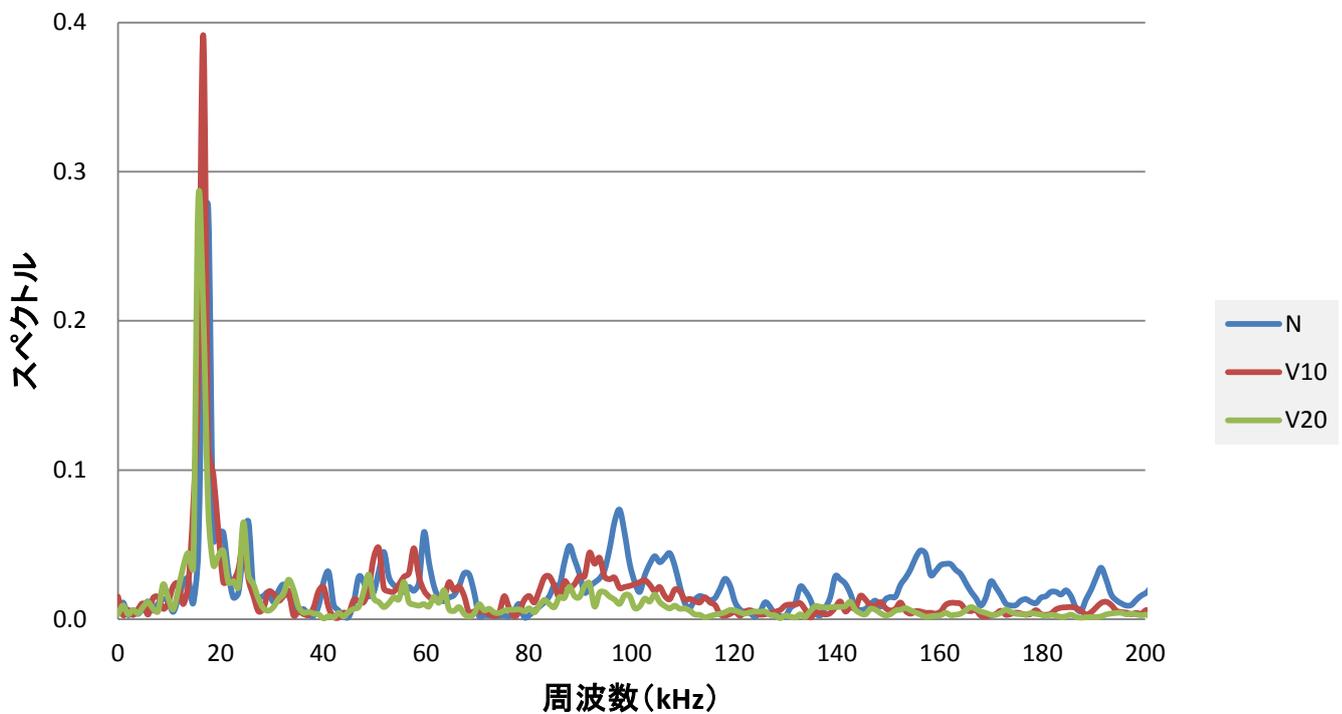


図5.3.1 ペンシルブレイクによる検出波形とその周波数分布

### 周波数分布 (ペンシルブレイク)

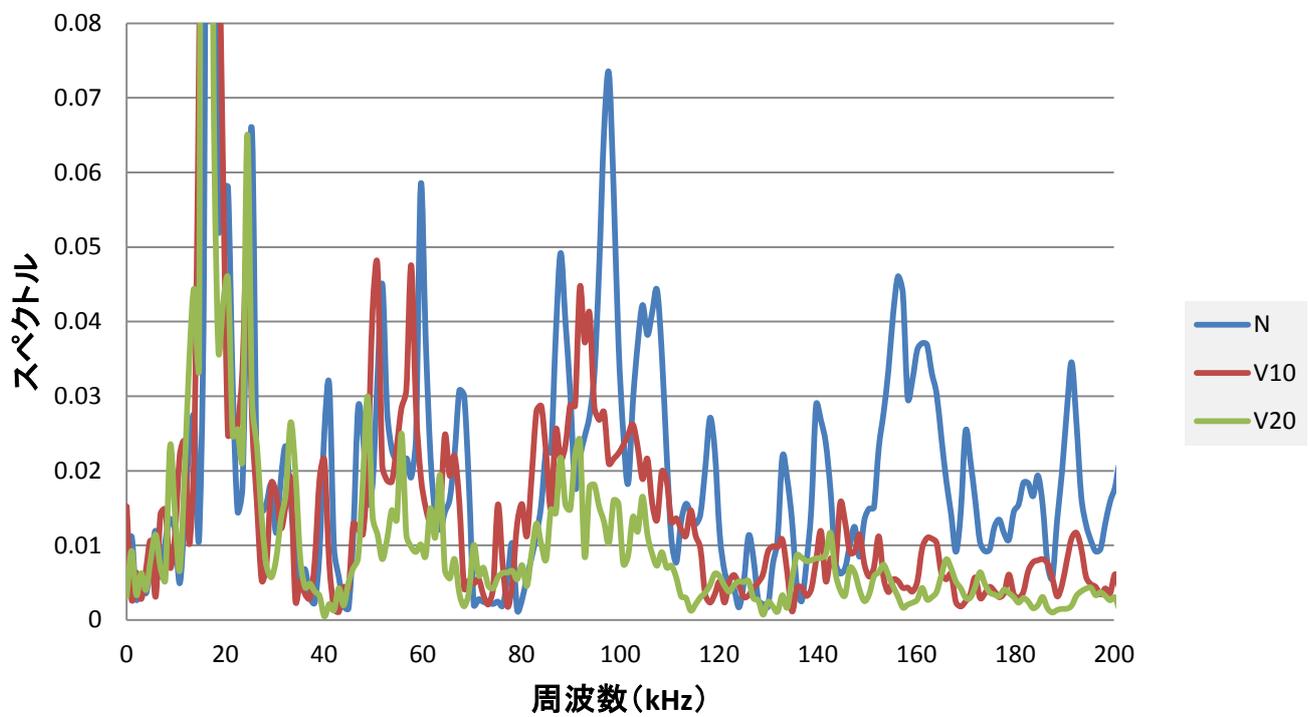
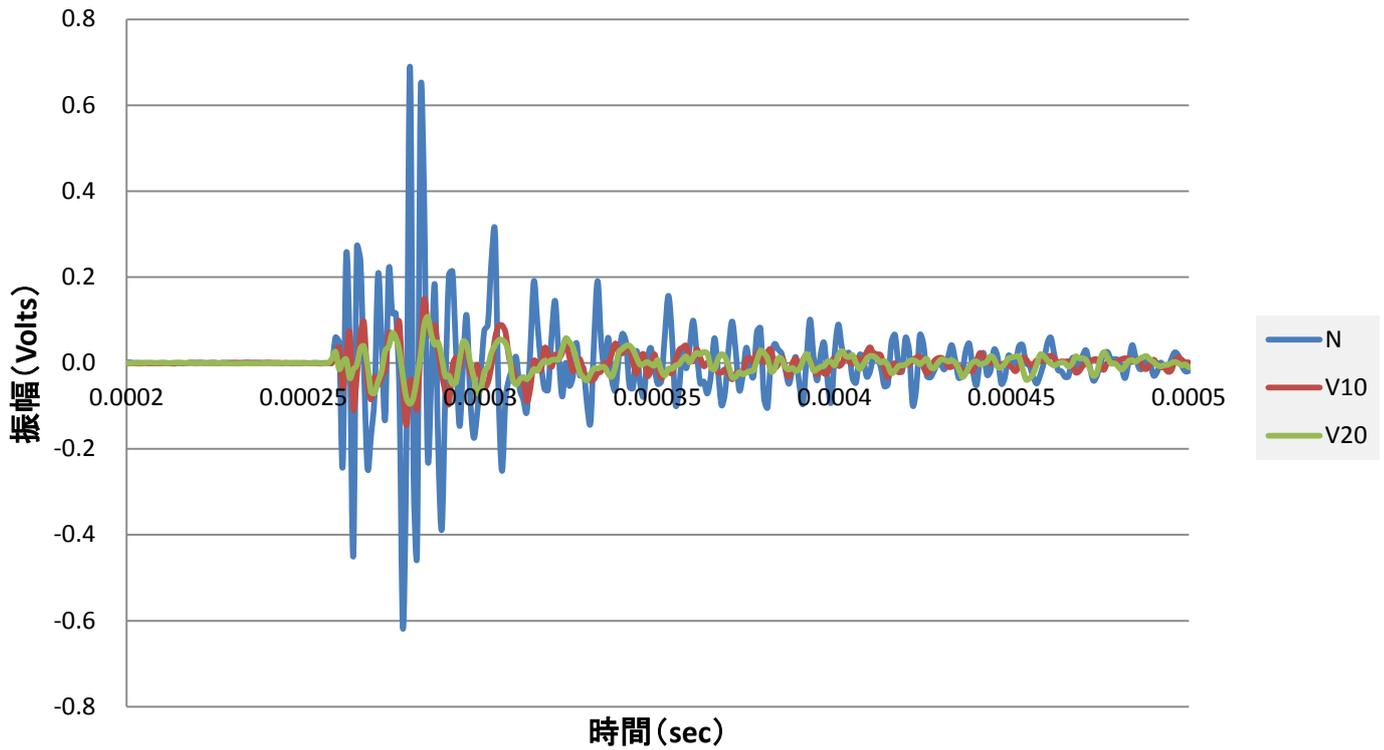


図5.3.2 ペンシルブレイクによる検出波形の周波数分布(拡大図)

### 検出波形 (パルサー)



### 周波数分布 (パルサー)

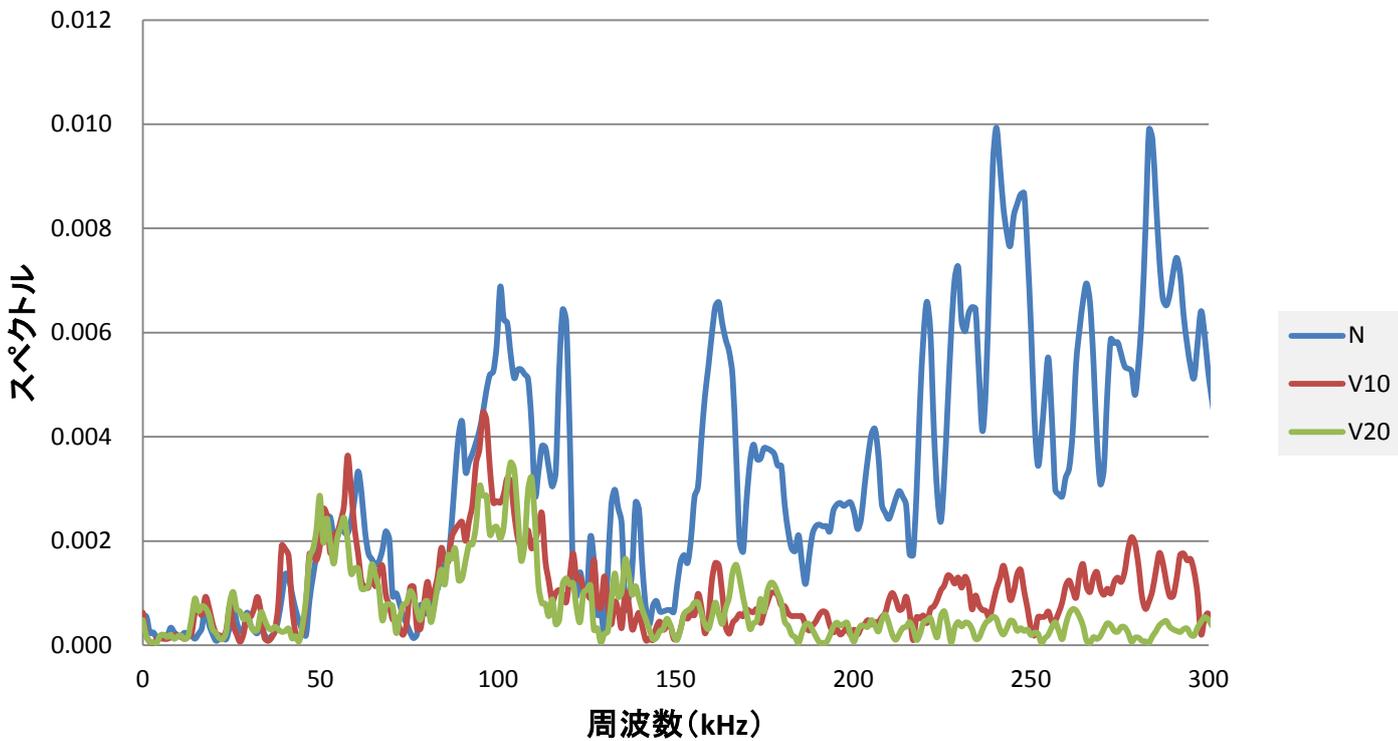


図5.3.3 パルサーによる検出波形と周波数分布

### 検出波形 (パルサー)

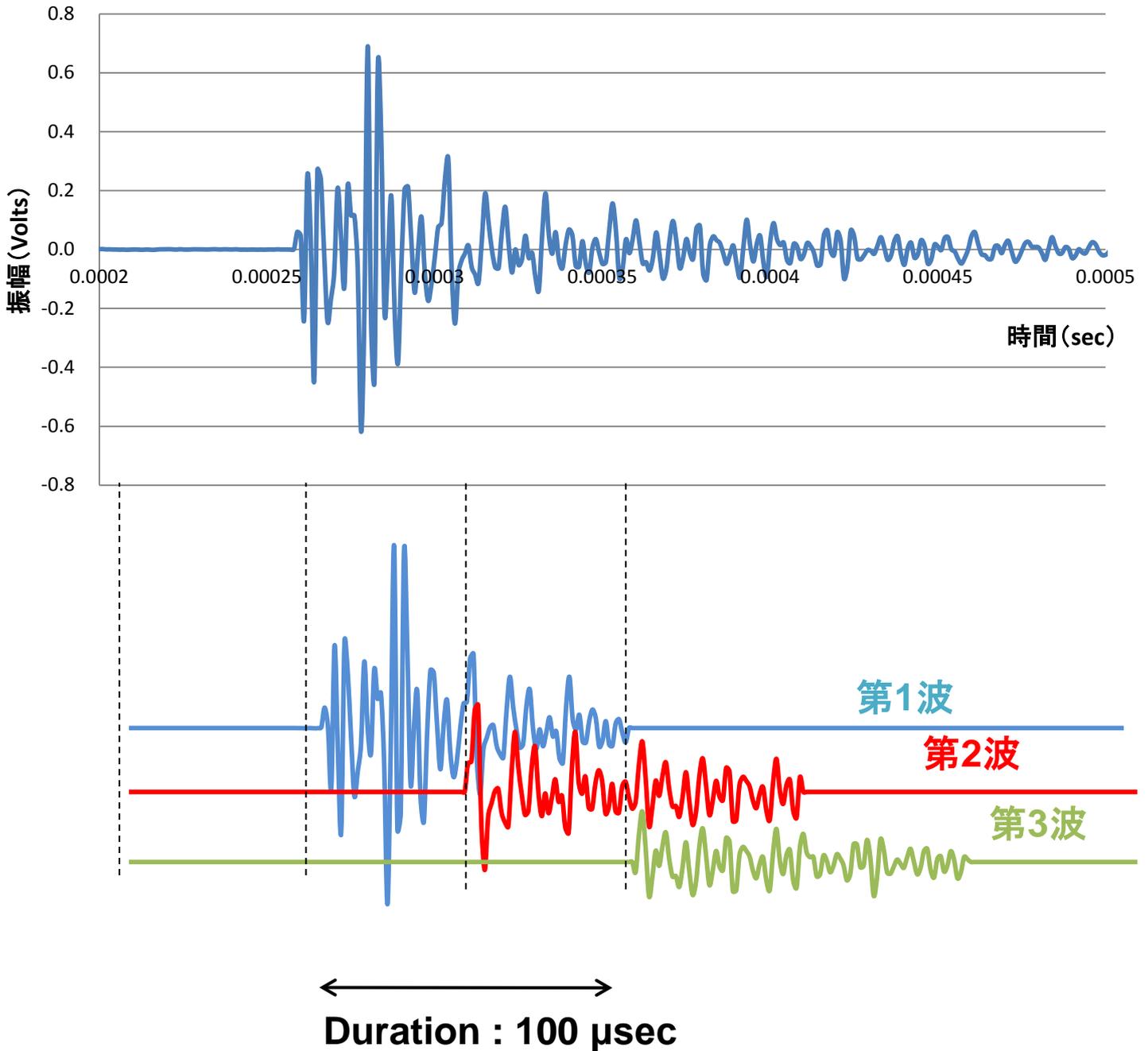
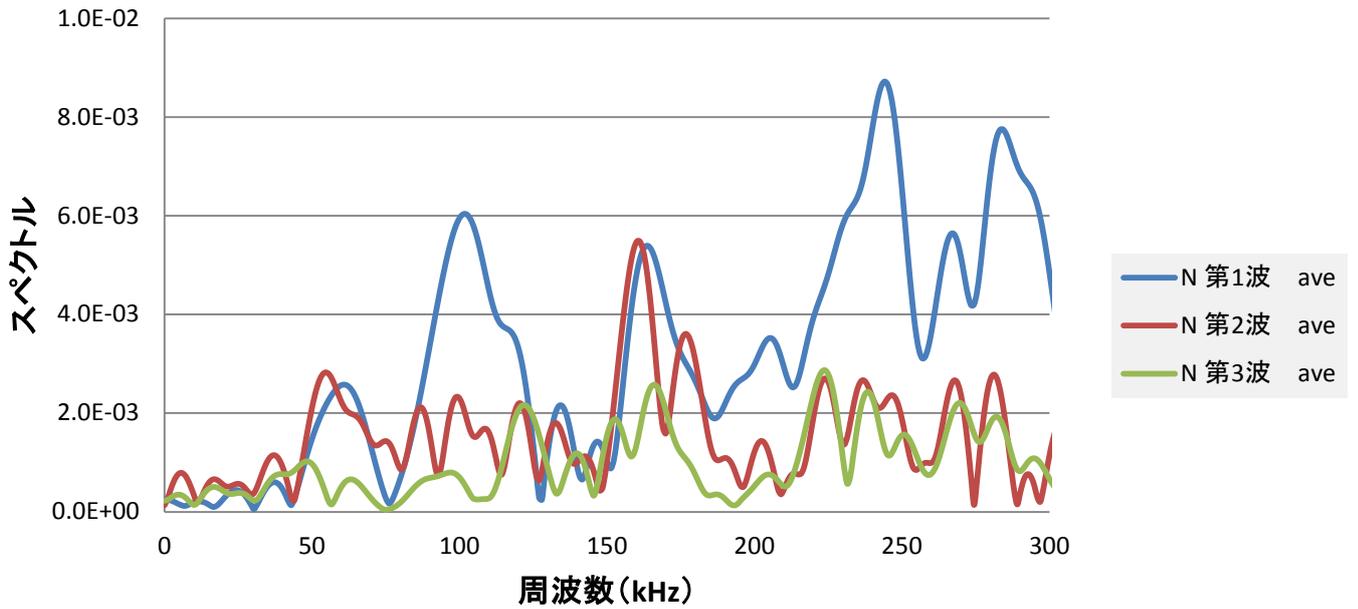


図5.3.4 全体の検出波形と反射波の関係

### Duration : 100μsec



### Duration : 50μsec

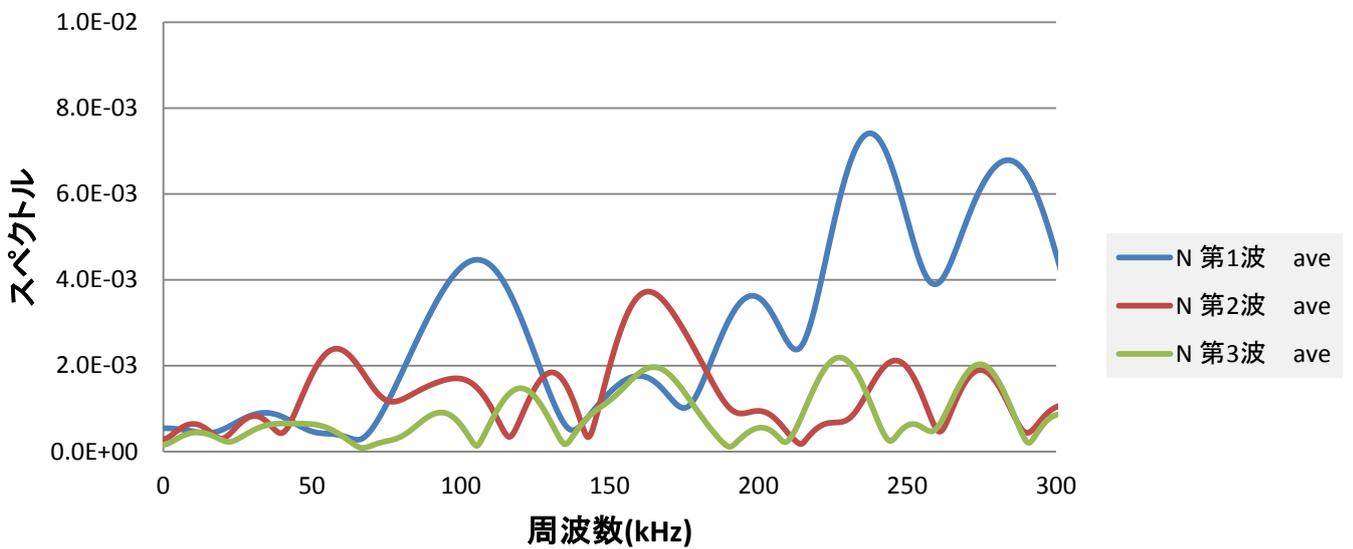
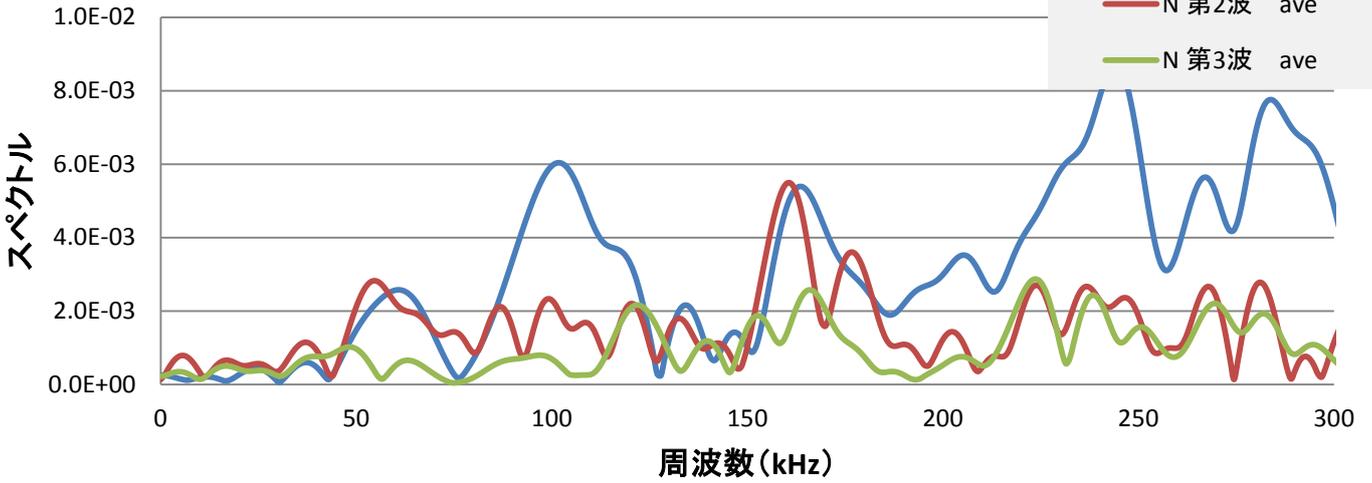
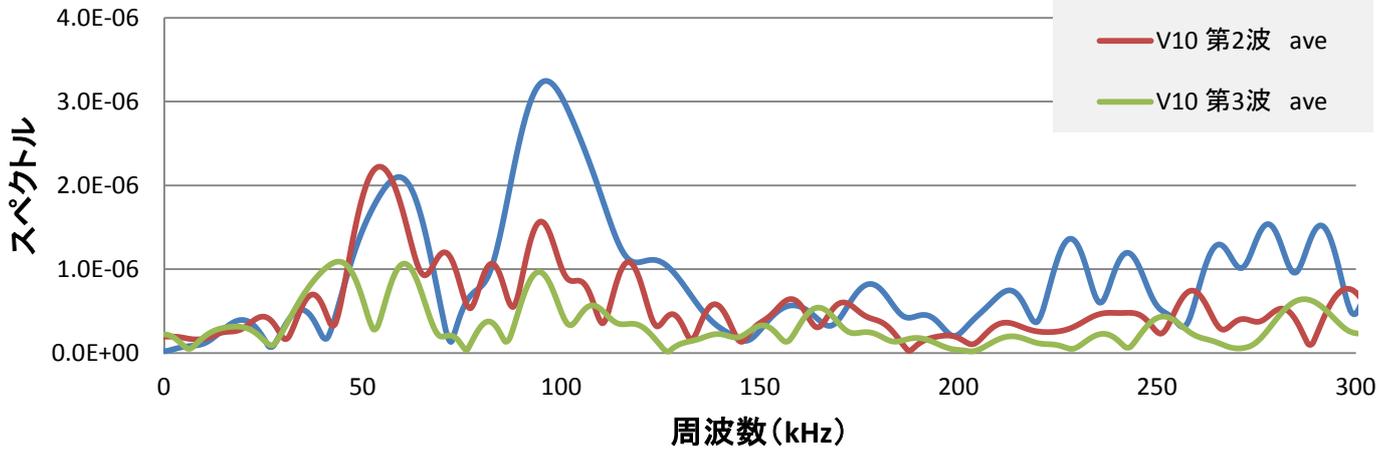


図5.3.5 Duration 50 μsecと100 μsecの比較

### 供試体 N



### 供試体 V10



### 供試体 V20

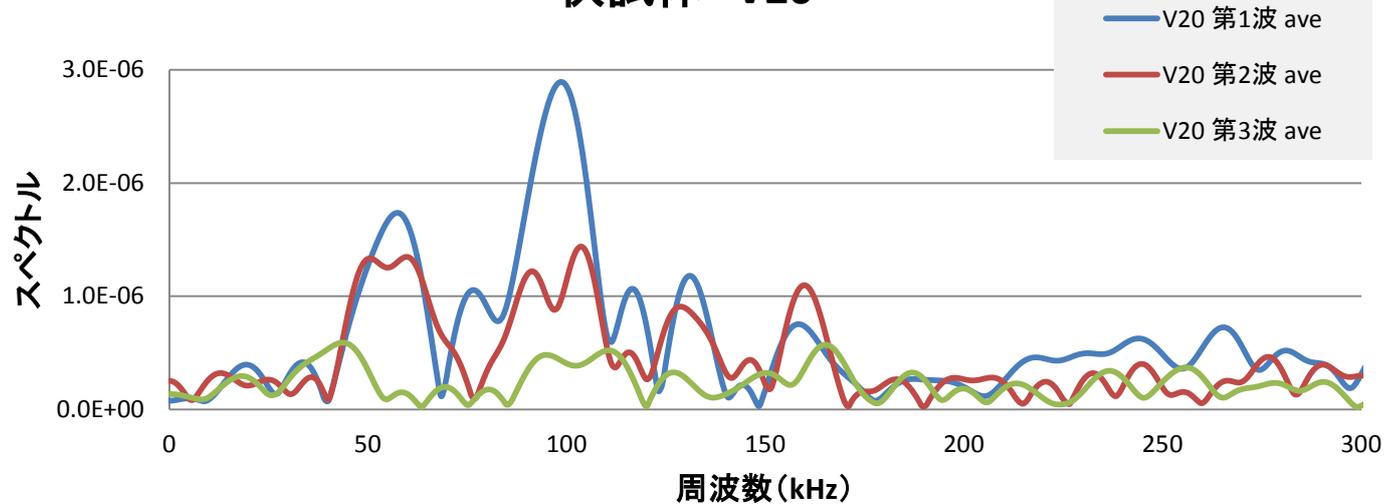
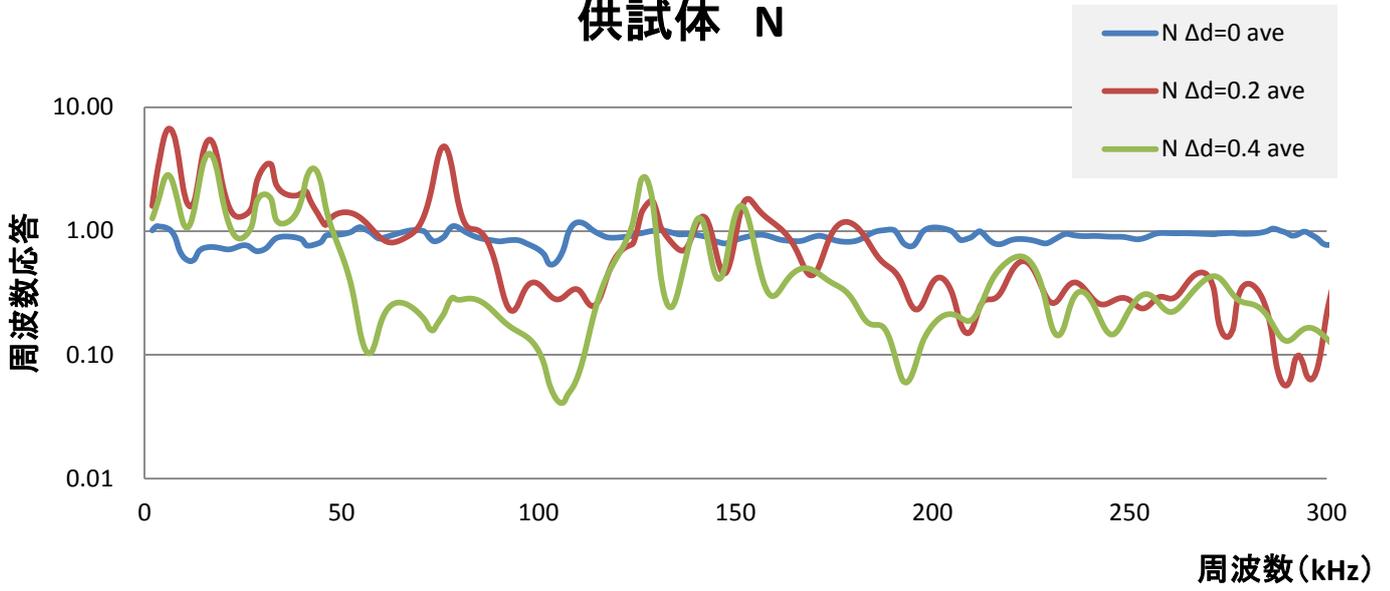
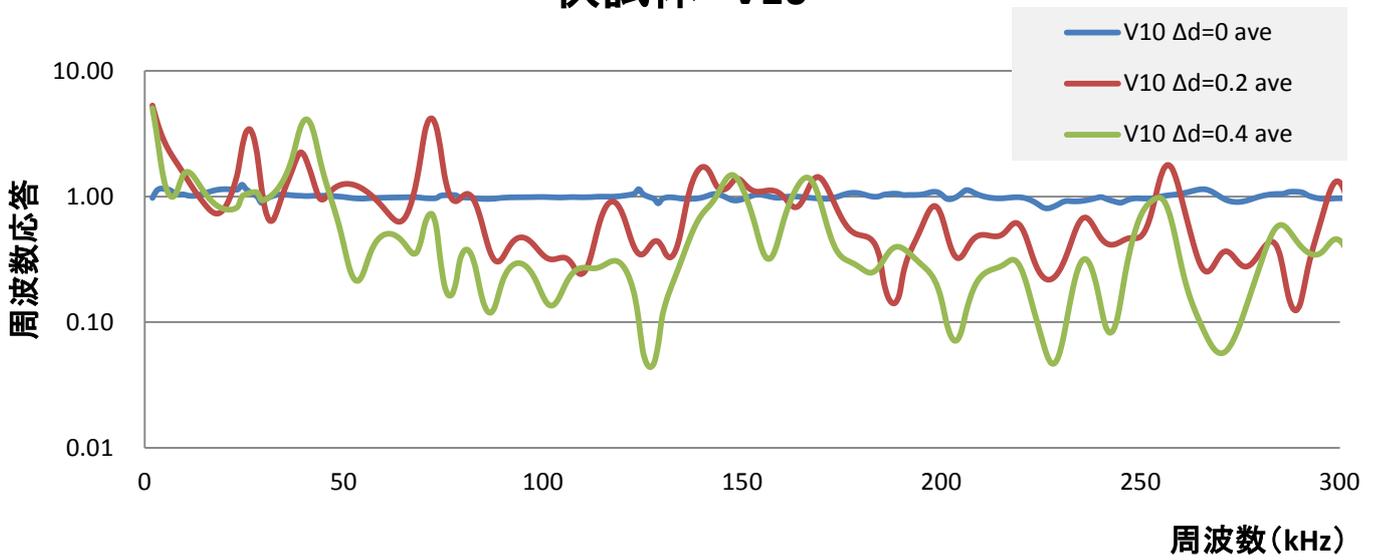


図5.3.6 供試体別 第1波～第3波の周波数分布

### 供試体 N



### 供試体 V10



### 供試体 V20

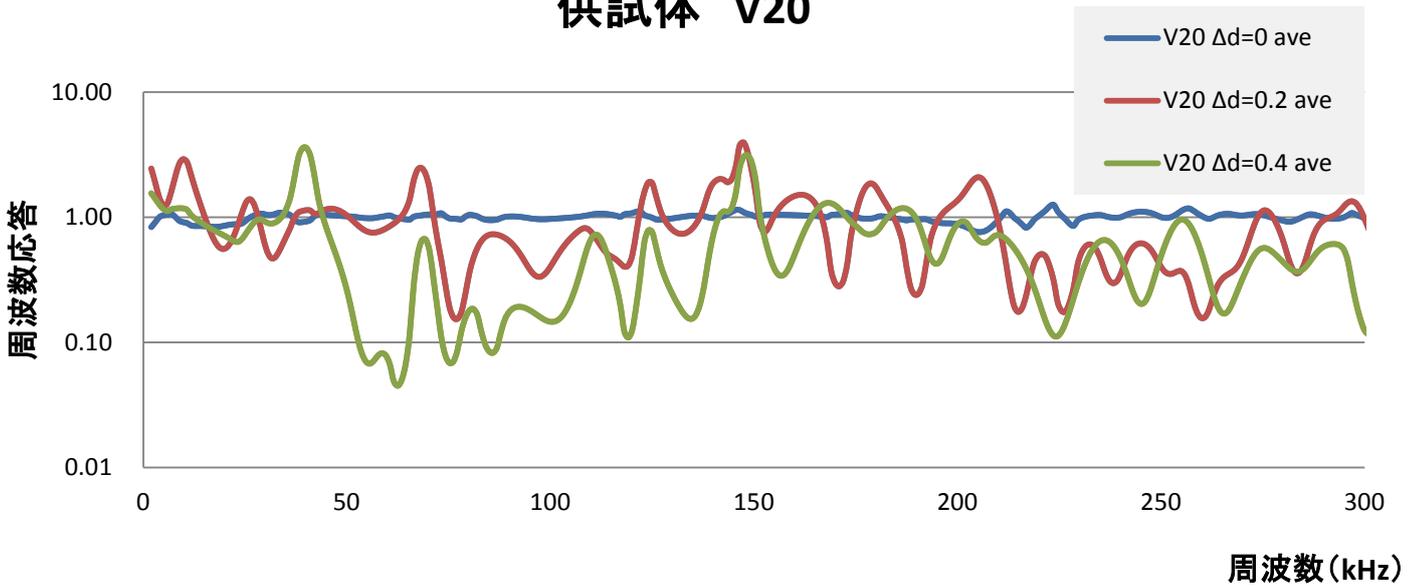
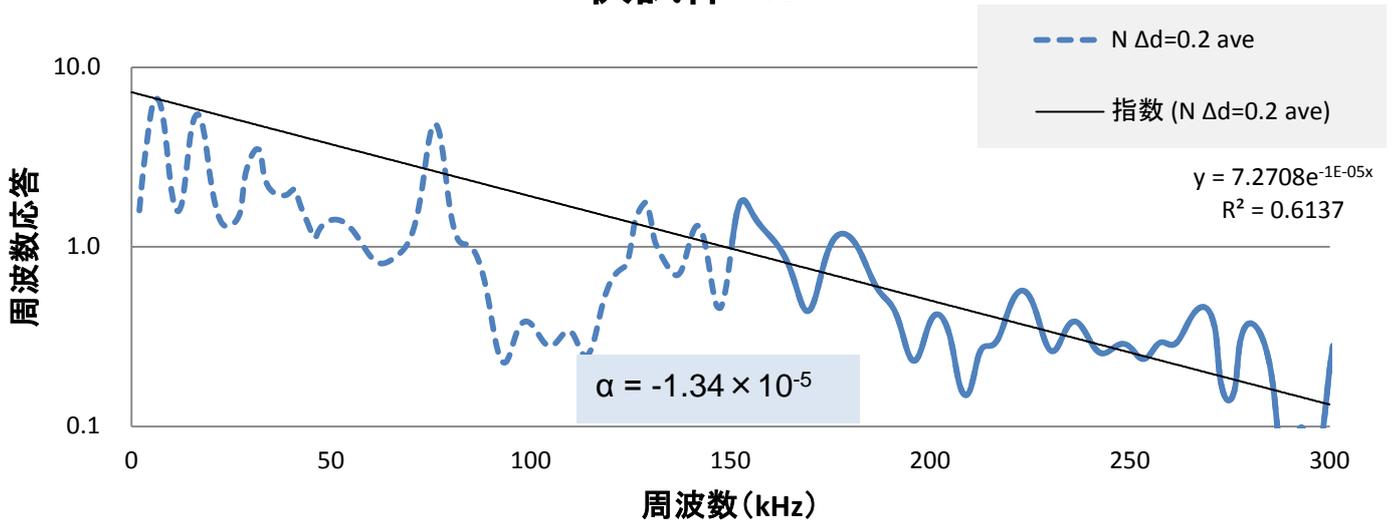
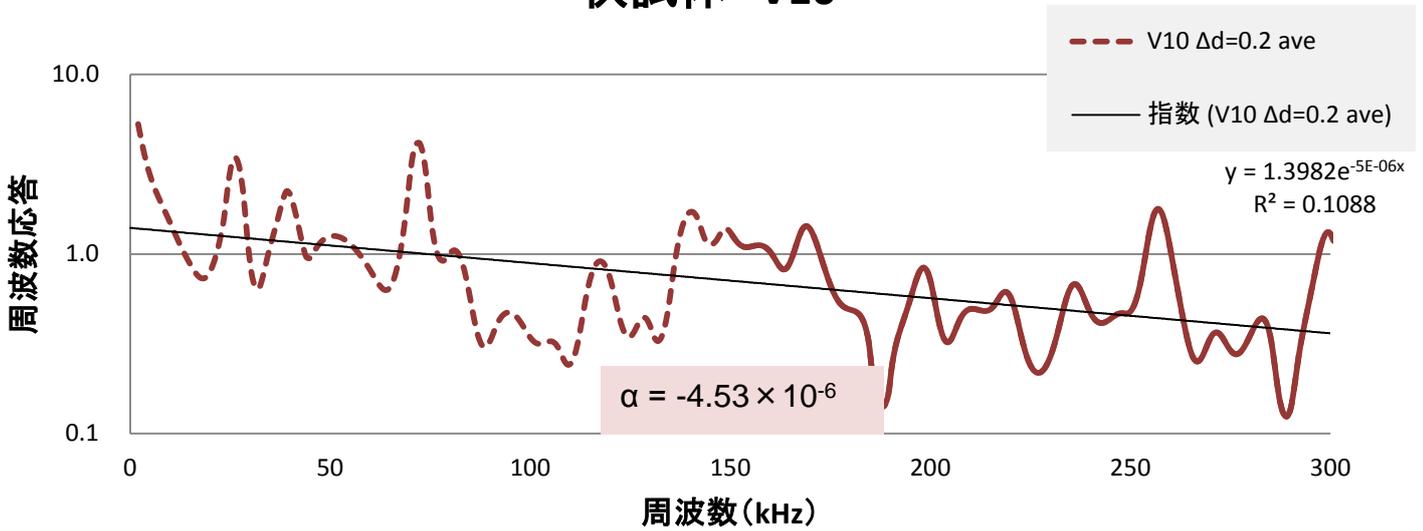


図5.3.7 周波数応答関数 ( $\Delta d = 0.00$  m,  $0.20$  m,  $0.40$  m)

### 供試体 N



### 供試体 V10



### 供試体 V20

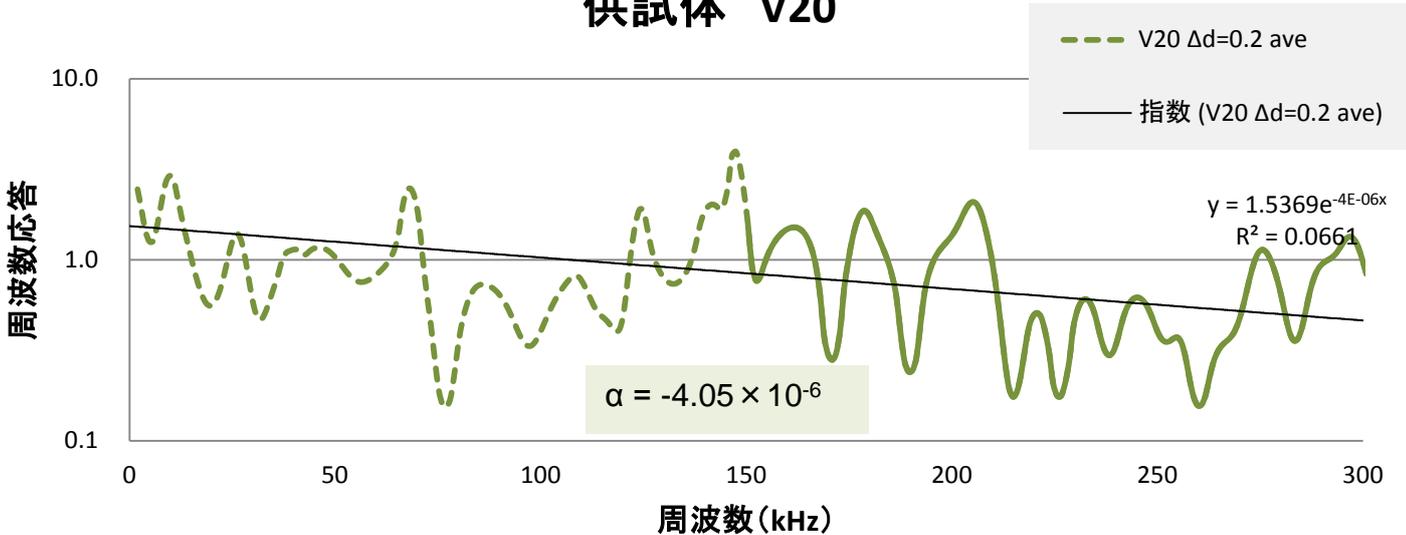


図5.3.8 周波数応答関数の近似曲線