

弾性波法によるトンネル覆工クラックの  
特性評価に関する研究

平成 22 年 2 月 23 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

後藤基芳

## 要旨

近年、橋梁やダム、トンネルなどの土木構造物の老朽化が顕著化し社会問題となっており、これらの土木構造物の維持・管理が急務とされている。一般に、土木構造物は複合材料であることや様々な環境条件で使用されているので、その劣化を精度良く予測することは困難となり効果的な維持・管理手法が確立されていないのが現状である。例えば、土木構造物の主要材料の1つであるコンクリートの劣化には表面から内部に進展するクラックが挙げられる。クラックの特性評価としては、一般に表面で観察できるクラック幅での検討が中心になされてきたが、その理由の一つにクラックの材料内部での進展状況が定量的に評価できない現状があった。つまりコンクリートにおけるクラック進展の特性評価は未だ確立されておらず、例えばクラック深さについても同様に定量的な評価手法は見出されていない。

そこで本研究では、トンネル覆工コンクリートのクラックに着目し、クラックの深さや方向などの特性を定量的に評価できる手法について研究した。

クラックの特性評価手法には、固体中を伝播する弾性波動のうち、特に本研究では表面波に着目し、クラック深さとそのエネルギーの減衰に着目して研究を進めた。

また、本研究では数値解析を援用し、その結果と実験結果を比較検討することで実クラック規模にも適用可能な方法論を検討した。

## 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 既往のコンクリート構造物の劣化診断法 .....	3
1.3.1 目視 .....	3
1.3.2 レーダ法 .....	3
1.3.3 赤外線サーモグラフィ法 .....	3
1.3.4 弾性波法 .....	4
1.4 本論文の構成 .....	5
第 2 章 弾性波 .....	6
2.1 概説 .....	6
2.2 種類 .....	6
2.3 弾性波の伝播挙動 .....	7
2.4 減衰 .....	10
2.4.1 拡散減衰 .....	10
2.4.2 非弾性減衰 .....	11
2.5 周波数特性 .....	11
2.5.1 ハンマ励起による波の周波数 .....	11
2.5.2 コンクリート中を伝播する波の周波数 .....	12
2.6 離散フーリエ変換 .....	12
2.7 弾性波波形の特性パラメータ .....	14
2.7.1 到達時間 .....	14
2.7.2 エネルギー .....	14
2.7.3 振幅率 .....	15
第 3 章 弾性波法伝播の数値解析シミュレーション .....	16
3.1 アルゴリズム .....	16
3.2 条件設定 .....	17
3.3 受信波形 .....	17
3.4 解析、結果、および考察 .....	18

3.4.1 P 波 .....	18
3.4.2 R 波 .....	18
3.5 斜めクラック評価シミュレーション .....	19
<b>第 4 章 弾性波法を用いたクラック評価実験 .....</b>	<b>22</b>
4.1 目的 .....	22
4.2 概要 .....	22
4.2.1 供試体 .....	22
4.2.2 測定方法 .....	22
4.2.3 表面波の読み取り .....	23
4.3 実験結果と考察 .....	23
4.3.1 振幅率 .....	24
4.3.2 センサ位置 .....	25
<b>第 5 章 結論 .....</b>	<b>27</b>
5.1 まとめ .....	27
5.1.1 シミュレーション .....	27
5.1.2 実験 .....	28
5.2 今後の検討課題 .....	28
参考文献 .....	30
謝辞 .....	31

# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

近年、橋梁やダム、トンネルなどの土木構造物の老朽化が顕著化し社会問題になっている。既存の土木構造物の維持・管理を行う上で重要なのは、現状の劣化度評価、劣化原因の究明、今後の劣化予測、そして最適な補修・補強工法の選定である。土木構造物の内コンクリート構造物は、我が国が抱える膨大な社会資本ストックの多くを占めており、効果的な維持管理手法の確立が急務とされている。しかし、コンクリートは複合材料であることや様々な環境条件で用いられていることなどが原因で、その劣化予測を定量的に精度良く行うことは容易ではない。コンクリートの劣化には外的・内的に様々な要因があるが、結果的に生じたクラックは劣化程度を判断する指標として様々な機関で多用されている。しかし、クラックの特性評価は容易ではなく内部への進展が定量的に判断できない現状のため、一般に表面で観察できる幅や長さで劣化程度が議論されてきた。

ここで土木構造物のうちトンネルについて考えてみる。トンネルの工法には標準工法と呼ばれている NATM と在来工法と呼ばれている矢板工法の2つの一般的な施工方法が用いられてきた。NATM が導入される 1970 年代後半以前は、鋼製支保工、矢板、覆工で支保する矢板工法が標準工法として広く用いられていたが、それ以降は鋼製支保工、吹付けコンクリート、ロックボルトで支保する NATM が矢板工法に取って代わり標準工法となっている。

NATM では、地盤を掘削し、コンクリートを吹き付け、ロックボルトを打設するという支保工によってトンネルを安定させ、変形が収束した後に、型枠を使用し力学的機能を付加させずに覆工コンクリートを施工することが原則とされている。

矢板工法では、トンネルに作用する荷重を鋼製支保、矢板による支保、そして覆工が一体となり荷重を支えている。したがって、掘削後はできるだけ早期に覆工を施工することを原則とされている。本工法は土圧に対してトンネル覆工の巻立のみで地下空間を支えるために必要以上に覆工巻厚が厚くなるという特徴を有している。

トンネル覆工コンクリートのクラック発生原因は、使用材料、施工方法、使用

条件、および外力の4つに大きく分類することができる。本研究の適用範囲はどちらの工法にも及ぶが、ここでは特に発生原因が明確な施工方法によるコンクリートクラックに着目する。覆工コンクリートは型枠を設置しコンクリートを打ち込む方法で打設されるが、その型枠はコンクリートの漏出を防ぐために、既設覆工コンクリートに5～10 cmほどラップさせて据え付けられる。このラップ時に若材齢の既設コンクリートに対し過度の押し上げを行うと三日月状のひび割れが発生することがある<sup>1)</sup>。この三日月状のひび割れは打継ぎ目地部付近の天端部に発見されることがあり、打継ぎ目と連続する場合や、覆工を貫通する場合などはコンクリート片がはく落し、第三者被害を引き起こす危険がある。

さらに、コンクリート塊のはく落には他の原因も考えられる。複数のクラックが覆工部分を貫通することによって抜け落ちる場合やクラックどうしが交差することによって生じるはく落も考えられる。

実際に、1999年に山陽新幹線ではく落したコンクリート片が走行中の新幹線に直撃するという事故が発生している。このような社会的損失をともなう事故は今後確実に増加するものと予測されており、その健全性を精度良く評価することが維持管理の上で重要な位置を占めている。

このような被害を防ぐために、定期的に点検が以下のように実施されている<sup>2)</sup><sup>3)</sup>。まず、目視点検を実施し、後にその変状がある部分に関しては打音検査を行い濁音部にはマーキングをして、応急措置として叩き落とし作業が行われる。その後、覆工コンクリート表面のひび割れの幅や長さ、その発生場所などの概要と、変状の程度によって健全性が判定されている。図 1.1 に道路トンネルの点検フロー、表 1.1 から表 1.4 に点検と調査結果の判定区分、および判定内容を示す。打音検査は、覆工コンクリートの浮きやはく離箇所を抽出把握するのに有効な方法ではある。しかし、この方法では覆工内部の詳細な変状を把握することは難しく、打音検査は点検結果に個人差が生じやすいという問題点もある。近年では様々な検査方法が提案されているが、現段階では健全性を定量的に評価する有効な手法は確立されていない。

## 1.2 研究の目的

先述のように、トンネル覆工コンクリート部分には第三者被害を引き起こす危

険のあるクラックの発生が多数報告されているが、その健全性判断に必要となる深さ方向のクラック分布を定量的に判断する手法はまだ確立されていない。そこで本研究では、健全性評価に寄与できるトンネル覆工クラックの深さ方向の特性評価に関して研究を進める。そこで、まず弾性波の表面波を中心とした様々な波のモードについて検討を進める。そして、弾性波法によるクラック特性評価の適用性を検討するとともに、今後の課題を抽出する。

### 1.3 既往のコンクリート構造物の劣化診断法

本節では、コンクリート構造物の劣化診断に用いられている非破壊手法を概説し、本研究との関連について述べる。

#### 1.3.1 目視

表面の状態や形状などを目視で確認し、健全性を評価、また、その結果に基づき追加詳細試験の実施やその内容を決定する。本手法は技術と経験が必要である他、明るさの指標として LP (ラインペア) という 1mm の中に何組の線とスペースがあるかを示す指標があり、目視には 3.3LP/mm が必要とされている<sup>4)</sup>。

#### 1.3.2 レーダ法

図 1.2 に示すように、コンクリート内部に向かって電磁波放射するとコンクリートと電気的特性が異なる物質の境界で反射波が生じる。このとき戻ってきた反射波の伝播時間から反射体の位置を推定する手法である<sup>5)</sup>。トンネルでは覆工厚さ、内部欠陥、背面空洞の調査に用いられている。

#### 1.3.3 赤外線サーモグラフィ法

図 1.3 に示すように、コンクリート内部に空洞や浮きが存在する場合、空気層はコンクリートよりも熱抵抗が大きいため、内部への熱伝導が小さくなり表層部の温度変動が大きくなることを利用して、赤外線カメラで健全部と欠陥部の温度差を検知して欠陥部分を特定する手法である<sup>6)</sup>。したがって、表層部に存在する空洞や浮きなどの検出に有効である。

### 1.3.4 弾性波法

#### 1) 打音法

物体を打撃して得られる打撃音から、その物体の物性値や形状、欠陥の有無などを検知する手法である<sup>7)</sup>。打撃音を直接人の耳で聞く場合と音響機器によって測定する場合がある。主に表面付近の浮きやはく離の抽出に有効である。

#### 2) 衝撃弾性波法

コンクリート表面に鋼球やハンマ等で打撃を与え、コンクリート内部の空洞やクラックなどの損傷、および部材端などで発生する反射波を打撃地点近傍に設置したセンサにて測定し、その到達時間とコンクリート弾性波伝播速度から、損傷位置までの深さや部材厚さを求める手法である<sup>8)</sup>。(図 1.4) したがって、コンクリート表面と平行に生じた損傷の検出に有効である。

#### 3) 超音波法

クラック深さ評価手法として、縦波 (P 波) の伝播時間差を用いた手法が最も使用されている。この手法は、弾性波の P 波の伝播特性を利用し、P 波の伝播時間と発信位置、受信位置、クラックの幾何学的関係を用いてクラック深さを算定する手法である。その中の代表として  $T_c - T_0$  法<sup>9)</sup>を以下に紹介する。

$T_c - T_0$ 法では、図 1.5 に示すようにまず試験体の健全部表面で 2 個の超音波センサを間隔  $2a$  で配置し、基準となる伝播時間を決める。次に、センサ 2 個をひび割れが中央になるように間隔  $2a$  で配置し伝播時間を求め、下記の式からクラック深さを求める。

$$d = a\sqrt{(t_c / t_0) - 1} \quad (1.1)$$

ここで、 $d$  : ひび割れ深さ (mm),  $2a$  : 送受両探触子間の距離 (mm),  $t_c$  : ひび割れを挟んで測定した伝播時間 ( $\mu\text{s}$ ),  $t_0$  : 健全部表面での伝播時間 ( $\mu\text{s}$ ) である。

以上、既往の非破壊検査法について概説してきたが、レーダ法や衝撃弾性波法はコンクリート表面と平行な欠陥については有効であるが、垂直方向の欠陥の探査には不向きである。赤外線サーモグラフィ法はコンクリートの表面近傍の欠陥については有効であるがコンクリート内部の探査については精度が下がる。打音

法も音響的特長のみを利用するため、コンクリート内部の探査には適用できず、また、検査者により判断が異なる場合がある。さらに、実際のコンクリートに生じるクラックは、クラック全体が完全に開口しているような理想的な状況だけではなく、**図 1.6** に示すようにクラック内部の介面接触、雨水や粉塵、骨材などが介在している。このようなクラックの深さ推定を超音波法で行うと、接触面や介在物を P 波が伝播することでクラック深さが過小評価されるという問題点がある。また、波動のエネルギーの観点からも、P 波は全体の 10% 程度と非常に小さいため、初動を精度良く読み取ることが困難である場合がある。さらに、垂直方向に進展したクラックを対象に考案されたので、表面と垂直とならない（以下斜めクラックとする）クラックについては考慮されていない。そこで、本研究では P 波に加えて表面波を用いた表面波法について検討を行った。表面波の特徴は第 2 章で説明する。

#### 1.4 本論文の構成

本論文の構成は全 5 章からなる。

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

第 2 章では、弾性波を概説するとともに、弾性波波形の周波数解析手法や特性パラメータを説明する。

第 3 章では、本研究に用いた数値解析手法について説明し、実験結果と数値解析結果とを比較検討し、その適用性を検討する。そして、斜めクラックについて表面波を用いた数値解析を行い、その結果について考察を行う。

第 4 章では、斜めクラックを対象に表面波を用いて実施した室内実験の目的、内容について詳述し、得られた結果について検討する。

第 5 章では、第 3 章と第 4 章のまとめと今後の課題を述べる。

## 第2章 弾性波

本章では、弾性波の種類や特徴、コンクリート中を伝播する弾性波の特徴などを述べ、本研究で中心に検討した表面波について述べる。そして、用いた解析手法や特性パラメータなどの説明を行う。

### 2.1 概説

弾性波動とは、弾性体（物体に力を加えると変形し、その力を取り除くと元の形に戻り変形を残さない物質）内を伝わる波のことで、地震波も弾性波動の1つである。

### 2.2 種類

無限に広がる一様な等方弾性体中を伝播する波には、縦波（P波）と横波（S波）の2種類が存在する。さらに弾性体が表面をもつ場合は、表面を沿って伝播する波である表面波（R波）が存在し、また弾性体の厚さ励起した弾性波の波長より小さい場合には板波（ラム波）が発生する。このような波の種類を振動モードという。また試験体の表面、他の物質との境界面、および試験体内の欠陥箇所などで振動モードが変化することをモード変換という。以下に各振動モードについて述べる。

#### 1) 縦波

縦波とは粒子の振動が波の伝播する方向と平行な方向、すなわち縦方向に生じる波のことで、粒子が粗密を繰り返しながら伝播する。粒子が密になっている部分と疎になっている部分が一定の間隔となっており、密と密あるいは疎と疎の間の距離を波長という。縦波はP波、粗密波、あるいは圧縮波とも呼ばれている。この波は体積変化が可能な媒質であれば伝播するので、固体、液体、および気体の中を伝播することが可能であり、弾性波の中では速度が最大である。また、弾性波の中でP波のエネルギーは全体の約10%を占める。

## 2) 横波

横波とは粒子の振動が波の伝播する方向と直角（垂直）な方向、すなわち横方向に生じる波のことで、表面と平行に加えられたひずみが、その方向を変えながら繰り返されて伝播する。横波は S 波、あるいはせん断波とも呼ばれている。この波は固体中では伝播するが、せん断弾性がない液体および気体中ではひずみを戻す作用が起らないので伝播しない。また、弾性波の中で S 波のエネルギーは全体の約 20% を占める。

## 3) 表面波

表面波とは材料の表面部分のみを伝播する波のことで、最初の発見者の名をとってレイリー波、あるいは R 波と呼ばれている。表面波はコンクリートの場合、表面から約 1 波長分の浅い層にエネルギーの大部分が集中する。表面付近の粒子の挙動には、表面に対して平行に動く縦振動（粗密）と表面に対して上下方向に動く横振動（横ずれ）がある。したがって、伝播時にはこれらが合成されたような楕円状の動きをする。表面波は反射境界面を持つ反無限弾性体を伝播するため、そのエネルギーは円柱状に伝播する。また、表面波のエネルギーは弾性波の中で最大で、全体の約 70% を占めている。さらに、実体波よりも減衰しにくいという特徴がある。このように表面波のエネルギーは大きく、かつ、減衰しにくいという特徴がある。これらは、実際の計測時に波動がより遠方まで伝播させることが可能といえ広範囲な計測が可能な波モードといえる。したがって、本研究では特に表面波に着目して検討を進める。

## 4) 板波（ラム波）

板波とは波の伝播方向と直角（垂直）な断面の寸法が波長と同程度になると、側面で反射した波が互いに干渉することで生じる被導波である。板、棒、管などを伝播する被導波は、すべて板波と呼ばれる。特に、板を伝播する波はラム波と呼ばれ、対称モード S と非対称 A モードがあり、表面波と同様に楕円状の動きを示す。

## 2.3 弾性波の伝播挙動<sup>10)</sup>

3次元の弾性体に加わる応力( $\sigma$ )は、**図 2.1**に示すように、 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ を垂直応力、 $\tau$ をせん断応力とすると式(2.1)のように表すことができる

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ここで、局所的な回転がなく弾性体が静止するためには、式(2.2)が成り立つため応力( $\sigma$ )の独立成分は6個である。

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}, \quad \tau_{zx} = \tau_{xz}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} \quad (2.2)$$

応力と慣性力とのつり合いから、以下の運動方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.3)$$

ここで、 $u$ 、 $v$ 、 $w$ は $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向の変位であり、 $\rho$ は媒体の密度である。式(2.3)の右辺を変位の関数として表すために、応力とひずみの間のフックの法則と呼ばれる線形関係とLameの定数( $\lambda$ 、 $\mu$ )を用いた以下の関係を用いる。

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, & \tau_{yz} &= \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \sigma_y &= \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, & \tau_{zx} &= \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \sigma_z &= \lambda \Delta + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}, & \tau_{xy} &= \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

ここで、

$$\lambda = \frac{E\nu}{(\nu+1)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(\nu+1)} \quad (2.5)$$

$$\Delta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (2.6)$$

式(2.4)を式(2.3)に代入すれば、以下の直角座標による3次元弾性体内の運動方程式を得ることができる。

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u \\ \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v \\ \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} &= (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w \\ \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \end{aligned} \quad (2.7)$$

式(2.7)に従う波動は2種類の伝播速度を有し、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} C_p &= \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \\ C_s &= \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \end{aligned} \quad (2.8)$$

ここで、 $C_p$ はP波速度、 $C_s$ はS波速度である。さらに2つの速度の比をとると、

$$\frac{C_p}{C_s} = \sqrt{\frac{\lambda}{\mu} + 2} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (2.9)$$

となる。通常 $\lambda$ と $\mu$ は正の値であるので、P波がS波よりも速く伝播することが確認できる。さらに、弾性係数 $E$ 、質量密度 $\rho$ 、ポアソン比 $\nu$ を用いるとP波とS波の波速は次式で示される。

$$C_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.10)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (2.11)$$

以上より、P波は最も速い速度で進行し、S波、R波と続く。理論上、P波、S波、R波の速度の比はポアソン比のみによって決まる。ポアソン比が0.18の場合、S波速度/P波速度は0.62、R波速度/P波速度は0.57となる。

## 2.4 減衰<sup>11)</sup>

### 2.4.1 拡散減衰

無限に広がる一様な弾性体内の一点から発生した弾性波は、非弾性的なエネルギーの吸収がない場合、その波面は伝播とともに大きくなるため、単位面積を通過するエネルギーは減少する。これが拡散減衰と呼ばれるエネルギーの伝播による減衰を示す。

球面波では、球面の表面積は半径を $r$ とすると $4\pi r^2$ であるので、単位体積あたりのエネルギー（ $E$ ）は、距離の増加に伴って $1/4\pi r^2$ で減少する。振幅値（ $A$ ）の二乗がエネルギーに相当することから、この場合の振幅値は $1/r$ に比例して減少する。

一方、表面波では、自由表面に沿って円筒状に広がりながら伝播するので、波面は $2\pi r$ で広がるため、単位面積あたりのエネルギーは $1/2\pi r$ に比例して減少し、その振幅値は $1/\sqrt{r}$ に比例して減少する。

### 2.4.2 非弾性減衰

弾性波には、媒質が持つエネルギー吸収特性によって減衰する特性がある。材料中でこの減衰の生じる原因としては、主に粘性減衰と散乱減衰が考えられる。

- 粘性減衰

例えば、打設直後や若材齢のコンクリートに自由振動を加えると伝播とともに急激に振動が小さくなる。これは材料の粘性的特性に起因した内部摩擦によってエネルギーが消費されるためで、この現象を粘性減衰という。

- 散乱減衰

材料の不均質さに起因する減衰で、例えばコンクリートでは、骨材の配合条件、粒径、岩質などに依存しているため、一意的に実際の理論式を確立するのは困難である。また、散乱減衰は骨材の粒径と比較して、十分に大きい波長の弾性波であれば無視できるとされる。

## 2.5 周波数特性

### 2.5.1 ハンマ励起による波の周波数<sup>12)</sup>

弾性体に対する発振の方法を鋼球ハンマにした場合、鋼球ハンマの球径を変化させることで、励起させる弾性波の上限周波数を変化させることができる。

図 2.2 に示すように、鋼球ハンマと弾性体との接触時間により励起させる半波長の波が決定する。そして、その接触時間は鋼球ハンマの直径により式(2.12)のように表すことができる。

$$t_c = 0.0043D$$

$$t_c: \text{接触時間} \quad (2.12)$$

$$D: \text{鋼球ハンマの直径}$$

図 2.2 で表される波をフーリエ変換することで、図 2.3 のように周波数分布を得ることができる。同図より、励起された波には  $1.5/t_c$  以上の周波数は含まれてお

らず、またそれ以上の周波数での振幅は相対的に小さい値といえる。以上のように弾性波の振幅のほとんどが  $1.25/t_c$  以下の周波数帯に存在するということが実験的に示されている。そこで、励起された波の有効なエネルギーが存在する周波数の最大値を最大周波数として  $f_{\max} = 1.25/t_c$  と定義し、式(2.12)と組み合わせると近似的に  $f_{\max}$  と  $D$  との間には、式(2.13)で表される関係式が成り立つ。

$$f_{\max} = \frac{291}{D} \tag{2.13}$$

$f_{\max}$ : 最大周波数  
 $D$ : 鋼球ハンマの直径

式(2.13)より、鋼球ハンマの球径を変化させることで周波数分布を変化させることができる。同様に表面波の波長も鋼球径により変化させることができるので、表面波の深度方向の影響範囲もある程度同様に制御できる。本研究では、以上より示した意図した弾性波周波数（波長）の励起手法とその特徴を利用して研究を進める。

### 2.5.2 コンクリート中を伝播する波の周波数

基本的にコンクリートは、セメント、骨材、水、混和材料および空隙により構成されている不均質な複合材料である。これはトンネル覆工コンクリートでも同様である。したがって、金属などの均質材料に比べ、コンクリートは、特にモルタル部と粗骨材や空隙との境界面など、音響インピーダンス（密度と弾性波速度の積）の異なる物質どうしの境界面が数多く存在するため、弾性波の減衰が著しい。一般に、弾性波では高周波は減衰しやすく、低周波は減衰しにくいいため、コンクリートではより低周波数帯の弾性波を利用すると広範な計測が可能となる。本研究では周波数が低周波数帯に移行すると表面波の波長が大きくなり、エネルギーの影響範囲が大きくなるため、より深いクラックに適応できるものと考えている。

## 2.6 離散フーリエ変換<sup>13)</sup>

一般に波動現象が記録された信号波形に対しての波形解析は、スペクトル分析を示していることが多い。超音波法で用いる波形もスペクトル分析することによって、波形に含まれる周波数成分が判断できる。離散フーリエ変換の概念から任意の連続関数  $f(t)$  は、以下のような離散フーリエ変換された関数  $F(f)$  との関係が成立する。

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.14)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f) e^{i2\pi ft} df \quad (2.15)$$

式(2.14)は離散フーリエ変換、式(2.15)はフーリエ逆変換として知られている。スペクトル分析では、一般に  $F(f)$  の絶対値をとった  $|F(f)|$  をフーリエスペクトル、 $f(t)$  の継続時間を  $Td$  として  $\frac{1}{Td} |F(f)|^2$  がパワースペクトルと呼ばれている。波形の記録は、サンプリング間隔  $Td$  の時系列デジタル量として記録され、機器によっては波形の  $F_s = \frac{1}{\Delta t}$  としてサンプリング周波数と呼ばれることもある。たとえば、 $1 \mu\text{s}$  のサンプリング時間間隔のことを、サンプリング周波数  $1 \text{ MHz}$  と表現することもある。

スペクトル分析を行うには、式(2.14)にしたがって離散フーリエ変換を得ることが必要である。ところが、この場合  $f(t)$  がデジタル量として与えられているので、このようなデジタル量に対する離散フーリエ変換を高速に遂行する手段として開発されているのが FFT (Fast Fourier Transform) 法である。

FFT 法は、サンプリング間隔  $\Delta t$ 、サンプル数  $N$  (ただし、 $N$  は 2 のべき乗； $N=2^M$ ) の時系列デジタル量  $x_m = x(m\Delta t)$  に対する有限離散フーリエ変換および逆変換を実行するもので、式(2.16)、式(2.17)は以下ようになる。

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{\frac{i2\pi km}{N}} \quad (2.16)$$

$$x_m = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} C_k e^{\frac{i2\pi km}{N}} \quad (2.17)$$

このとき、フーリエスペクトル、パワースペクトルはそれぞれ  $N\Delta T|C_k|$ 、 $N\Delta T|C_k|^2$ 、で与えられる。ここで、注意すべきは前述のようにサンプル数  $N$  が 2 のべき乗でなければならないということである。スペクトル各点は、時系列の区間  $\Delta T$  に対して、 $\Delta f = 1/(N\Delta t)$  ごとに与えられ、 $\Delta f$  のことを基本周波数と呼ぶ。式(2.16)より、 $x_m$  の  $N$  個のデータから  $N$  個の複素数  $C_k$  が得られる。複素数は実数部と虚数部より成り立つので  $N$  個のデータからは  $2N$  個の係数が決定されているように見える。これは、 $e^{\frac{i2\pi km}{N}}$  の性質から実際は  $C_k$  の実数部は  $f_{N/2} = N/2 \times \Delta f$  の  $N$  個の中心周波数に対して対称、虚数部は逆対称となっている。スペクトル  $N\Delta T|C_k|$  あるいは  $N\Delta T|C_k|^2$  は、 $f_{N/2}$  はスペクトル分析可能な上限の周波数で *Nyquist* 周波数と呼ばれている。 $f_{N/2} = N/2 \times \Delta f = 1/(2\Delta T)$  であるから、サンプリング間隔より、スペクトル分析の *Nyquist* 周波数は高くなるが、サンプル数が同じであれば基本周波数は大きくなって分析が粗くなる。

## 2.7 弾性波波形の特性パラメータ

### 2.7.1 到達時間

弾性波が送信され、受信されるまでに要する時間を伝播時間といい、受信探触子で検出された時間を到達時間という。一般に、伝播距離が既知の場合、伝播時間から伝播速度が、伝播速度が既知の場合は伝播距離が求められる。

### 2.7.2 エネルギー

計測機器によって定義は異なり、一般的に収録された波形の振幅が  $A_1 - A_n$  の離散データの場合、エネルギー  $E$  は式(2.18)のように定義される。

$$E = \sum_{i=1}^n (A_i)^2 \quad (2.18)$$

### 2.7.3 振幅率

本研究では、クラックを有する試験体での受信センサで収録した振幅を、健全試験体における同じ場所の受信センサで収録した振幅で除した値を振幅率  $F$  と定義する。本研究では、表面波の振幅率と表面波の影響範囲、クラックの垂直深さ、その方向について検討する。図 2.4 に振幅率を得る手順を示す。クラックが存在することによって表面波のエネルギーがクラックを越える部分と越えない部分に分かれるとし、クラック深さによるクラックを越えるエネルギーの変化を振幅率によって読み取ることによってクラック深さを推定するという手法である。

コンクリート材料の配合や使用年数の違いによって、弾性波の減衰の大きさが異なる。振幅率では、クラックを通過した振幅を健全部での振幅で除し、無次元化することで、コンクリート材料の違いによる減衰の影響を小さくした。したがって、材料の配合や使用年数などの違いが結果に与える影響は、振幅率を用いることで極力小さくなると考えられる。

### 第3章 弾性波法伝播の数値解析シミュレーション

本章では、本研究で用いた数値解析シミュレーション（Wave2000）について説明を行う。数値解析シミュレーションで実験条件の事前事後検討を行うことや実験困難な大規模構造物の実験予測への適用を目的としているため、実験と数値解析シミュレーション結果の類似性を確認することで解析の妥当性を検証する。

まず、用いた数値解析ソフトウェアのアルゴリズムについて述べ、次に解析に必要なパラメータを挙げて今回の条件設定を説明した後、既往の研究を用いてシミュレーションを行い、解析結果について考察する。

#### 3.1 アルゴリズム

研究に用いた数値解析ソフト Wave2000（サイバーロジック社製）は二次元の弾性波動方程式について近似解を計算するものである。このアルゴリズムは有限差分法を基本とし、粘性損失も含め、式(3.1)で示す弾性方程式を用いている。

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \left[ \mu + \eta \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla^2 w + \left[ \lambda + \mu + \phi \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\eta}{3} \frac{\partial}{\partial t} \right] \nabla(\nabla \bullet w)$$

$\rho$  : 単位体積重量

$\lambda, \mu$  : ラメ定数

$\eta$  : せん断粘性係数 (3.1)

$\phi$  : 体積粘性係数

$\nabla$  : 勾配演算子

$\nabla \bullet$  : 発散演算子

$t$  : 時間

また、 $w$  は二次元の列ベクトルで、その構成要素は位置  $(x, y)$  での変位の  $x$  成分と  $y$  成分であり、式(3.2)で表せる。

$$w = [w_x(x, y, t) \quad w_y(x, y, t)] \quad (3.2)$$

### 3.2 条件設定

本解析では、単位体積重量、ラメ定数 $\lambda$ 、および $\mu$ により材料の物性を設定する。ラメ定数は式(2.5)を用いて弾性係数とポアソン比から算出し、**図 3.1**に入力する。粘性係数は、コンクリート材料では配合条件により設定が困難なため、本研究では粘性係数は考慮せず、均質なコンクリートモデルとして解析した。

送信波においては、**図 3.2**に示すように弾性波の種類、送信周波数、振幅、時間を設定した。本シミュレーションでは鋼球ハンマの発振を模擬するため送信波をサインパルス波とし、その半波長分を入力した。

また、解析時間の短縮と境界面での反射による波形の読み取りの複雑さを考慮して左右と下面の境界条件を無限延長とした。

### 3.3 受信波形

本解析の受信波形は、縦方向と横方向の振動が別々の波形として出力される。一般にセンサで収録された波形は縦方向と横方向の振動を合成して検知される。そこで、本解析で得られる波形に関しては、先に受信が確認された方向の到達時間をP波の初動到達時間とした。また、表面波の振幅を読み取る場合は、縦方向の振幅値をL、横方向の振幅値をTとすると、受信センサの縦方向と横方向の感度特性を一对一と仮定して、式(3.3)に示すように縦方向と横方向の振幅値の二乗和の平方根をとった値をその時間の振幅値Rと定めた。

$$R = \sqrt{L^2 + T^2} \quad (3.3)$$

さらに境界条件が無限延長であるため、**図 3.3**に示すように反射波の影響を受けない波形が得られる。したがって、基本的にエネルギーが最大となる振幅値をエネルギーが最大である表面波の振幅値とみなした。ここで、P波と表面波の速度の関係がポアソン比により決定するので、最大振幅値が明らかにP波と表面波の到達時間の差と逸脱している場合、P波と表面波の到達時間差を考慮した波形の振幅を表面波の振幅とみなした。

### 3.4 解析、結果、および考察

本節では、用いた解析手法が P 波と表面波の伝播様式を精度良く表現しているかを確認するために、既往の研究による実験結果と解析結果を比較する。そして表面波を用いた解析を行い、結果について検討する。

#### 3.4.1 P 波

P 波伝播の検討には、既往の研究で紹介した  $T_c - T_0$ 法を用いて垂直クラックの数値解析を行い、初動の到達時間からクラック深さを推定した。表 3.1 に用いた物性パラメータ、図 3.4 にクラックとセンサの位置、および詳細設定、図 3.5 に解析結果を示す。

図 3.5 に示す結果より、両者に若干の誤差が確認された。その理由はクラックとセンサの距離をセンサ中心間隔として入力したことで、実際の受感位置を大きく、つまりクラックまでの距離を長く入力したことに起因したものと考えられる。したがって、図 1.5 で示したクラック深さを算出する式の  $a$  の値を大きく取ってしまったために算出されるクラック深さが実際より大きくなったものと考えられる。以上より、センサ位置を最もクラックに近い内縁として計算した。図 3.6 にその結果を示す。この場合、誤差はほとんどなく精度良い結果が得られた。

以上より、本数値解析で、P 波を対象とした波動伝播は正確にシミュレーション可能である。そして、センサの受感位置を正しく入力する必要があることが確かめられた。

#### 3.4.2 R 波

Chai ら<sup>14)</sup> は垂直クラックに関する深さ推定が表面波を用いて可能であることを実験的に示した。その手法は、クラック深さを表面波エネルギーの減衰により推定する手法で、クラックの深さ  $d$  を表面波の影響範囲である波長  $\lambda$  で除した値と振幅率  $F$  は、式(3.4)のような近似式で表現される。

$$d = -a \cdot \lambda \cdot \ln F \quad (3.4)$$

ただし、 $a$  は近似式で求めた定数である。この結果は、コンクリート供試体 (1000 × 1000 × 1000 mm) に深さが 50 ~ 500 mm の垂直クラックを与え、鋼球ハンマによ

り励起した弾性波を測定することで得た実験結果である。コンクリート物性は表 3.2 に示す。センサは図 3.7 のようにクラックの両側に設置し、発振センサで収録した波の周波数について解析することで、送信波を解析するよりも実際に伝播している波をより正確に捉えることができる。

以下、前述の方法を数値解析により検討した。送信周波数は 10、20、40 kHz で行い、その結果を図 3.8 に示す。同図より、解析結果はいずれの周波数でも指数関数的な減衰を示し、図 3.9 のようにそれぞれの送信周波数での結果を重ね合わせても良い相関が得られた。近似した指数関数の定数は図 3.10 に示した実験結果と異なっていたが、同様な減衰傾向を得ることができた。定数が異なった理由としては、数値解析では均質な材料を想定し、また粘性係数を考慮していないこと、更に実験に用いたセンサの感度特性には指向性<sup>15)</sup>があることなどが考えられる。また、全ての結果における個々の計算値もセンサの指向性によってばらつきが発生したと考えられる。一般的なセンサの指向性は、縦方向は感度が良く、横方向の感度は悪い。したがって、センサが受信する波の大きさが等しい場合でも、入射角度によって図 3.11 に示すように振幅値に差異が発生する。しかし、大まかな減衰傾向は本シミュレーションで表現することができており、得られた減衰傾向の近似曲線は有意義なものとする。

以上より、表面波を用いた垂直クラック深さの推定手法を利用した数値解析結果は実際の実験結果の特徴を大過なく表現できていたものと考えられた。

### 3.5 斜めクラック評価シミュレーション

垂直クラックに関するシミュレーション結果は実験結果を包含する特徴を示したので、斜めクラックに対しても同様に解析を行うことにより実験結果の特徴を予測し、表面波法の適用性を検討することが可能であるとする。

斜めクラックのシミュレーションは、図 3.12 に示すように角度がコンクリート表面から 60° と 120° の 2 種類のパターンを行い、合計 6 個のセンサを 6 箇所を設置した。センサ番号は送信センサに近い順から ch1～ch6 とする。同図に示すようにクラックは ch3 と ch4 の間に存在するということになる。各クラック角度に対して垂直クラックでのシミュレーションと同様にそのクラックの垂直深さと表面波の影響範囲である波長  $\lambda$ 、そして振幅率 F について検討した。

得られた結果を、**図 3.13** と **図 3.14** に示す。同図のように各クラック角度において、いずれの受信センサでも振幅率は実験と類似した指数関数的減少を示した。さらに **図 3.15** のようにセンサの位置が同じ解析結果を重ね合わせると ch5 と ch6 では重ね合わせた結果でも  $F$  と  $d/\lambda$  に良い相関が得られた。しかし、ch4 に関しては  $d/\lambda$  が 0.4 以上で良い相関が得られなかった。この原因はセンサとクラックの位置関係にあると考えられる。角度が  $120^\circ$  の場合クラック深さが約 12 cm を越えるとクラックの表面投影が ch4 センサに重なり合うように位置するため、表面波のエネルギーを十分に受信することができなくなり、結果として受信波形の振幅が小さくなったものと考えられる。

ch5 と ch6 に関しては、垂直クラックの実験結果や解析結果と同様に  $F$  は  $d/\lambda$  の増加とともにユニークに減少した。ここで、この斜めクラックの解析結果と前述の垂直クラックの解析結果は同じコンクリート物性であるため、解析条件が等しい両解析結果を重ね合わせた。**図 3.16** にその結果を示す。同図より、表面波の減衰はクラックの深さ方向のみに起因し、角度に依存しないことが推察された。

以上より、表面波の振幅率はクラックの角度によらずクラックの深さのみに起因するが、センサ位置によってはクラックの表面投影にセンサ位置が重なり、得られる波形が大きく減衰し、正確にクラック深さの評価が行えない可能性があることがわかった。したがって、コンクリート表面から内部に進展したクラックが単独で存在する場合には、複数のセンサを設置し、さらにクラックの両側から発信を行うことで減衰傾向を比較すれば、特異な波形からクラックの表面投影に重なっているセンサを確認することができる。そうすることで、ある程度のクラックの傾きを推測することが可能であると考えられる。そして、クラック深さと傾きを同時に推定することでクラックの特性を概ね推測できるものと推察される。

斜めクラックにおける個々の計算値のばらつきも、垂直クラックの場合と同様にセンサの指向性が大きく影響していると考えられる。一例として、クラック角度が  $120^\circ$  における ch4 センサの結果について考察する。**図 3.15**、**16** より ch4 センサではクラック深さが 1~3 cm の場合、振幅率が 1 を越えている。理論的に弾性波はクラックを通過することで減衰し、振幅率が 1 よりも大きくなることは考え難い。ここでクラック深さが 0~3 cm の受信波形を **図 3.17** に示す。同図より、表面波の縦方向振幅はクラック深さが大きくなるほど減衰していることが分かる。一方横方向の振幅は、健全部を伝播する場合に比べるとクラック深さが 1 cm と 2

cm の場合に増幅し、3 cm の場合、ほぼ同じ値になっている。ここで縦方向の受信波形はクラック深さが大きくなっても波形の到達時間はほぼ一定の値をとるが、横方向の受信波形はクラック深さが大きくなるにしたがって到達時間が遅くなっている。ch4 センサでは以上の理由で縦方向と横方向の振幅が重なり、振幅率が 1 を越える結果となったものと考えられる。

実際のセンサは先述のように、縦方向と横方向で感度の異なる指向性を有するので、本シミュレーションのような距離による振幅値の増幅は生じ得ないもの

と考える。仮に縦方向と横方向の指向性が二対一の場合を考え、 $R = \sqrt{L^2 + (\frac{1}{2}T)^2}$  と表現すると、**図 3.18** のようにいずれも振幅率が 1 よりも小さくなり深さが大きくなるに従って減衰が大きくなった。したがって弾性波の検出シミュレーションを行う場合、実際に用いるセンサの指向性を考慮して振幅値を算出する必要がある。

## 第4章 弾性波法を用いたクラック評価実験

### 4.1 目的

トンネル覆工などコンクリート構造物に生じたクラックには、以下に示す様々な特性がある。例えば、クラックが垂直ではなく斜め方向に生じている場合や、クラック内部に接触面や雨水、骨材などの介在物がある場合などがある。

第3章で述べたように、現在までに弾性波の表面波を用いることで垂直クラックの深さが推定できるという成果が得られている。また本論文では、表面波を用いた数値解析シミュレーションで、垂直クラックのみならず、斜めクラックに対しても同シミュレーションの有効性が確認できた。ここでは、実験的に表面波による斜めクラックの深さ推定手法を検討する。

### 4.2 概要

#### 4.2.1 供試体

実験は、健全供試体と人工的に与えた斜めクラックを有する供試体を用いた。供試体は  $150 \times 150 \times 530$  (mm) の角柱供試体で、擬似クラック（スリット）は 5 mm のテフロンシートを貼り付けた木板を打設前に設置し、コンクリートの硬化後に引き抜くことにより作製した。スリットの垂直深さが 40 mm と一定になるように、垂直方向から  $30^\circ$  ,  $45^\circ$  ,  $60^\circ$  の角度をつけた三つの供試体を作製した。コンクリートの物性値を表 4.1 に示す。

#### 4.2.2 測定方法

実験に用いた器機を図 4.1 に示す。弾性波の信号処理・記録には MISTRAS 2001 (PAC 社製) を用い、受信探触子には 60 kHz 共振型 AE センサ (R6、PAC 社製、直径 30 mm) を使用した。探触子の設置には、コンクリート表面をサンドペーパーにより平滑に処理した後、高真空シリコングリス (HIVAC-G、信越化学工業社製) を介して、各センサを設置した。

受信探触子の配置は図 4.2 で示すように健全供試体では 7 個、斜めクラックを有する供試体には 6 個設置した。センサ間隔は表面クラック位置を基準として 50

mm 間隔である。

発振には擬似信号発生器（PUNDIT、C.N.S. INSTRUMENTS LTD 社製）を用いた。クラック位置の左右で発振を行い、発振場所は両端のセンサよりさらに 50 mm 外側とした。つまり、両側発振のため合計 6 つの角度について実験を行ったことになる。用いたセンサは、簡単のために、左右どちらの発振であってもパルサに近い順に ch1～ch6 とした。ここで、発振にはハンマを用いずパルサとした。それは、供試体寸法が小さいためハンマ励起により得られる弾性波の波長が板厚に比べて大きいため板波が生じる可能性が高いこと、人力による打撃は安定した出力が得られず、かつ供試体全体を振動させ、たわみ共振により受信波が複雑になることなどが考えられたためである。

受信波形の収録は、トリガーセンサ（今回の場合、送信センサに最も近い受信センサ）がしきい値設定を越える波を受信した時間を基準に他のセンサを同期させて収録した。収録される波形は、受信開始から -100  $\mu\text{s}$  の時間から 1279.75  $\mu\text{s}$  までとし、サンプリング周波数は 4 MHz である。

#### 4.2.3 表面波の読み取り

受信波形での表面波の読み取りは、P 波と表面波の速度の関係を用いて読み取る。第 2 章で述べたように P 波速度と R 波速度の比はポアソン比によって決まっており、ポアソン比を 0.18 と考えると P 波速度/R 波速度は 0.57 である。したがって、**図 4.3** から **図 4.10** に示すようにクラックとパルサとの間のセンサによって P 波の初動時刻を結ぶ直線と R 波の最大振幅の時刻を結ぶ直線を引き、残りのセンサは初動時刻を求めた初動の直線に合わせることによって表面波の振幅を求めた。

### 4.3 実験結果と考察

実験で得られた表面波を用いて解析し、以下にその結果について考察する。さらに、センサが複数あるためそれぞれのセンサについて振幅率を比較し、センサの位置による振幅の影響も検討する。

#### 4.3.1 振幅率

本実験では斜めクラックの角度は様々に変化させたが深さは一定とした。以下、クラック角度を変化させ表面波の振幅率を検討する。仮に表面波の減衰がクラックの角度によらずクラック深さにのみ決定されるとすれば、クラック角度に依存せず振幅率は一定となる。実験によりそのことが確認できれば、斜めクラックに関しても垂直クラックと同様に、振幅率と波長とクラック深さの關係に類似する相関關係が得られる可能性が考えられた。

発信に用いたパルスより安定した波が発信されていたので、まず振幅率のみを考え、**図 4.11**に示すように各センサにおける角度毎の振幅率を算出した。同図より、まず全てのセンサでばらつきが確認でき、**ch6** センサにおいては全ての角度で振幅率が 1 を越えている。弾性波の減衰特性から、同じモードの波の振幅率が 1 を越えることは考え難い。ここで考えられるのは供試体寸法が小さいためにエネルギーの大きい反射波や回折波がモード変換や位相反転してしまい、表面波に含まれた可能性が考えられる。そこで、反射波が表面波に影響を及ぼす可能性を検討するために数値解析を行った。

まず、同じ物性で左右と下面の境界条件を無限延長とした解析を行い、次に境界条件をなくし、反射波を考慮した解析を行った。それぞれの結果を**図 4.12**から**図 4.14**に示す。初動の振幅には違いは見られないが、それ以降の波形には、縦振動と横振動を合成することにより、各センサで明らかな違いが見られる。本シミュレーションは粘性減衰を考慮していないので実際の減衰特性を必ずしも完全表現はしていないが、実験の供試体寸法による反射波が検出波形に大きく影響する可能性が確認できた。したがって、表面波の振幅のみを精度よく測定するにはある程度大きい供試体で測定を行う必要があると考えられる。実際に垂直クラックの深さ推定実験には大きい供試体を用いられている。

ここで、送信探触子側のクラック近傍のセンサの受信波形を FFT することで周波数解析し、表面波の波長を求め、実験結果を振幅率と波長によりまとめた。**図 4.15**に振幅率が 1 以下であった **ch4**、**5**の結果は示す。ここでも  $F$  と  $d/\lambda$  は良い相関を示さなかった。やはり、供試体寸法が小さいため反射波の影響が大きいと考えられる。さらに供試体寸法以外には発振方法の違いに注目してみる。垂直クラックの深さ推定実験では、鋼球ハンマによって弾性波が励起されたが、本実験ではパルスによって弾性波が励起された。両発振方法で励起される弾性波の周波数

は、鋼球ハンマの直径が 25 mm と 35 mm の場合、重心周波数は順に約 6.5 kHz、約 4.2 kHz となるため、波長は順に約 350 mm、約 540 mm となる。一方、本実験で用いたパルサの場合、周波数は約 40 kHz となるため、波長は約 60 mm となる。つまり、発振方法の相違が励起エネルギーや影響深度につながるため、発振方法による伝播する波の違いが実験結果に反映された可能性が考えられる。

以上のように、反射波の影響、発振方法、および波の影響深度とエネルギーの問題から、今後反射波の影響を無視でき、かつ板波が生成しない程度の供試体寸法における実験を行い、表面波を用いたクラック深さ推定手法の実用性や適応性を検証していく必要があると考えられる。

#### 4.3.2 センサ位置

##### 1) 表面波

実験ではクラック角度が 120 度のとき、**図 4.3** に示すように受信センサ ch4 をクラックの表面投影に重なっている。このことが受信波形に与えた影響を検討する。**図 4.16** に各受信センサにおける全体の波形、**図 4.17** に各受信センサにおける前半部分 ( $0 \sim 6 \times 10^{-4}$  sec) の波形を示す。各センサの受信波形を**図 4.17** より比べると、ch5 や ch6 に比べて ch4 の振幅が小さい。本来、送信センサからの距離が離れるほど弾性波エネルギーは減衰するので ch4 の振幅の方が ch5、6 に比べて大きくなるはずである。これはクラックの表面投影がセンサ位置に重なることにより受信波のエネルギーが小さくなり、その結果得られた振幅が小さくなったと考えられる。このように複数センサを配置すると、クラックの表面投影とセンサ位置からクラックの傾斜方向を推測することが可能である。また、クラックの両側から発振しその波形を比較することで、さらに正確にクラックの特性を検討することが可能である。

##### 2) P 波

P 波について到達時間によるクラックの傾きの評価を行う。**図 4.18** のようにまず隣り合ったセンサの数字が一つ大きいセンサの到達時間から一つ小さいセンサの到達時間の差を求める。その二つのセンサ間隔を求めた到達時間差で除した値を見かけの速度として、ch1-ch2 から ch5-ch6 の見かけの速度を  $V_1 \sim V_5$  とする。健全供試体での見かけの速度を**図 4.19** に、クラックの角度が  $30^\circ \sim 60^\circ$  の場合の見

かけの速度を図 4.20 に、 $120^\circ \sim 150^\circ$  の場合の見かけの速度を図 4.21 と図 4.22 に示す。図 4.19 より、健全供試体ではクラックが存在しないのでほぼ一定値となっているが、クラック角度が ch4 センサ側に傾いている図 4.20 では  $V_3$  が小さくなり  $V_4$  は大きくなるか、負の値となる。これは  $V_3$  に関しては図 4.23 に示すようにクラックが ch4 センサ側に傾くことにより伝播距離が長くなることで見かけの速度が小さくなる結果が得られたものと考えられる。また  $V_4$  に関してはクラックの先端が ch4 センサ側に傾くことでクラック先端から ch4 センサまでの距離と ch5 センサまでの距離の差が小さくなるため速度が大きくなったと考えられる。さらに角度が  $150^\circ$  の場合、クラック先端が ch4 センサよりも ch5 センサに近くなったため到達時間が ch5 センサの方が早くなり見かけの速度がマイナスになったと考えられる。クラックが ch3 側に傾いている場合、図 4.24 に示すように実際の伝播距離はセンサ間隔よりも大きくなるが ch4 側に傾いた場合よりも伝播距離差が小さいため、見かけの速度が大きく影響しなかった。

この手法を用いると、クラックが完全に開口している場合はクラック先端の範囲を絞ることができる。仮に、クラック内部に接触部分や介在物等が存在しても、介在物が存在する水平方向の範囲を絞ることができるため、クラックの進展方向は推定することができる。また、クラックが曲線の場合も同様のことが言える。

以上より、クラックの両側から発振することで見かけの速度  $V_3$  と  $V_4$  をそれぞれ 2 つ求め、同じ経路の見かけの速度を比較することで、クラックの傾斜方向を推測することが可能である。

## 第5章 結論

本章では、第3章の数値解析結果の検討内容と第4章の実験結果の検討内容について述べる。最後に今後の課題について言及し、今後の研究に繋げるものとする。

### 5.1 まとめ

#### 5.1.1 シミュレーション

第3章では数値解析結果の考察について述べた。得られた結論として以下が挙げられる。

- 数値解析シミュレーションは、均質な材料で粘性減衰を考慮しない理想的なモデルの場合、P波の波動伝播を正確にシミュレーションし、精度良い結果を示した。P波を考える場合、センサ間隔の取り方によってクラック深さの算出誤差が生まれるため、センサの受感位置を考慮したセンサ間隔を正しく設定する必要があることが確認できた。
- クラックの深さを表面波エネルギーの減衰により推定する手法を利用して数値解析を行うと、解析結果が実験結果と類似した指数関数的な減衰傾向を示した。数値解析は均質な材料を模擬し、粘性減衰も考慮していないため、減衰曲線の傾きは数値解析と実験で異なっているが、特徴が類似している点で数値解析結果は実験結果の特徴を大過なく表現できると考え、実験結果の特徴の予測に数値解析を活用できる可能性があることを示した。
- 斜めクラックに対しても表面波を用いた同手法で数値解析を行うと、垂直クラックと同様な減衰曲線が結果として得られた。したがって、斜めクラックにも垂直クラックと同様に表面波を用いてクラック深さを推定できる可能性があることを示した。
- クラックの表面投影が受信センサに重なるようにクラックが生じていると表面波の減衰が大きくなるため、最適な減衰曲線を選択するためには複数のセンサを設置する必要があるため、複数センサを設置することで特異な減衰を起こしているセンサからクラックの傾斜をある程度推測することが可能である。

- 実験の受信波形が一つなのに対し、シミュレーションの受信波形は縦方向と横方向の振幅に分かれている。したがって、数値解析では実験に使用されるセンサの指向性を考慮して振幅値を算出する必要がある。

### 5.1.2 実験

第4章で実験結果、解析結果、および考察を述べた。得られた結論として以下が挙げられる。

- 実験に用いた供試体寸法が小さいことにより表面波の受信波形が反射波の影響を受けた可能性がある。また表面波を用いた垂直クラックの深さ推定実験に使用した鋼球ハンマが今回使用できなかった原因も供試体寸法が小さいためであるので、大きな供試体による実験が必要だと考えられる。
- 本実験ではクラックの傾斜がコンクリート表面から  $30^\circ$  傾いたクラックの場合、クラックの表面投影が受信センサに重なることにより受信波形の前半部分が減衰した。そこで、複数のセンサを配置することで減衰が大きいセンサの確認が可能となり、クラックの傾斜もある程度推測することが可能である。
- P波についても見かけの速度を求めることにより、健全部におけるP波の速度と比較した見かけの速度の大小や符号によってクラックがどちらに傾斜しているかを判断できる。クラック内部に接触部分や介在物が存在しなければ、クラック先端をP波が回折するため、水平方向の位置推定が可能である。仮に接触部分や介在物が存在しても、クラックの傾斜は確認できると考えられる。

### 5.2 今後の検討課題

以下に今後の検討課題を列挙し、それぞれについて検証する必要がある。

- 数値解析でより実験を模擬するために、文献調査や試行錯誤を行い粘性係数の設定方法を確立する必要がある。
- 本実験で使用したセンサの指向性を考慮した縦方向と横方向の振幅からなるベクトルの大きさを振幅値とする方法はエネルギーの点は考慮できているが、位相を考慮できていない問題がある。したがって、縦方向と横方向の振幅に

区別されているシミュレーションの受信波形を用いた精度良い実験の受信波形の表現方法を検討する必要がある。

- 大きい寸法の供試体を用いて、斜めクラックについて表面波を用いたクラック深さ推定が可能であるかを確認する実験を行う必要がある。また供試体作製時に必要なクラック角度を検討する必要がある。
- 本実験ではクラックの傾斜がコンクリート表面から  $30^\circ$  傾いたクラックの場合にクラックの表面投影がセンサに重なることにより減衰を確認できたが、クラックの傾きがコンクリート表面と垂直方向に変化し、クラックの全長が長くなることで表面投影がセンサに重なった場合など、クラックの角度によるセンサの表面投影の重なり方の違いによって減衰が確認できるかどうかを確認する必要がある。
- 複数のセンサを設置する場合、最適なセンサ配置を検討する必要がある。
- P波の見かけの速度を求める手法は、P波の影響範囲に限界があるため、適応可能なクラック長さを確認する必要がある。
- P波での深さ推定での問題となったクラック内部に接触部分が存在する場合や介在物が存在する場合に表面波法が適用できるかを確認する実験を行う必要がある。さらにクラック内部に接触部分がある場合減衰曲線はどのように変化するのか、また接触割合によって減衰曲線はどのように推移するのかを確認する必要がある。
- クラック内部の接触率を表現できる指標となるものを見つける必要がある。例としてはクラックの開口幅などが挙げられるが要検討課題である。
- 非破壊検査全般にいえることであるが、センサで受信した波形は間接的な情報であるため、内部が異なる状態である場合でも、波形の情報は等しい場合が考えられる。今回の解析・実験は内部の状態を認識した上で検討を行っているため、内部の状態が未知である場合に内部の形状を判断する方法を確立する必要がある。
- 実際の現場では覆工表面が粗い場合や覆工内部に多くの損傷が存在する場合があるので、表面波を用いたクラック特性評価が可能であるか確認する必要がある。

## 参考文献

- 1) 日本鉄道建設業協会：最近のトンネル覆工コンクリート施工技術の動向と課題， pp.187， 2004
- 2) 道路保全技術センター：道路トンネル点検・補修の手引き， 2001
- 3) 国土交通省道路局国道課：道路トンネル定期点検要領（案）， pp.20-22， 2002
- 4) JSNDI 編：イラストで学ぶ非破壊試験入門，日本非破壊検査協会， pp.100， 2001
- 5) 西尾壮平， 谷川恭雄， 森博嗣， 黒川善幸：電磁波レーダ法によるコンクリートの内部探査に関する有限時間領域差分法解析，日本建築学会構造系論文集，第 557 号， pp.29-30， 2002
- 6) 魚本健人， 加藤佳孝， 共編：コンクリート構造診断工学， pp.77-78， 2008
- 7) 日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第 3 部：打音法， pp.7-15， 2009
- 8) 日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第 2 部：衝撃弾性波法， pp.30-31， pp.36-41， 2009
- 9) 日本非破壊検査協会：コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第 1 部：超音波法， pp.27-28， 2009
- 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.100-104， 2004
- 11) 渡辺健：コンクリートの弾性波動理論と欠陥評価に関する研究， pp.35-36， 2001
- 12) Mary J. Sansalone, William B. Streett: IMPACT-ECHO, Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, pp.30-34, 1997
- 13) 塩谷智基：地盤内破壊評価法へのアコースティック・エミッションの適用に関する研究，とびしま技報別冊第 5 号， pp.69-70， 1998
- 14) 蔡華堅， 桃木昌平， 塩谷智基：Rayleigh 波減衰特性によるコンクリートひび割れの定量評価に関する基礎研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文集，社団法人日本材料学会，第 9 巻， pp.25-30， 2009.10
- 15) 中村僖良編：超音波，日本音響学会編音響工学講座 8，コロナ社， pp.26-28， 2001

## 謝辞

本論文の作成にあたって数多くの方々にご指導して頂き、生活面においてもお世話して頂いたことで大変充実した1年を過ごすことができました。

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・大津宏康教授には、困った時は原点に戻れというアドバイスや的確なご指摘をいただき、研究を進めることができましたことを深く感謝致します。

京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻・三村衛准教授には、本論文の副査を務めていただき、不十分な部分について質問をいただくことで本論文を充実させることができました。心から感謝致します。

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・塩谷智基准教授には、物わかりの悪い筆者に対し根気強く丁寧にご指導して頂いたことで無事に今回の論文を書き上げることができました。心からお礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・稲積真哉助教授には、研究面だけでなく生活面においても研究に集中できる環境を作っていただきましたことに感謝致します。

飛島建設株式会社・蔡華堅氏、桃木昌平氏には、年末の忙しい時期に実験を行える環境を作っていただくと共に、ご多忙の中においても度重なる質問にも親切にお答えいただきました。また、お二方のみならず同社技術研究所の皆様には大変お世話になりました。心からお礼申し上げます。

伊東宏美秘書、大津研究室の諸先輩方、ならびに同回生の方々のおかげで、非常に有意義であり、笑いの絶えない楽しい研究生活を送ることができました。本当にありがとうございました。

最後に、大学で勉強できるという環境を与えていただき、あらゆる面においてサポートしていただいた両親をはじめとする家族に心から感謝の意を表します。

表1.1 道路トンネル定期点検判定区分

判定区分	判定の内容
A: 応急対策	変状が著しく、通行車両の安全を確保できないと判断され、応急対策を実施した上で補修・補強対策の要否を検討する標準調査が必要な場合
B: 調査	変状があり、応急対策は必要としないが補修・補強対策の要否を検討する標準調査が必要な場合
S: 対策不要	変状はないか、あっても軽微で応急対策や標準調査の必要がない場合

出典：国土交通省道路局「道路トンネル定期点検要領」より

表1.2 道路トンネル定期点検判定基準（覆工部分）

変状の種類	判定区分A	判定区分B
ひび割れ、段差	急激にひび割れが進行し、ブロック化して落下する恐れがあるもの	天端、肩部で幅3mm以上、延長方向に5mm以上の規模を有するもの
うき、はく離、はく落	コンクリートのはく離がある場合、うきの部分がはく落する恐れのあるもの	はく落に結びつく、うき(圧ざ)があるもの
傾き、沈下、変形	目視により明らかに傾き、沈下、変形があるもの	左記の場合で交通に支障がない場合
打継目の目地切れ、段差	止水板や目地モルタルが落下する恐れがあるもの	左記の場合で交通に支障がない場合
漏水、つらら、遊離石灰	大規模な漏水、つらら、側氷があるもの	左記の場合で交通に支障がない場合

出典：国土交通省道路局「道路トンネル定期点検要領」より

表1.3 道路トンネル調査結果判定方法（第三者被害を誘発する変状）

判定区分Ⅰ	判定の内容
3A-Ⅰ	変状が大きく、通行者・通行車両に対して危険があるため、 <b>直ちになんらかの対策</b> を必要とするもの。
2A-Ⅰ	変状があり、それが進行して、早晚、通行者・通行車両に対して危険を与えるため、 <b>早急に対策</b> を必要とするもの。
A-Ⅰ	変状があり、将来、通行者・通行車両に対して危険を与える可能性があるため、 <b>必要に応じて対策工を計画的に</b> 実施するもの。
B-Ⅰ	変状があっても軽微な変状で、現状では通行者・通行車両に対して大きな影響はなく、日常点検での注視を実施するもの。

出典:「道路トンネル点検・補修の手引き」より

表1.4 道路トンネル調査結果判定方法（構造的な変状）

判定区分Ⅱ	判定の内容
3A-Ⅱ	変状が大きく、トンネル構造自体の安定に問題があり、 <b>早急に対策</b> を必要とするもの。
2A-Ⅱ	変状があり、それが進行して、トンネル構造自体の安定に問題が生じるため、 <b>計画的に対策</b> を必要とするもの。
A-Ⅱ	変状があり、将来的にトンネル構造自体の安定に問題が生じる可能性があると考えられ、 <b>継続的な調査</b> または調査項目を追加し <b>再調査</b> を必要とするもの。
B-Ⅱ	軽微な変状で、現状ではトンネル構造の安定に問題はなく日常点検での注視を実施するもの。

出典:「道路トンネル点検・補修の手引き」より

**表3.1 シミュレーション物性**

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Young modulus (GPa)	Poisson's ratio
Concrete	2.38	33.0	0.210

**表3.2 コンクリート物性**

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Young modulus (GPa)	Poisson's ratio
Concrete	2.38	33.0	0.210

**表4.1 コンクリート物性**

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Young modulus (GPa)	Poisson's ratio
Concrete	2.30	28.2	0.18

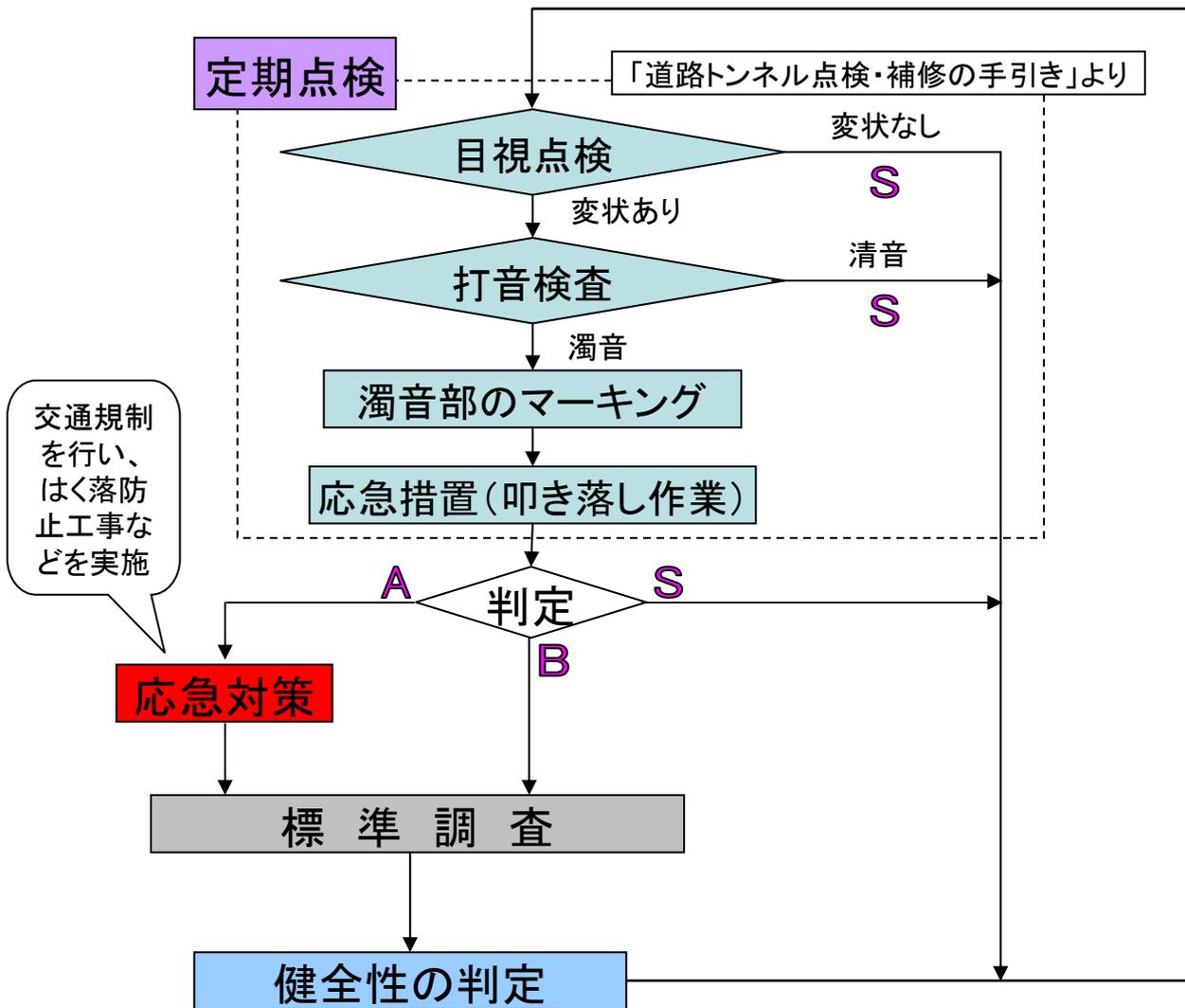


図1.1 道路トンネル点検フロー

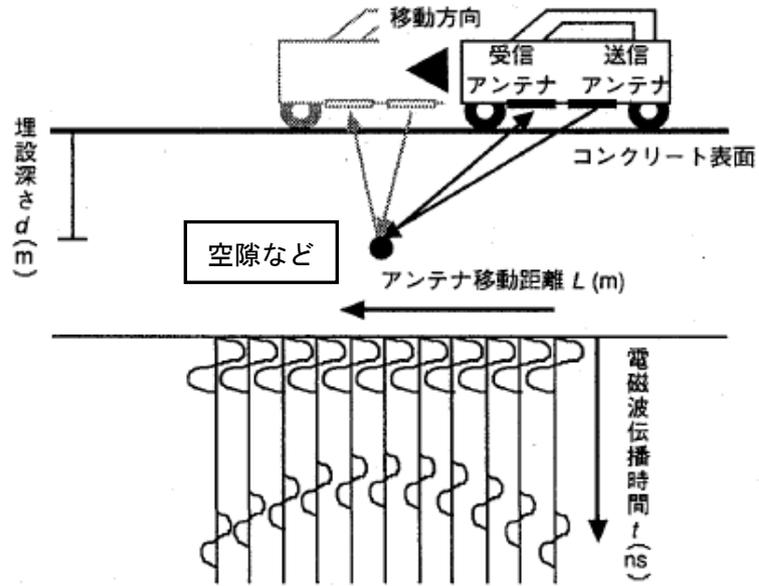


図1.2 レーダ法

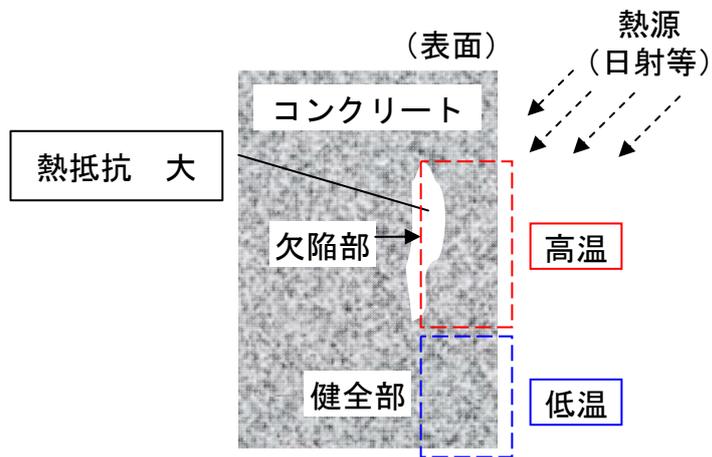


図1.3 赤外線サーモグラフィ法

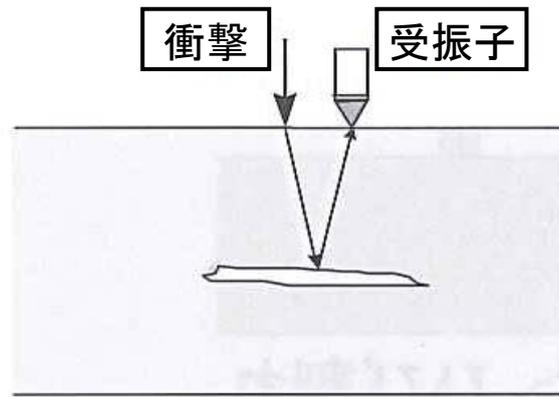
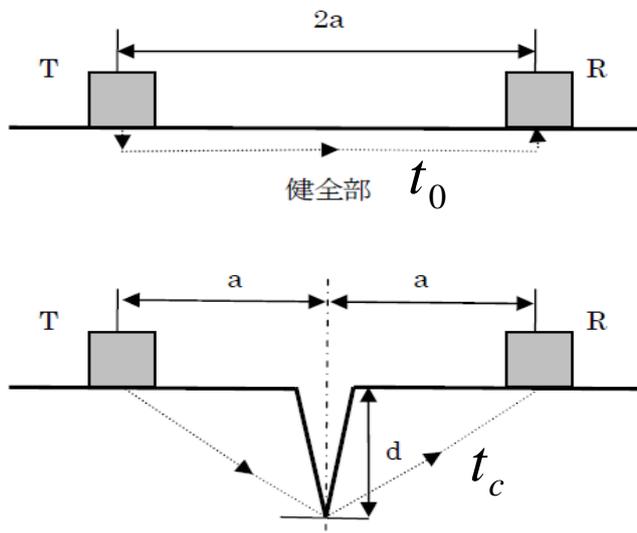


図1.4 衝撃弾性波法



$$d = a\sqrt{(t_c/t_0)^2 - 1}$$

$d$ : クラック深さ

$2a$ : 送受両探触子間の距離

$t_0$ : 健全部での伝播時間

$t_c$ : クラックを挟んでの伝播時間

図1.5  $T_c - T_0$  法

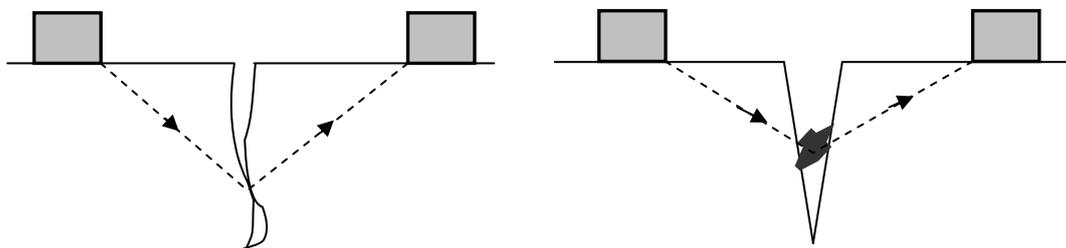


図1.6 超音波法におけるクラック深さの過小評価原因

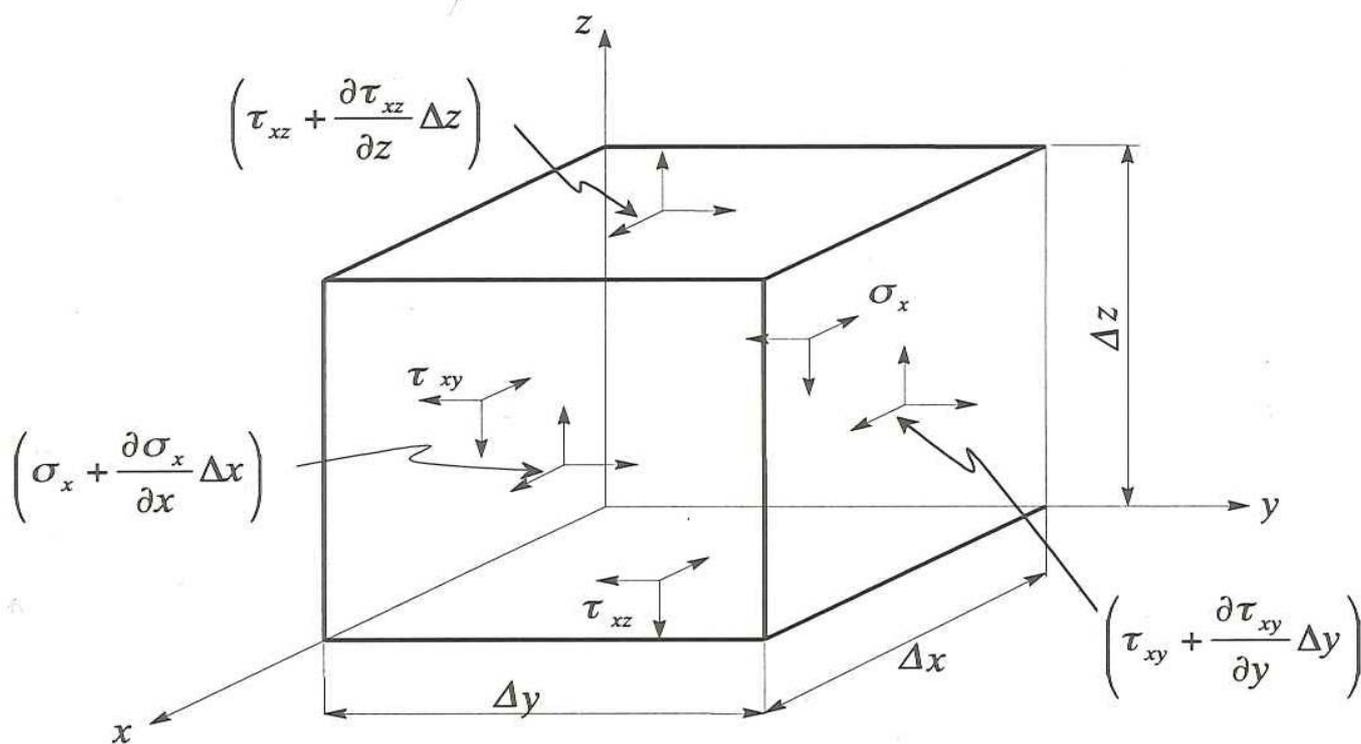


図2.1 3次元座標と応力

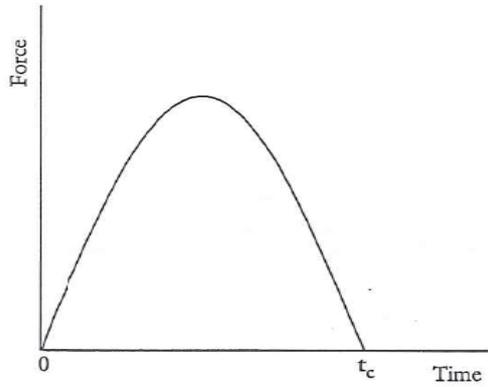


図2.2 鋼球ハンマにより励起された波

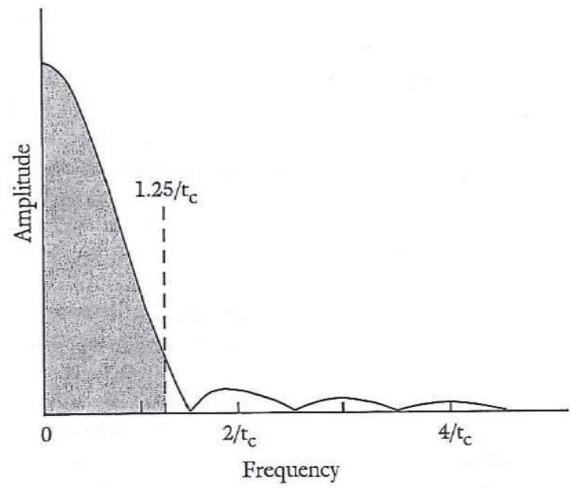


図2.3 周波数分布

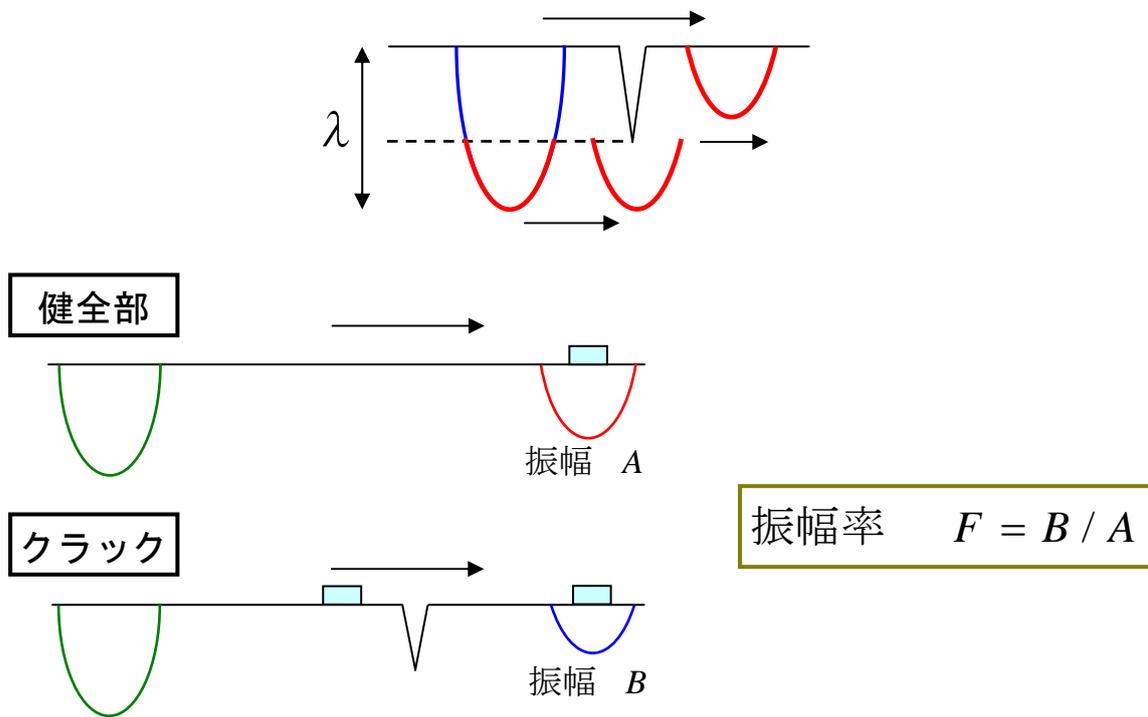


図2.4 表面波と振幅率

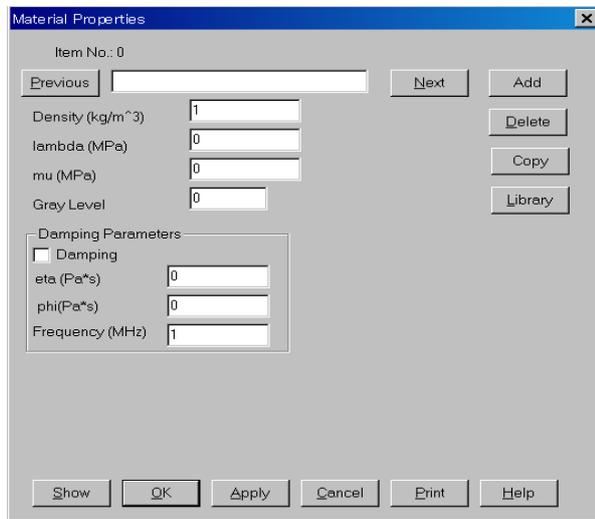


図3.1 モデル物性の設定

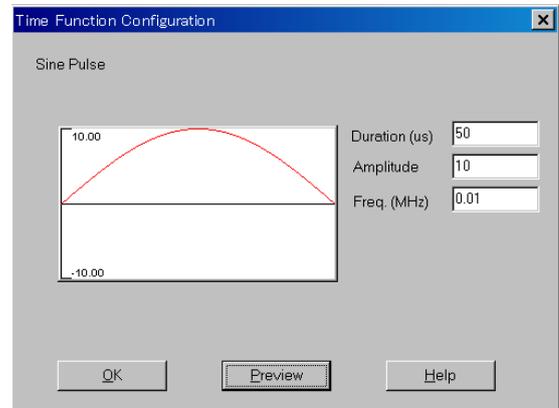


図3.2 送信波設定

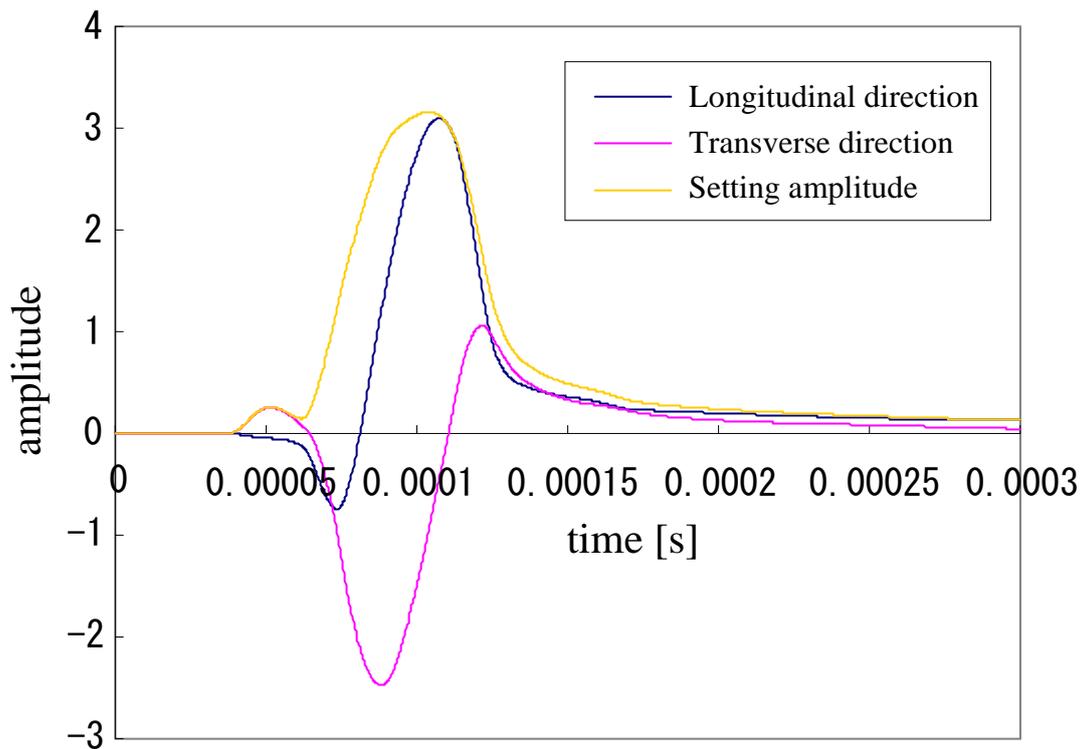


図3.3 表面波の波形

スリット：1mm  
 ひび割れ深さ：4、8、16 (cm)  
 送信周波数：50kHz  
 探触子の直径：40mm

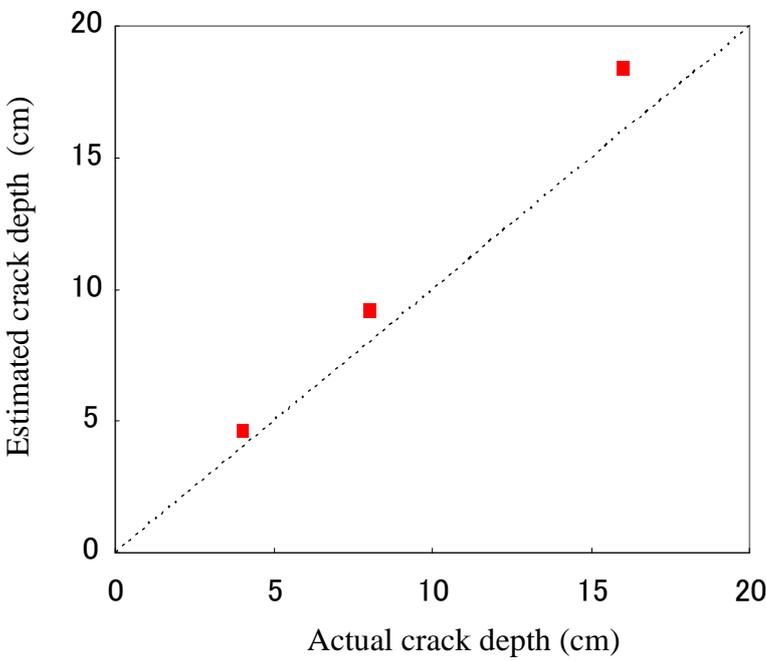
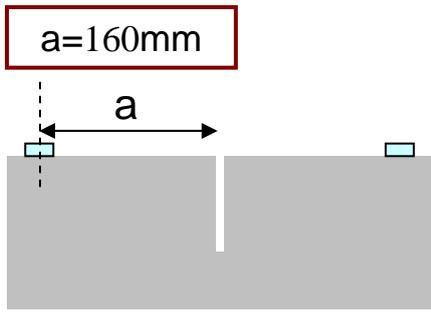


図3.4 シミュレーション詳細

図3.5 シミュレーション結果 (P波)

a=140mm

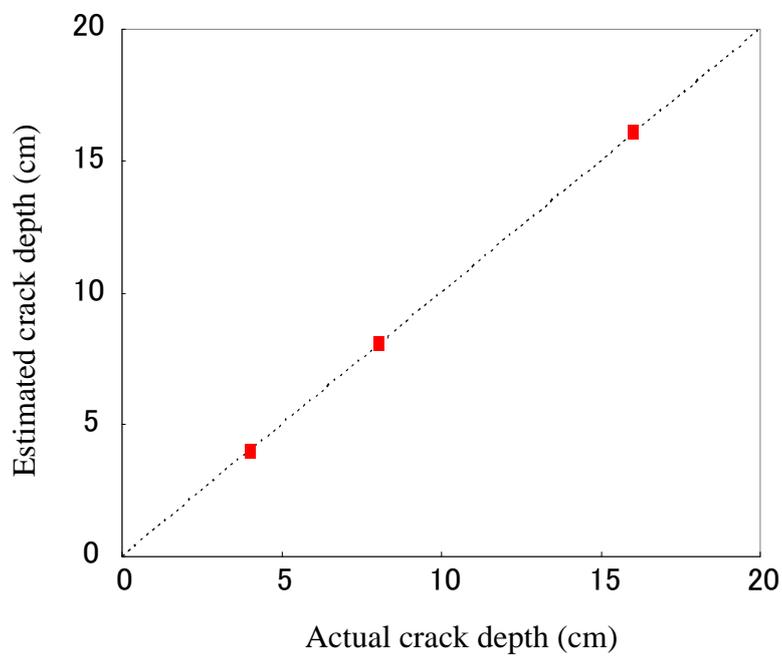
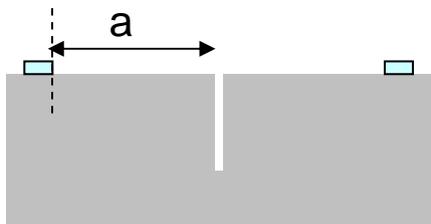


図3.6 シミュレーション改良結果 (P波)

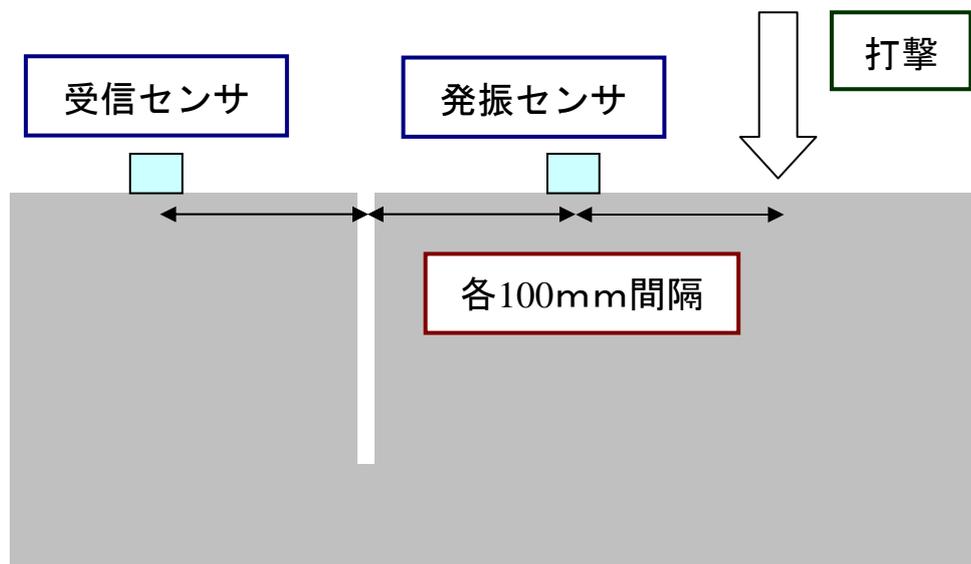


図3.7 センサ配置

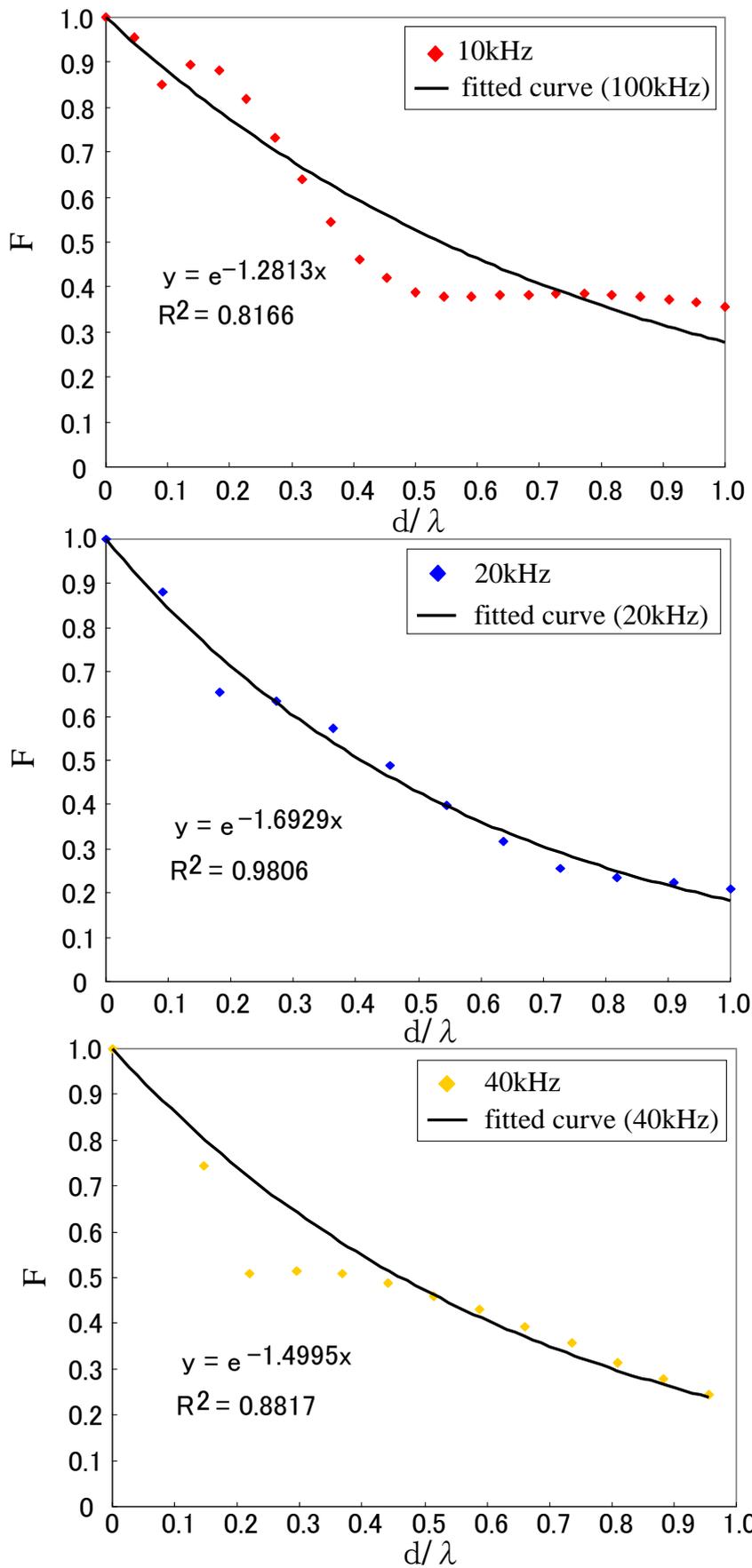


図3.8 垂直クラックシミュレーション結果 (R波)

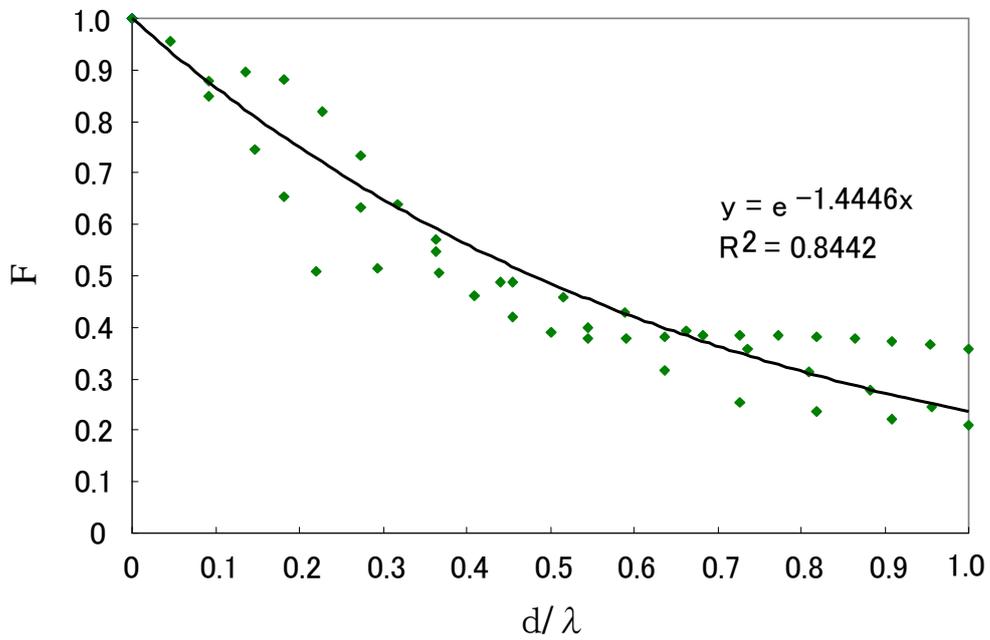


図3.9 垂直クラックシミュレーション重ね合わせ結果

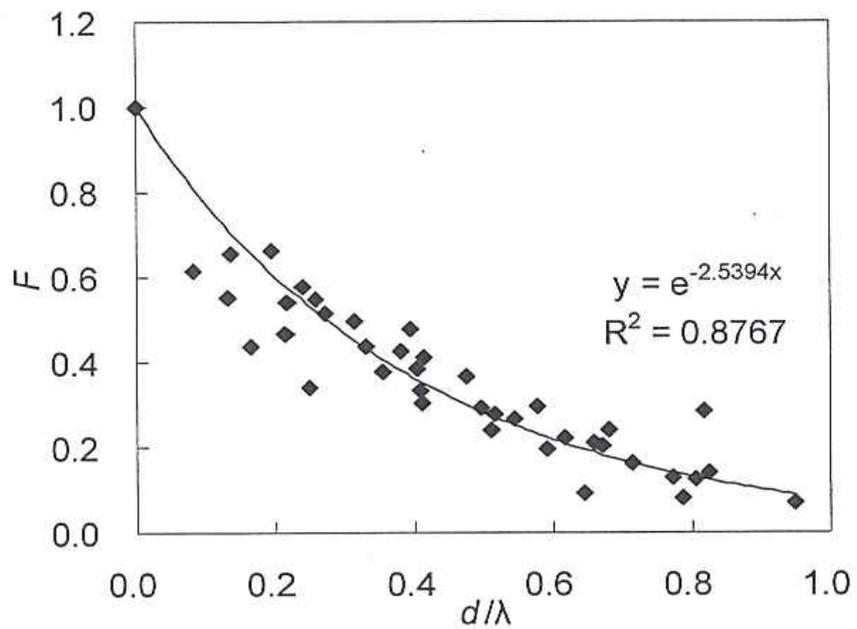
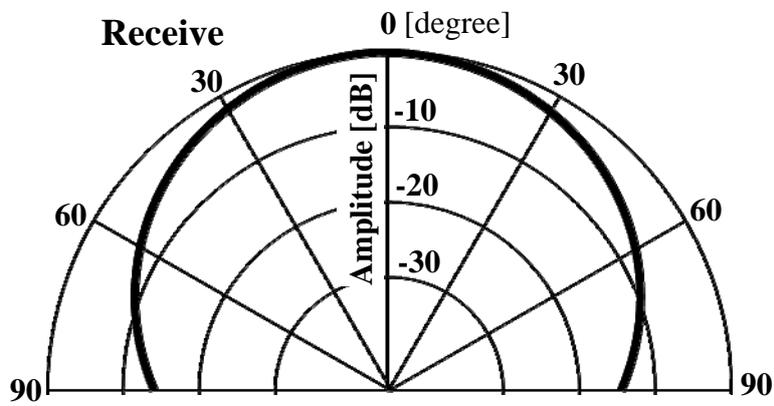


図3.10 垂直クラック実験結果



出典：地盤内破壊評価法へのアコースティック・エミッションの適用に関する研究 塩谷智基

図3.11 センサの指向性

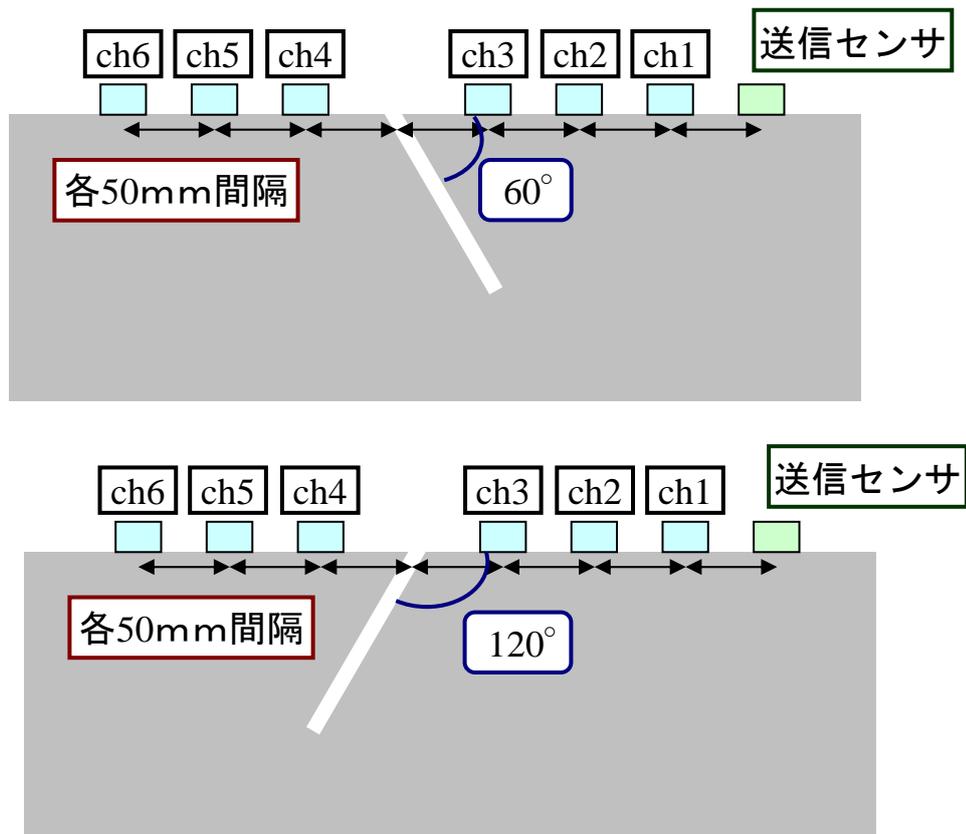


図3.12 シミュレーション詳細

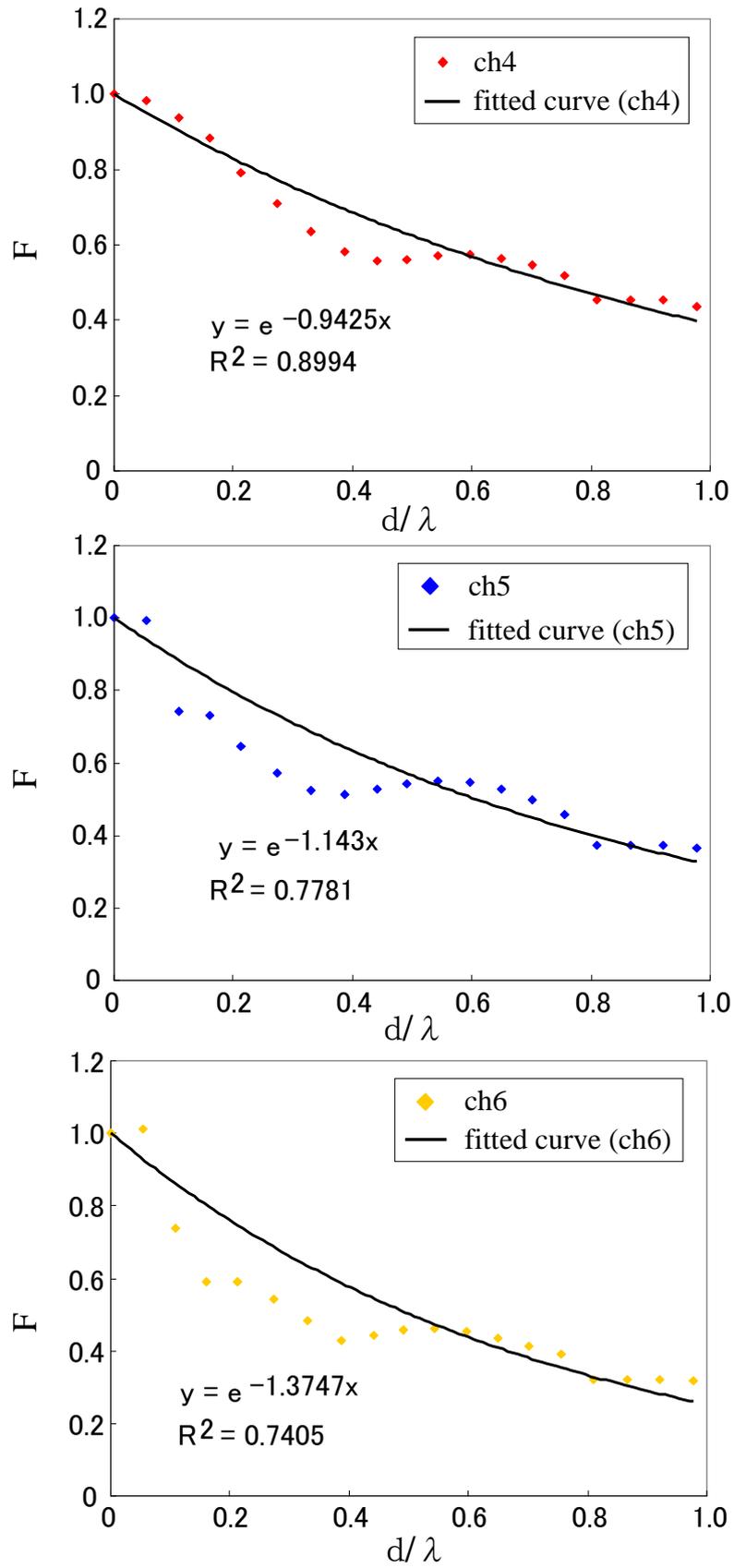


図3.13 斜めクラックシミュレーション結果 (60° )

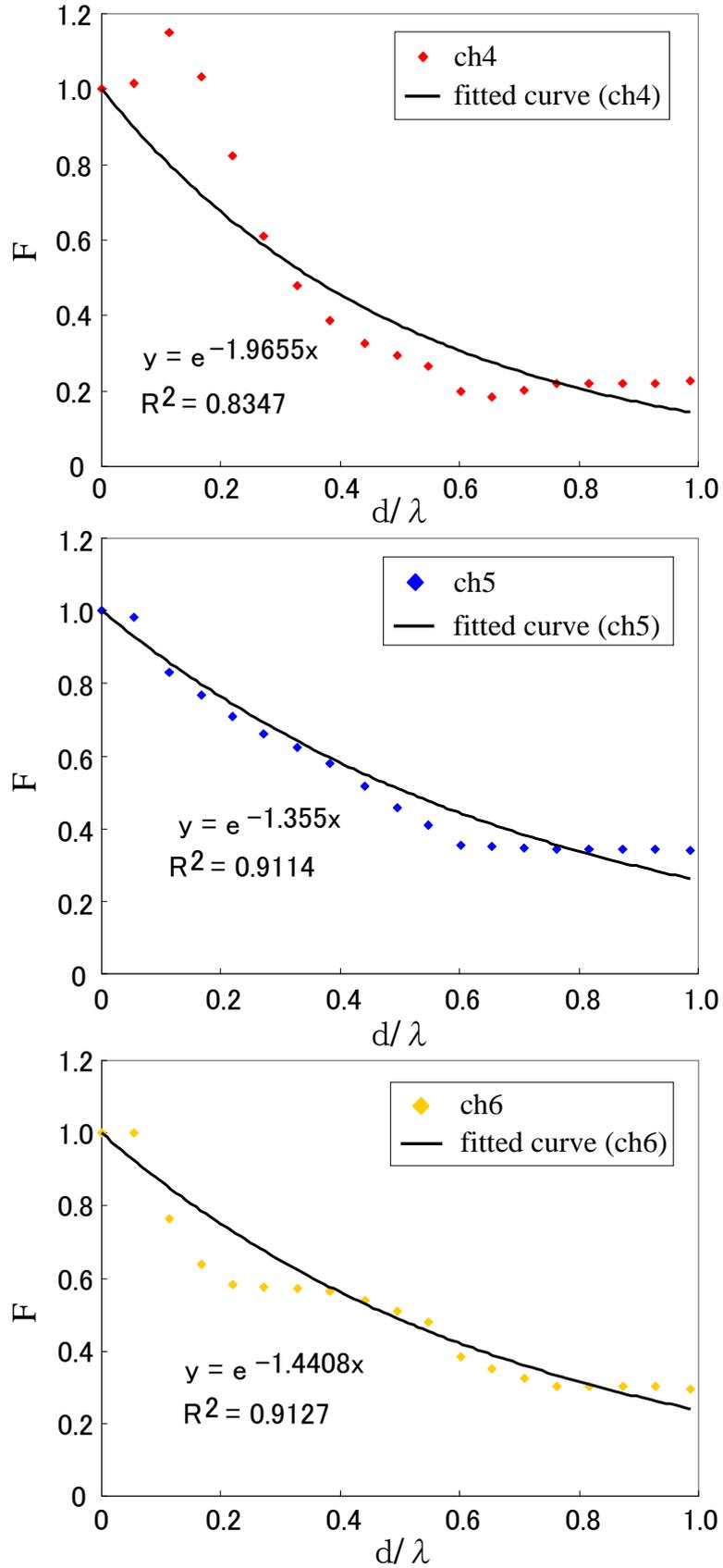


図3.14 斜めクラックシミュレーション結果 (120° )

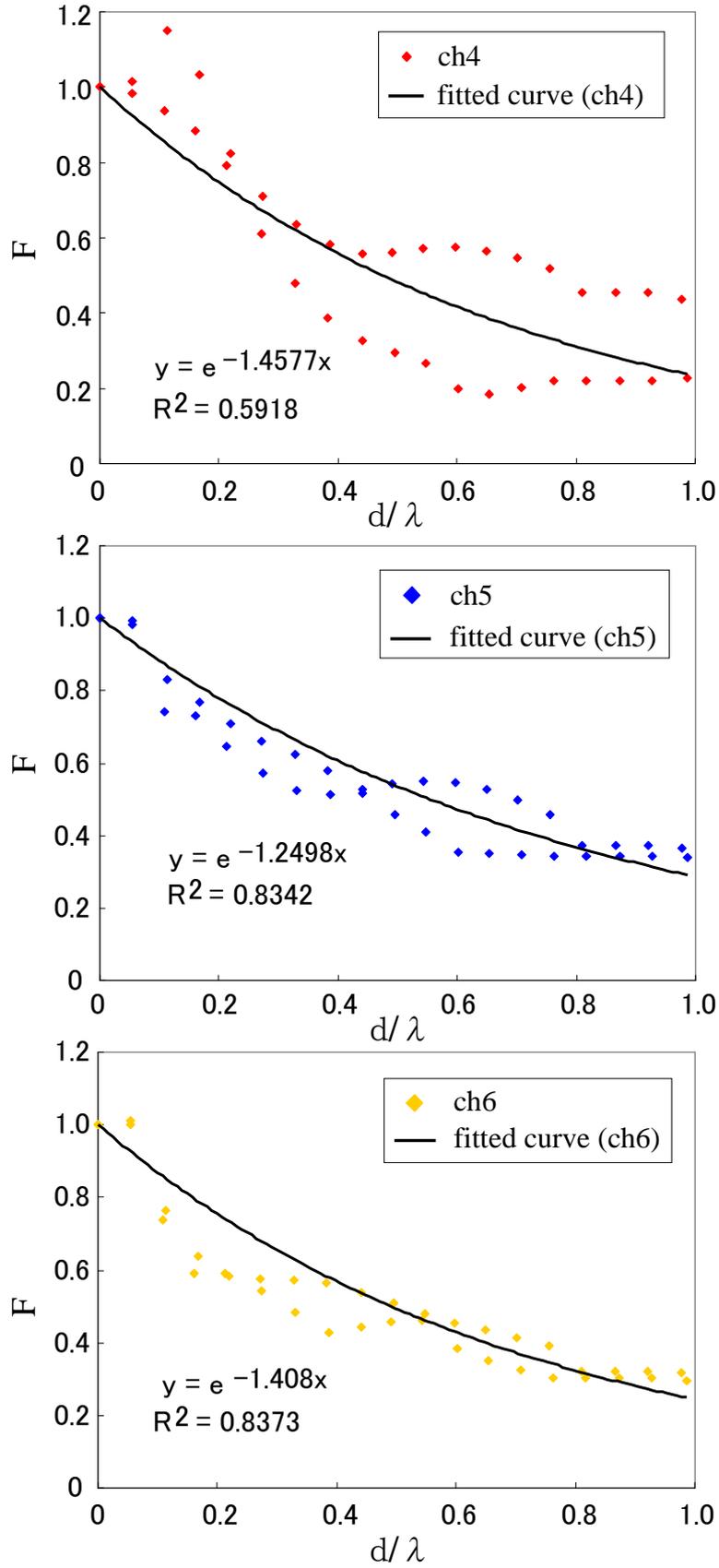


図3.15 各センサについての斜めクラックシミュレーション結果

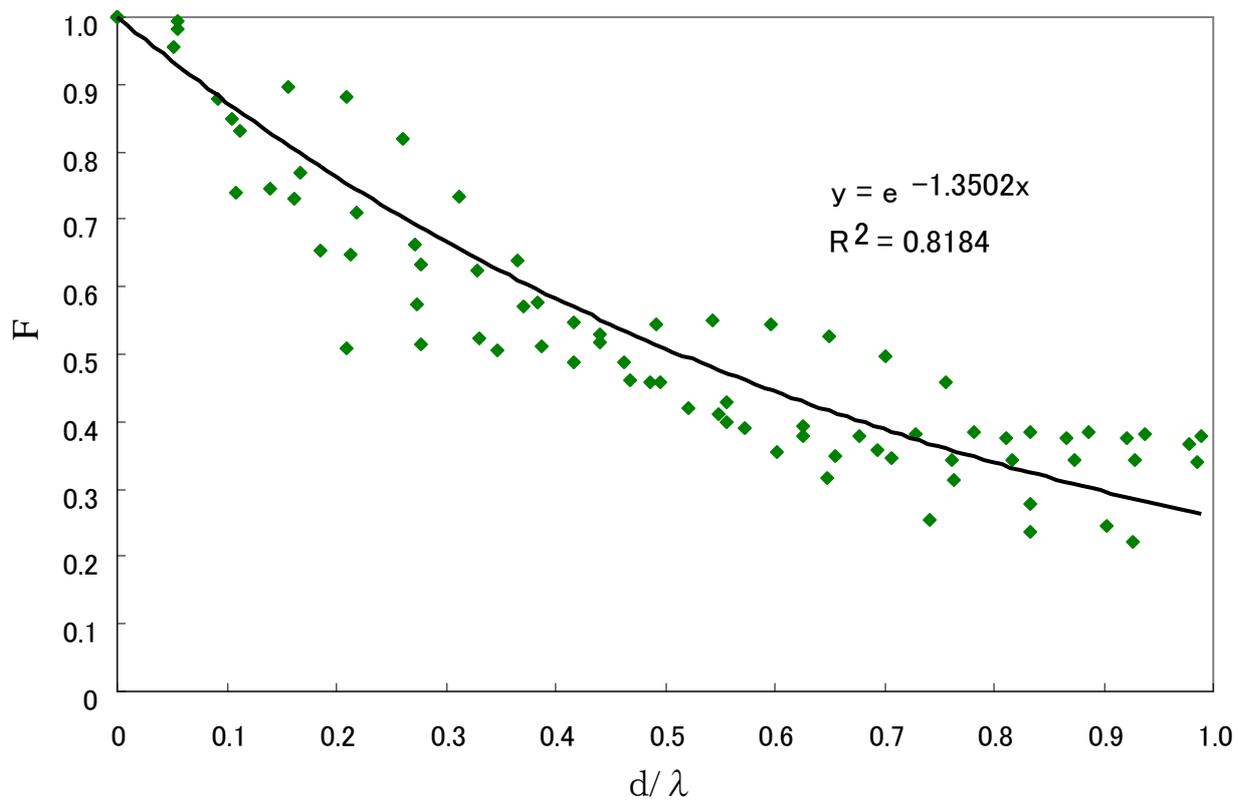


図3.16 垂直クラックと斜めクラックの重ね合わせ結果

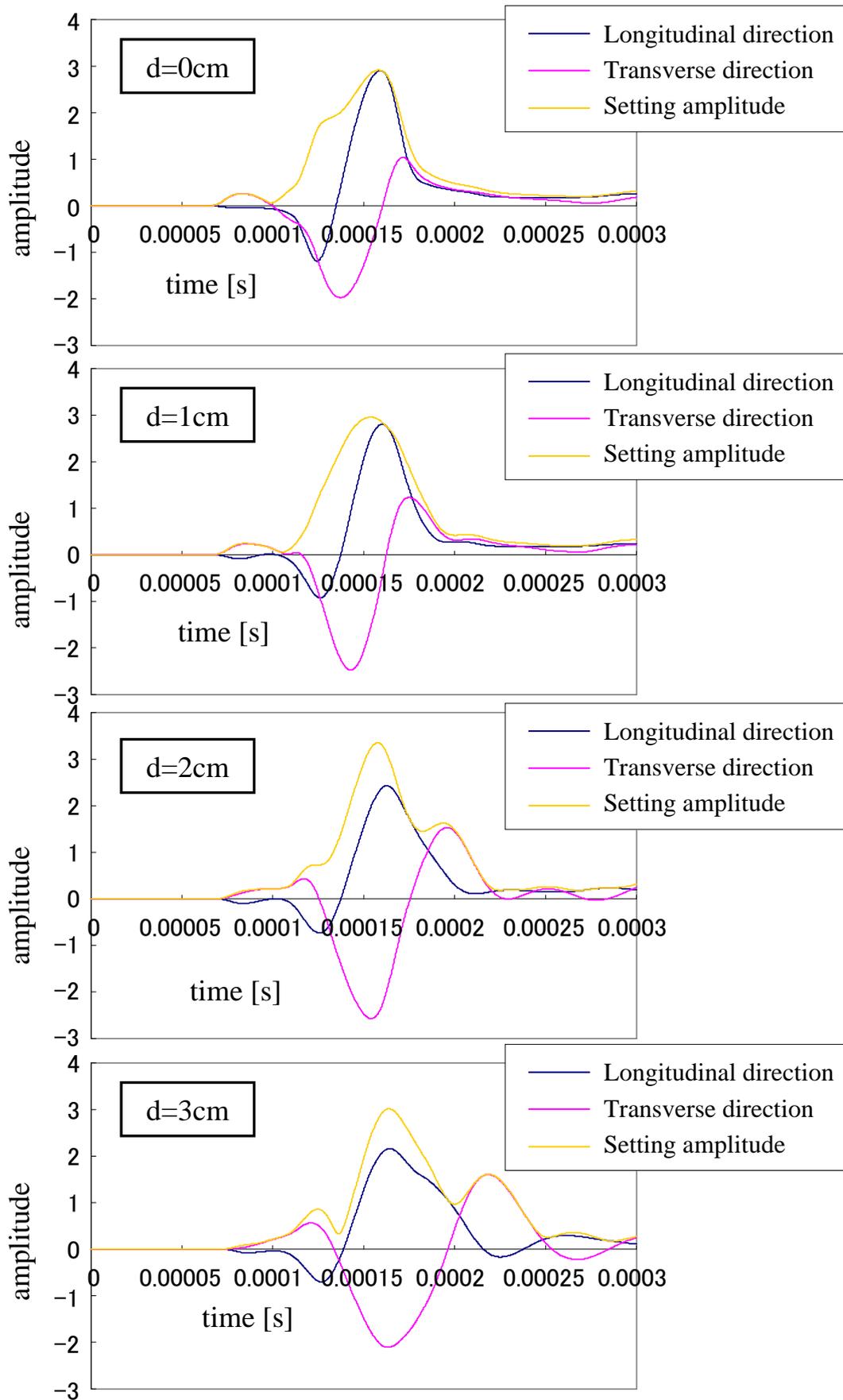
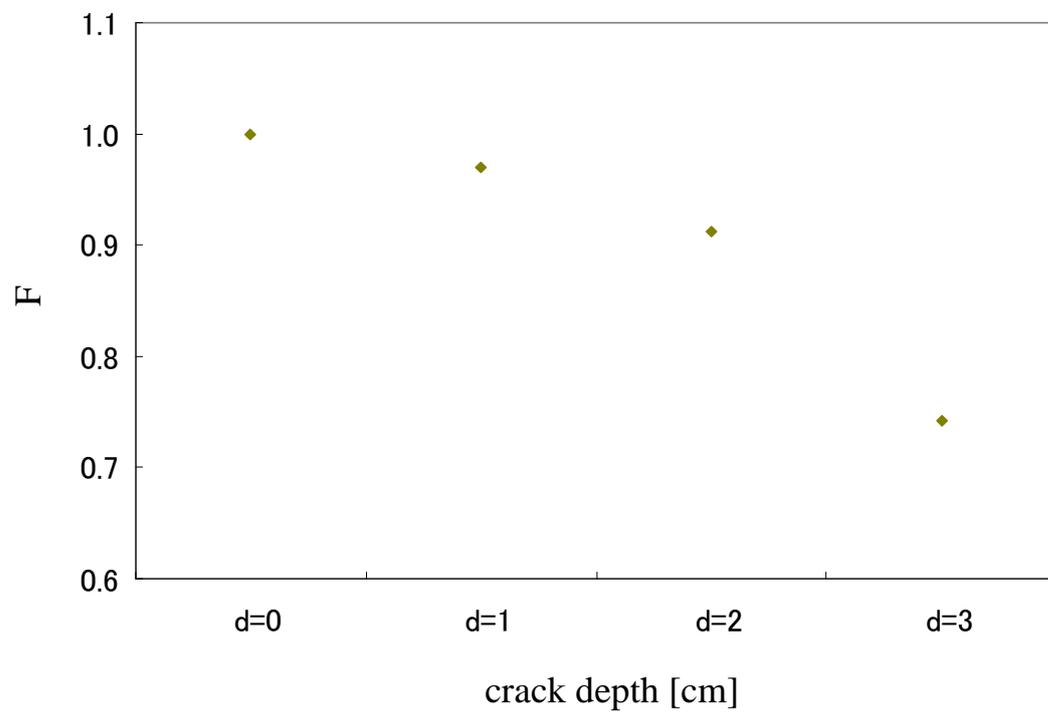


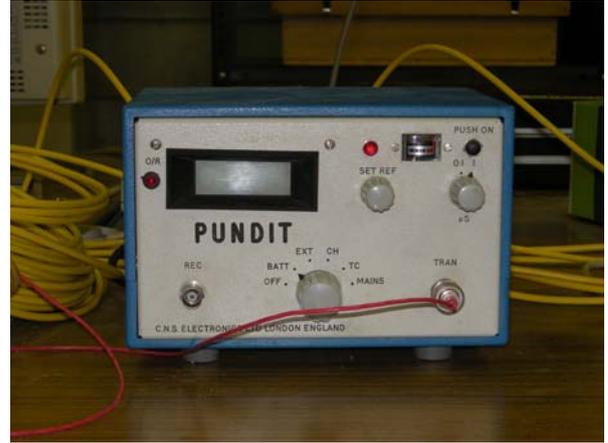
図3.17 振幅値の変化



**图3.18 改良振幅率**



(a) AE計測装置

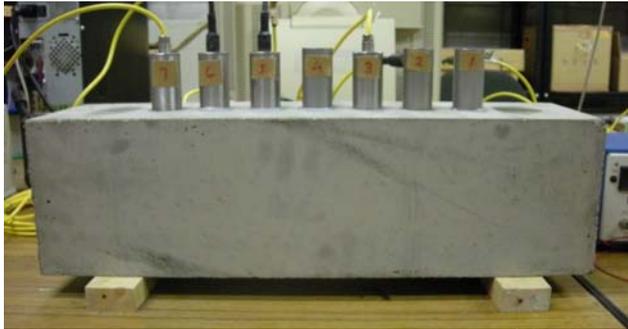


(b) 弾性波発振機

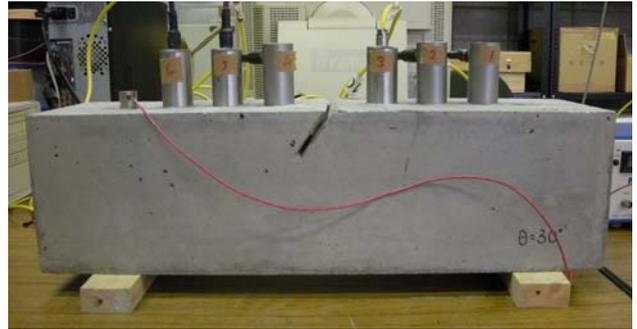


(c) 計測全体

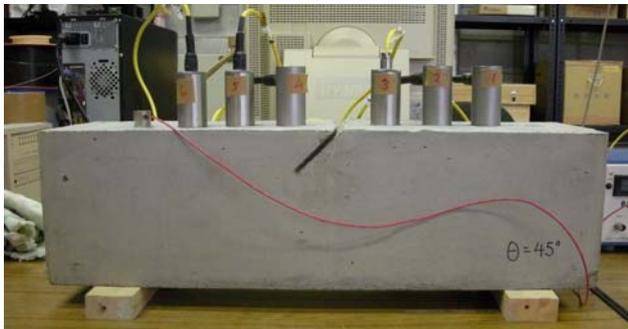
図4.1 使用機材



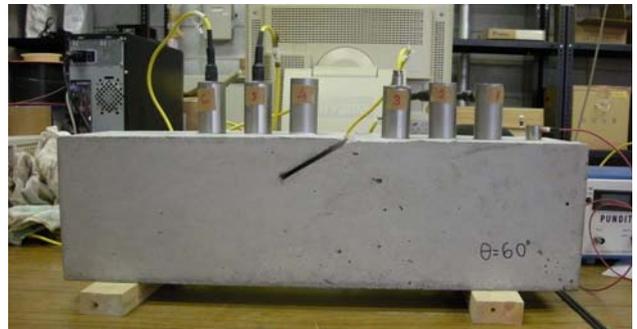
(a) 健全供試体



(b) クラック角度 $30^\circ$



(c) クラック角度 $45^\circ$



(d) クラック角度 $60^\circ$

図4.2 センサ配置

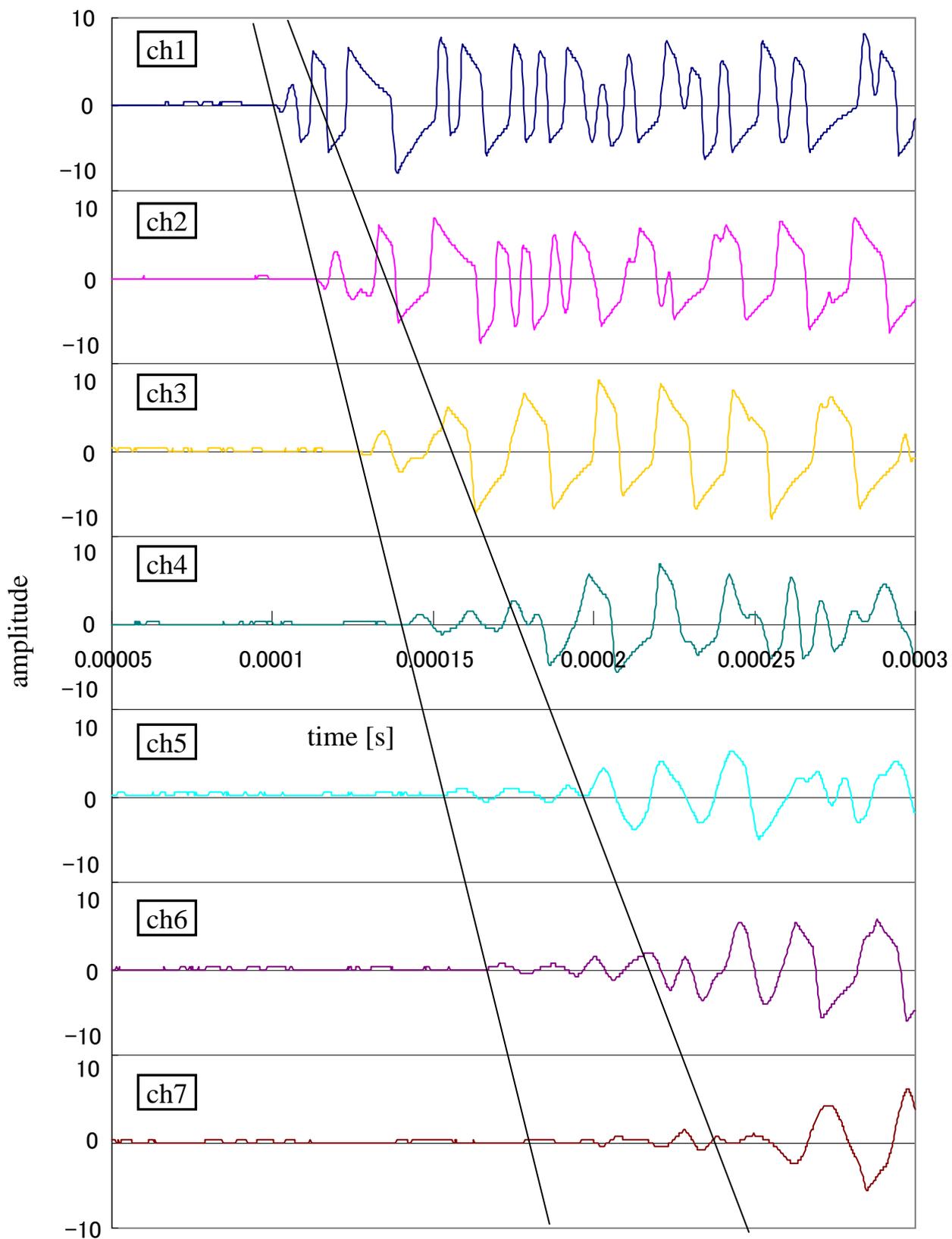


図4.3 表面波の読み取り（健全部右側発振）

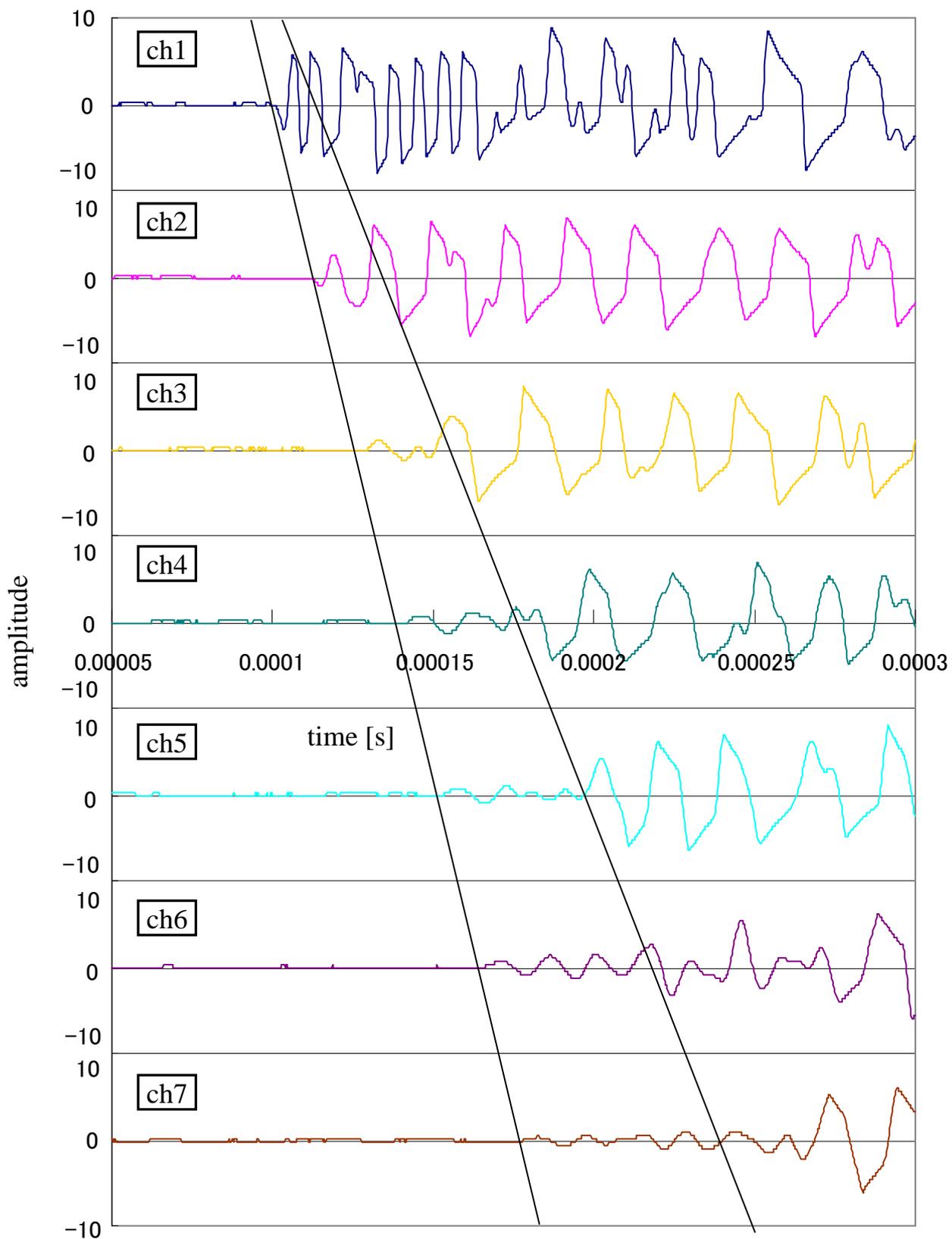


図4.4 表面波の読み取り（健全部左側発振）

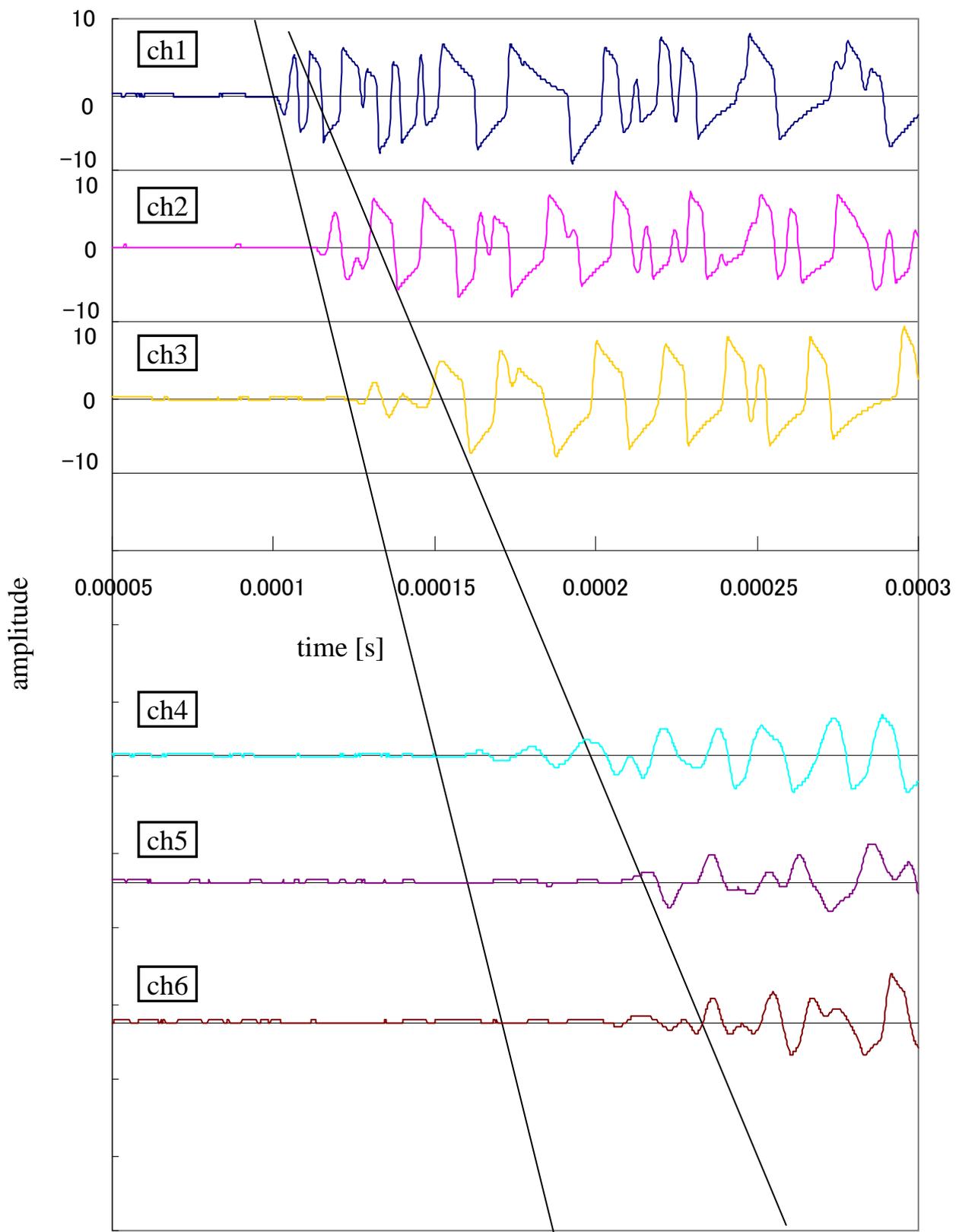


図4.5 表面波の読み取り (30° 右側発振)

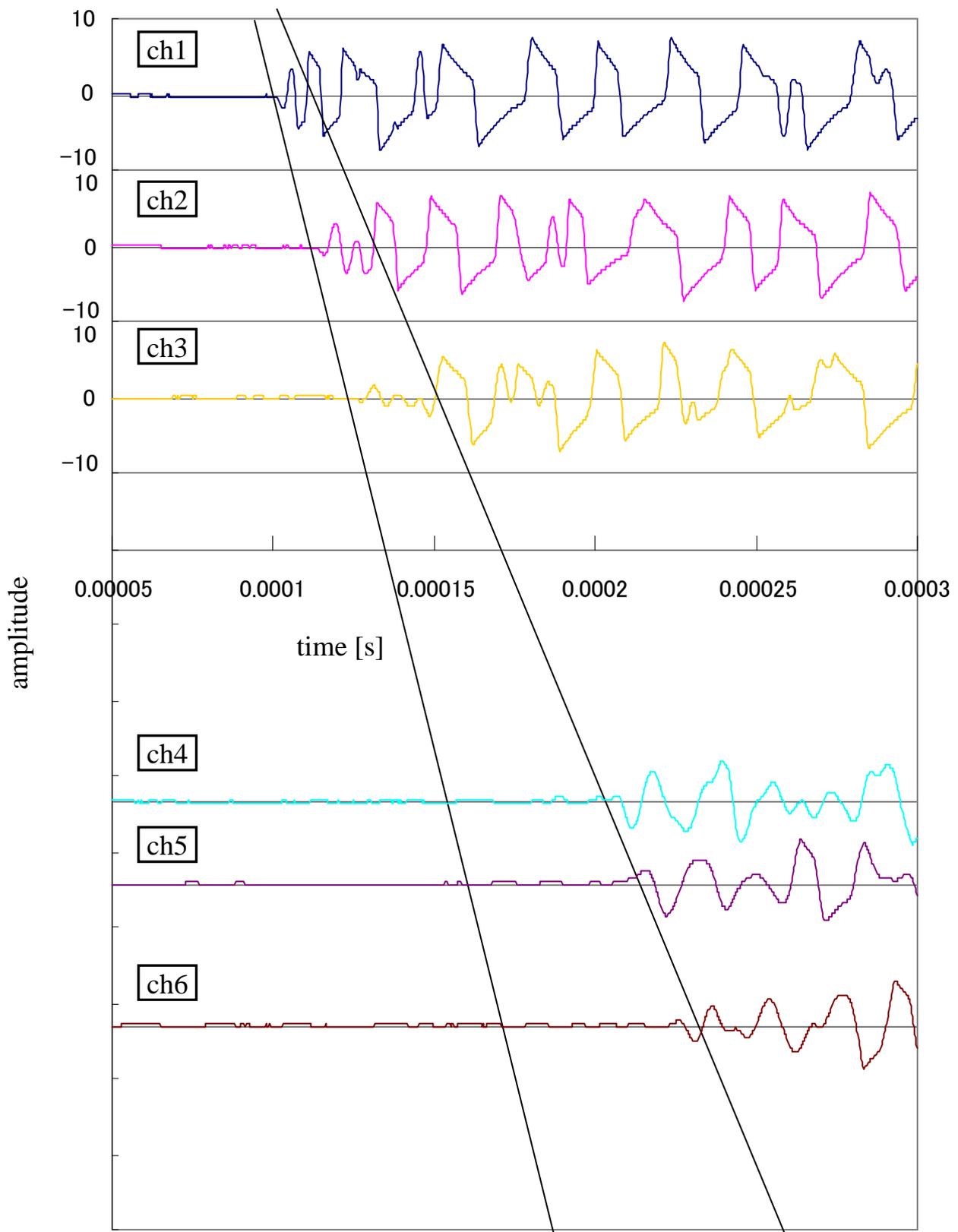


図4.6 表面波の読み取り (30° 左側発振)

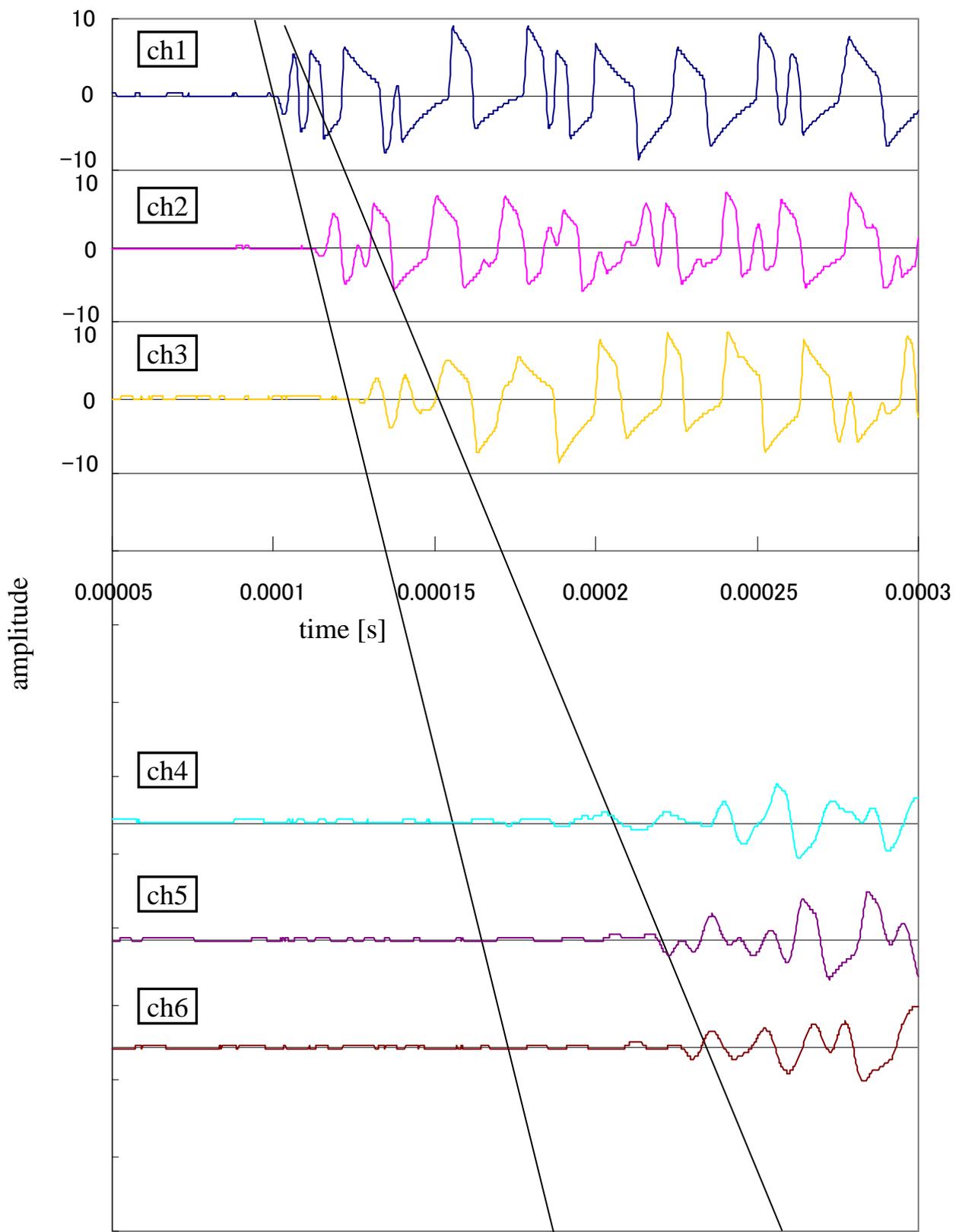


図4.7 表面波の読み取り (45° 右側発振)

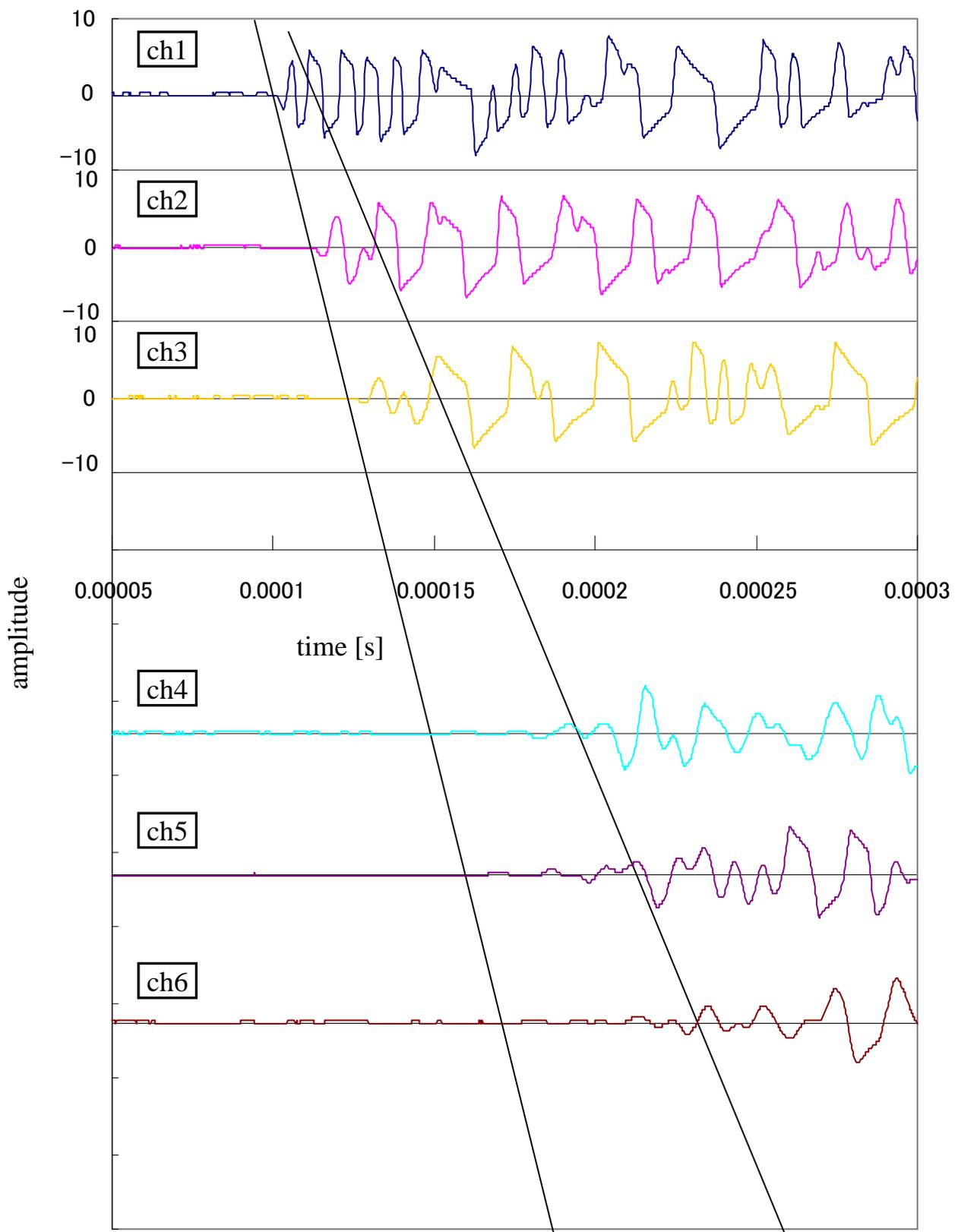


図4.8 表面波の読み取り (45° 左側発振)

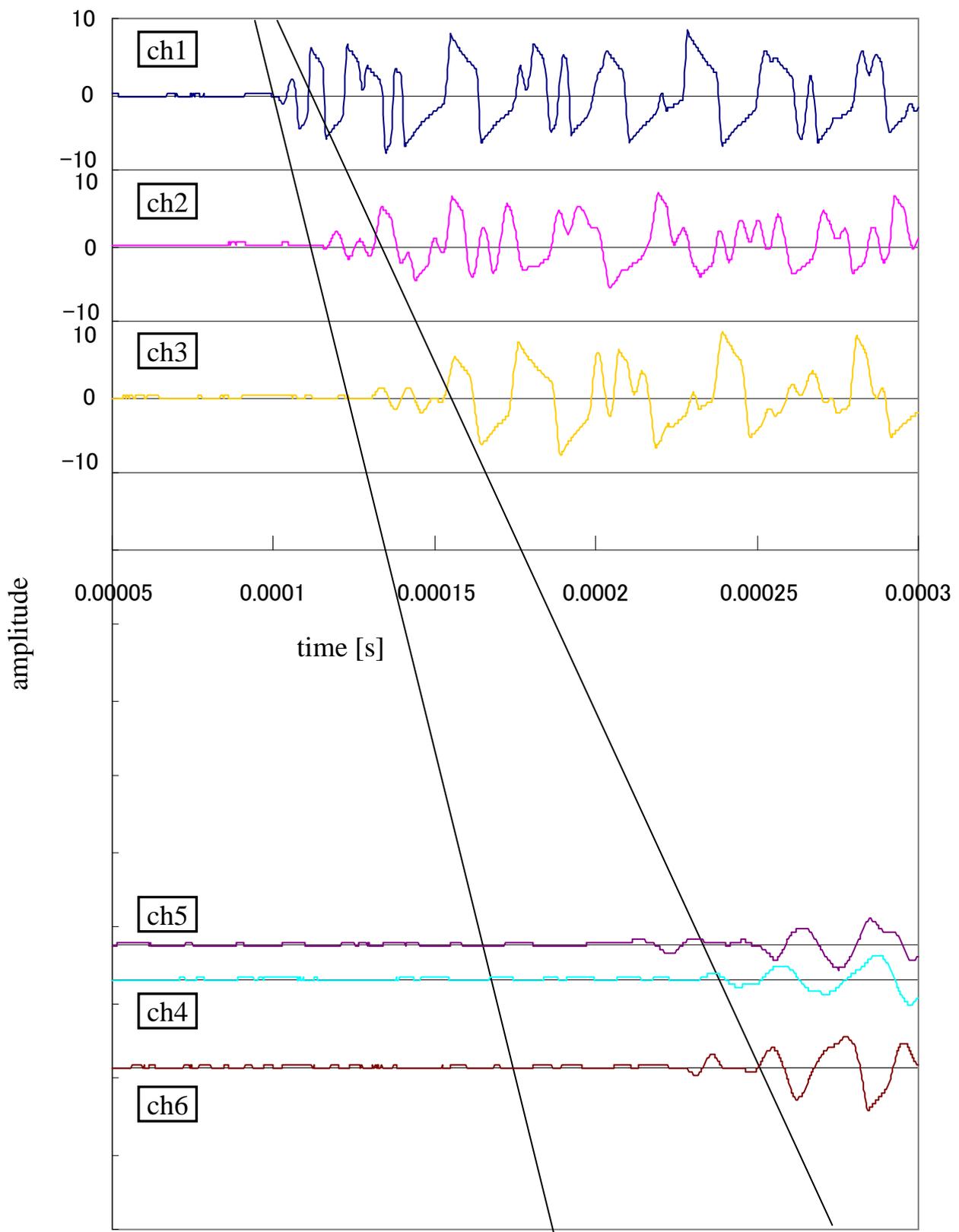


図4.9 表面波の読み取り (60° 右側発振)

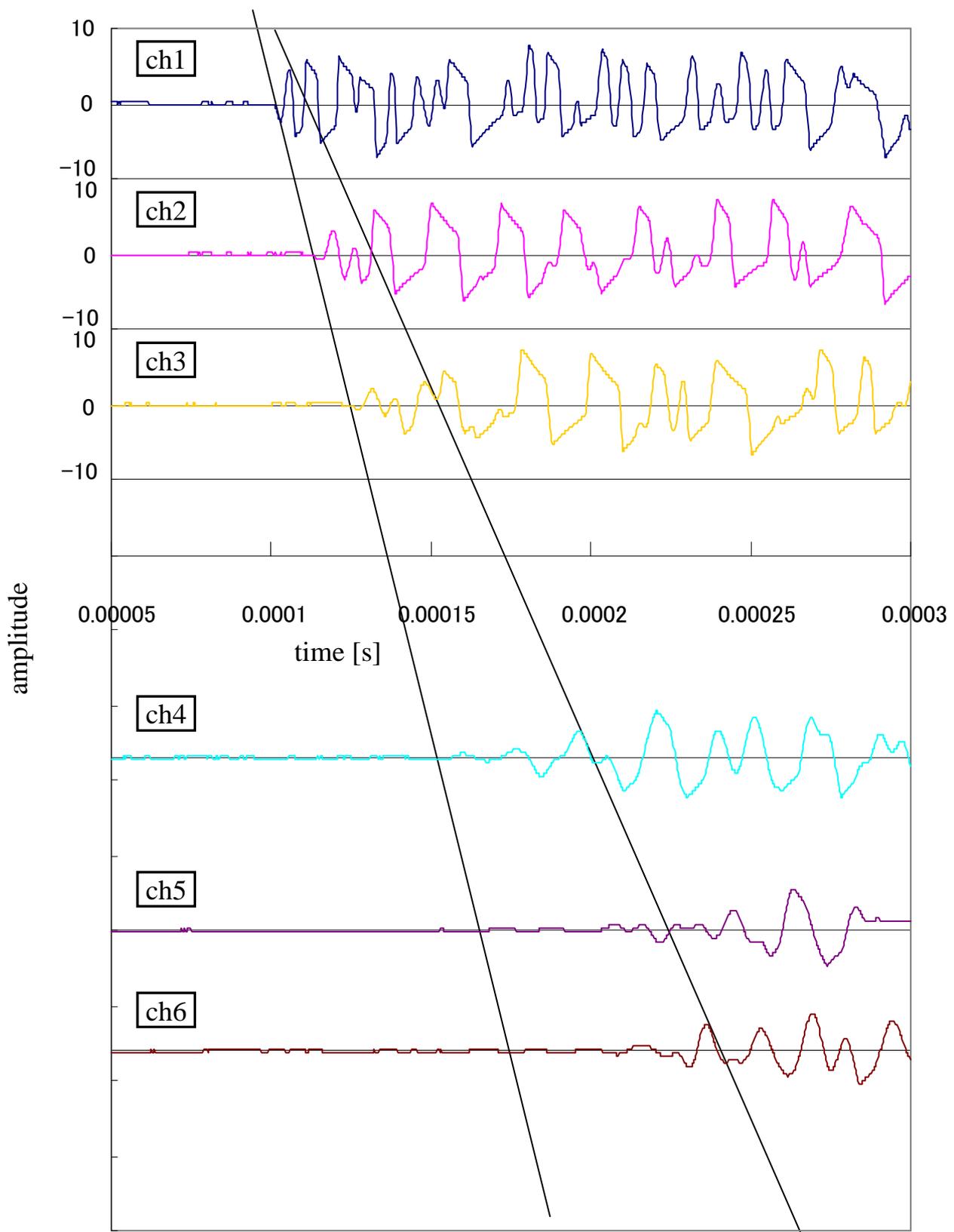


図4.10 表面波の読み取り (60° 左側発振)

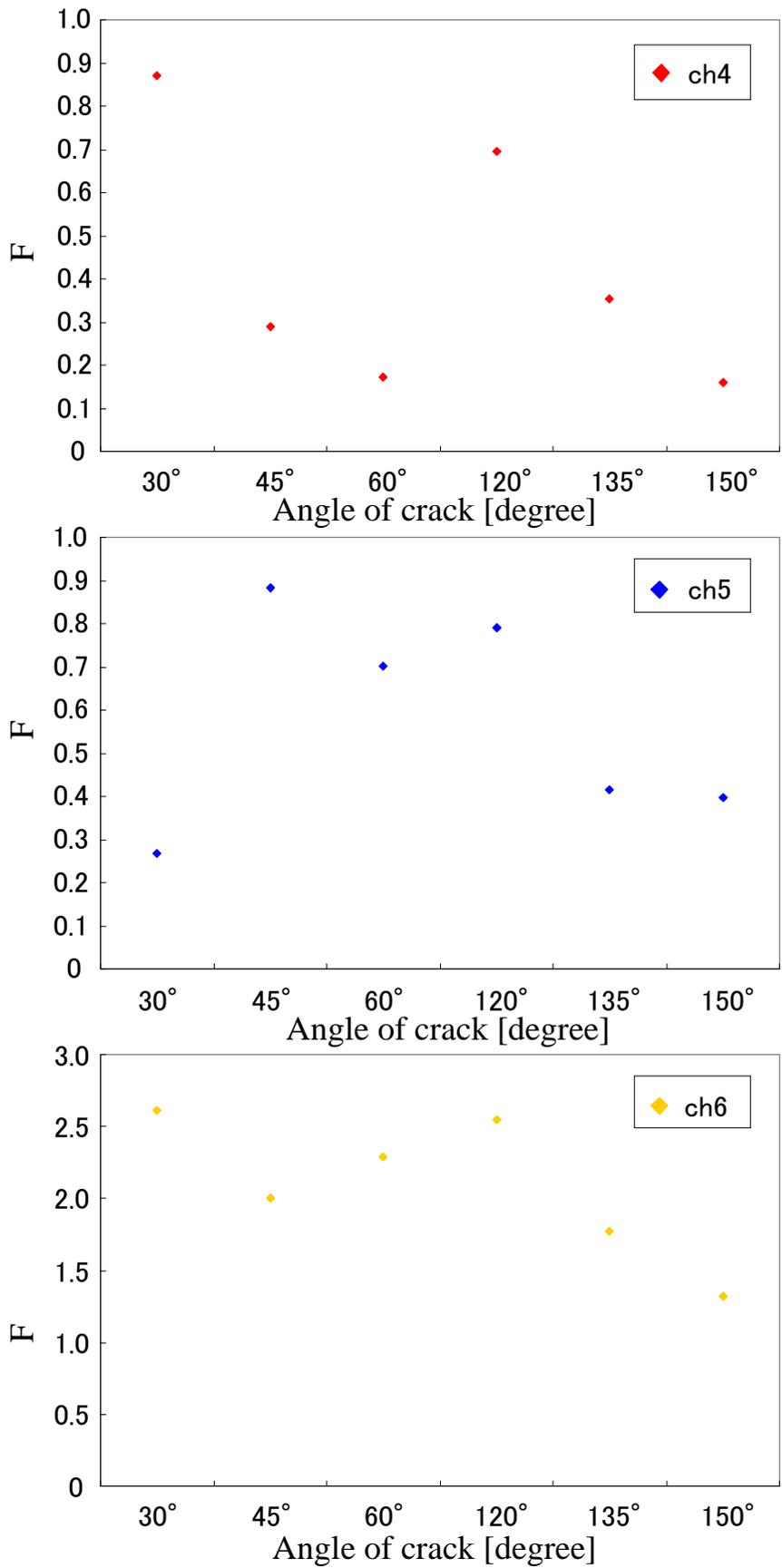


図4.11 各センサの角度別振幅率

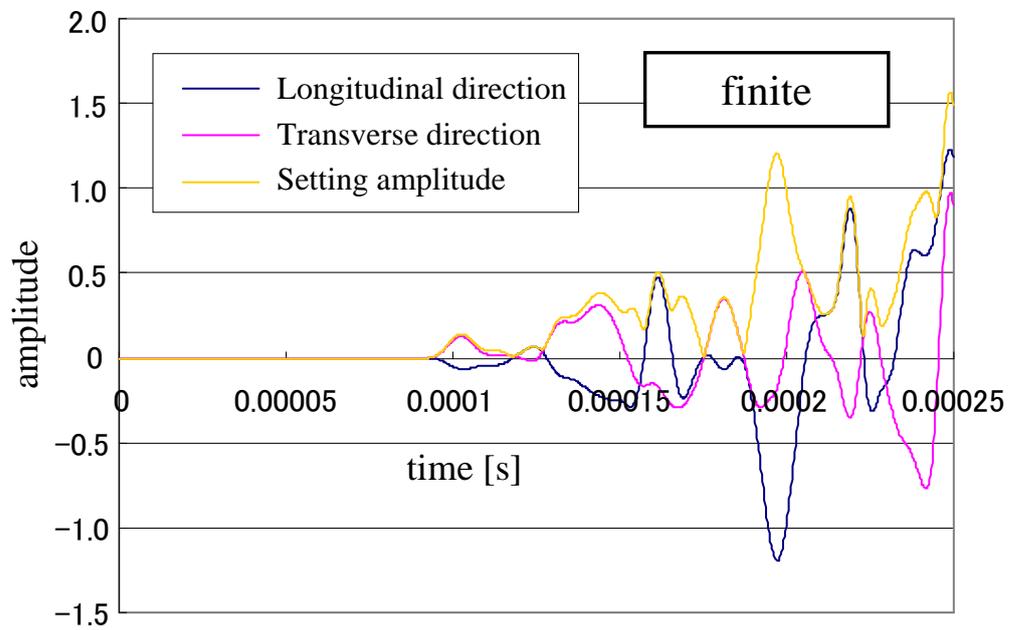
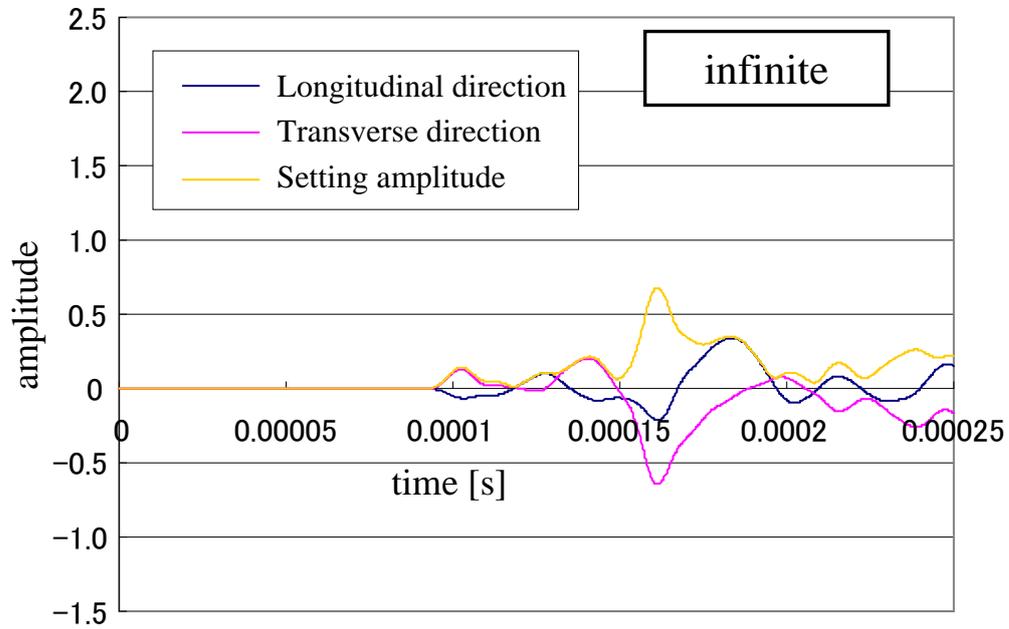


図4.12 反射波の影響 (ch6)

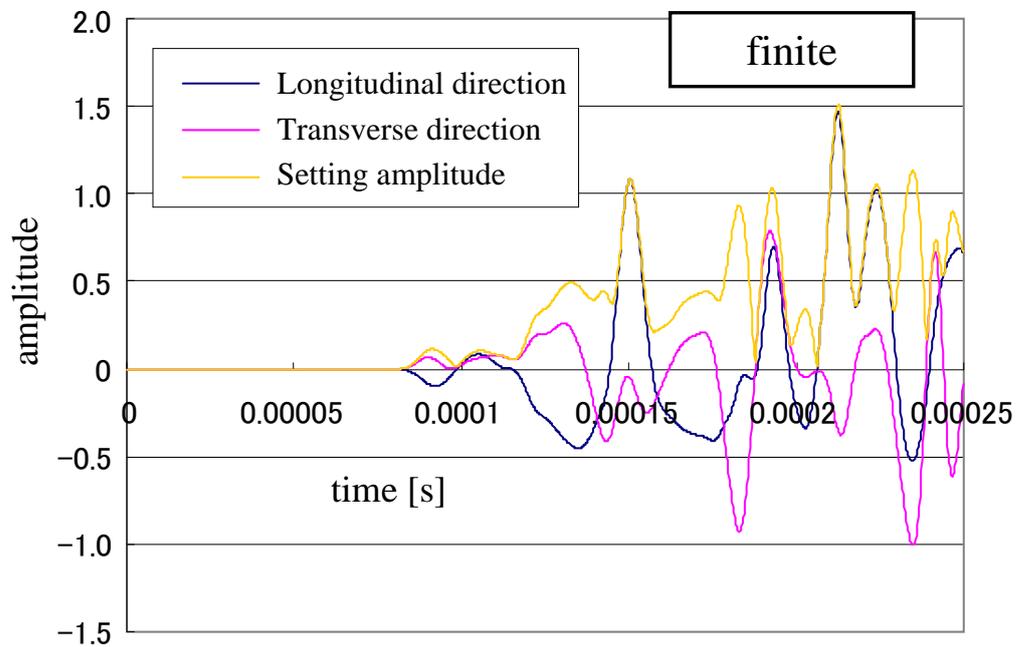
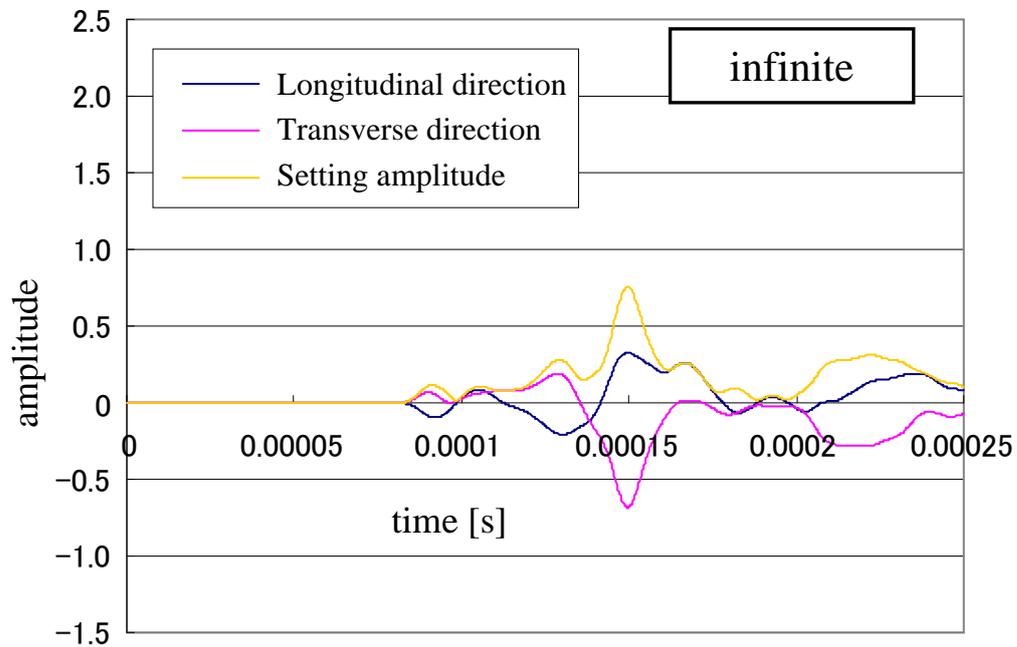


図4.13 反射波の影響 (ch5)

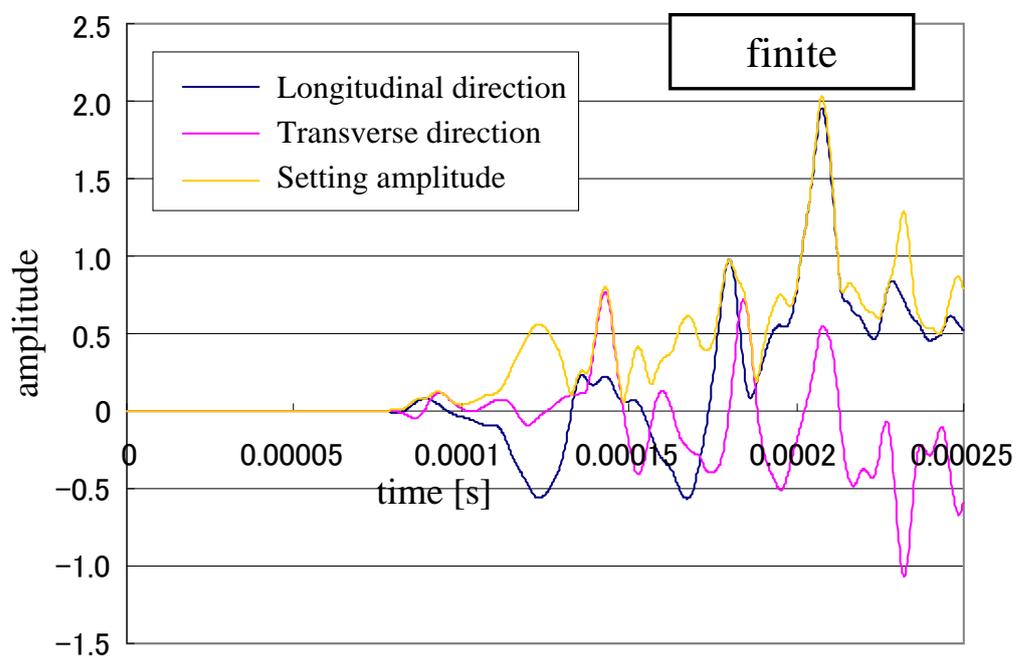
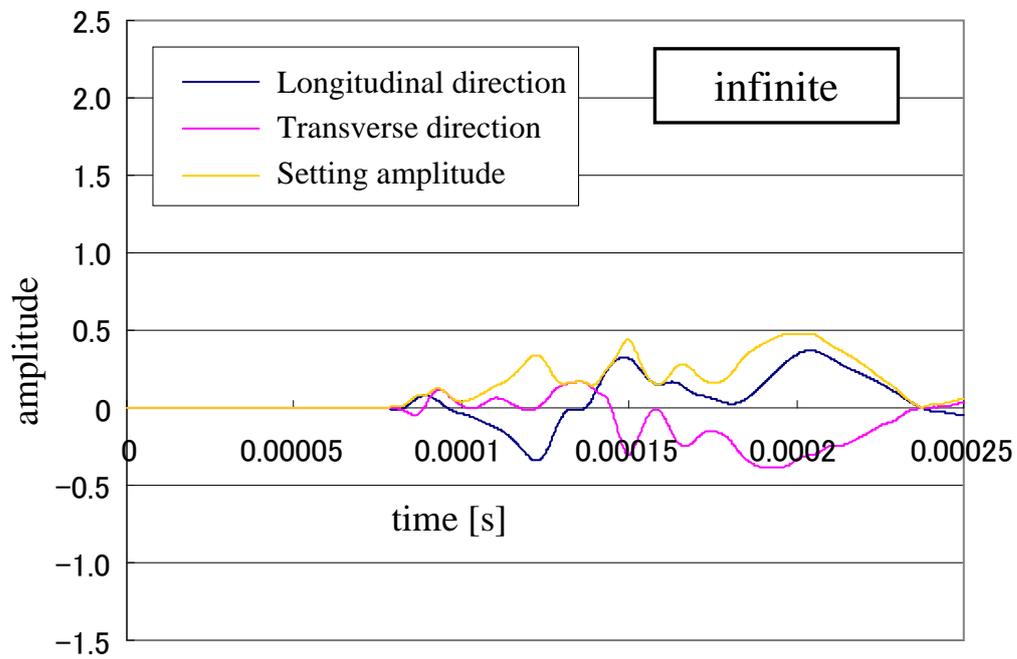


図4.14 反射波の影響 (ch4)

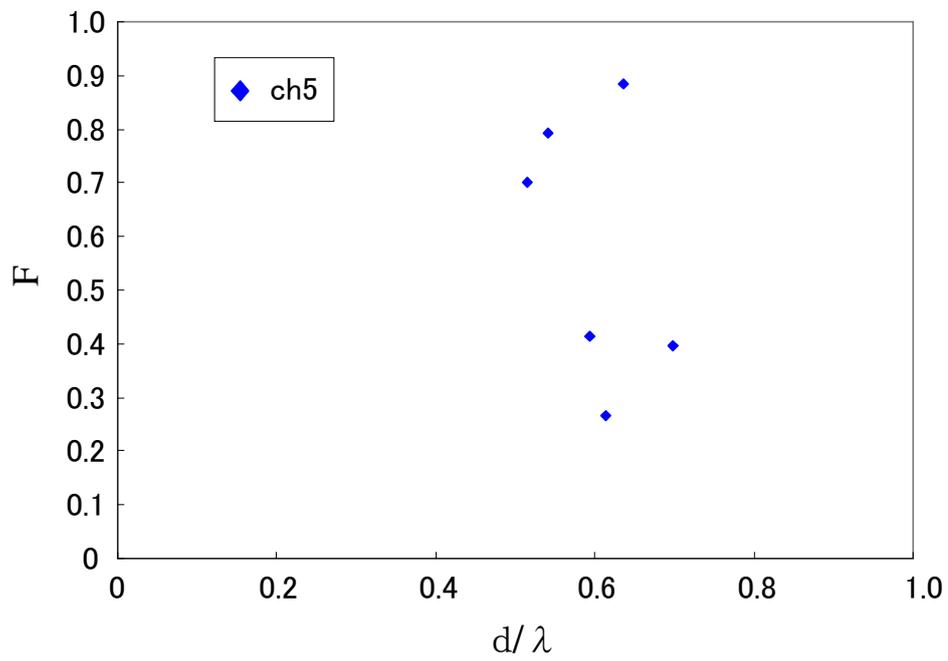
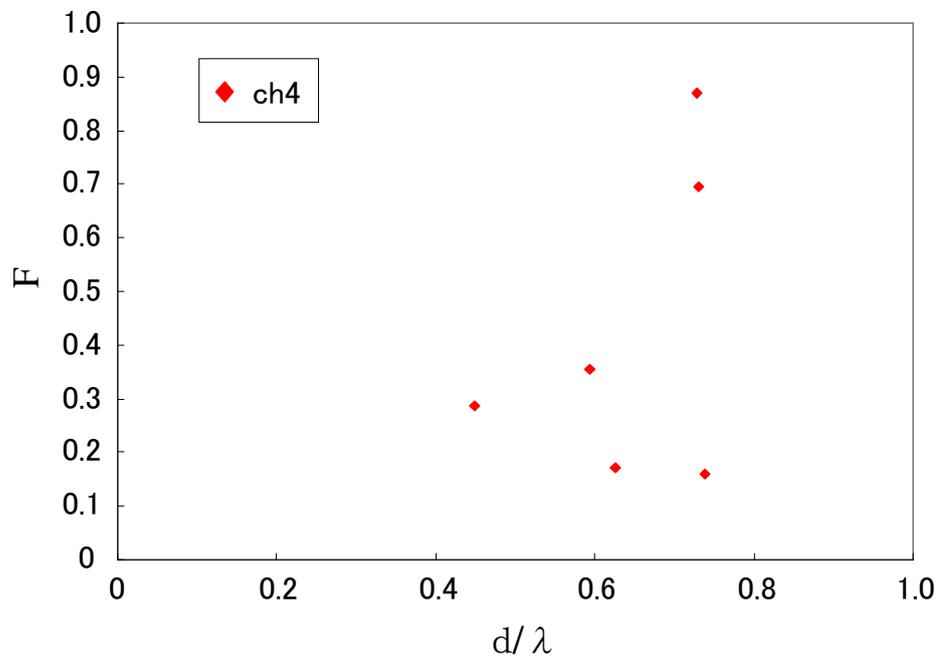


図4.15 実験結果 ( $F$  vs  $d/\lambda$ )

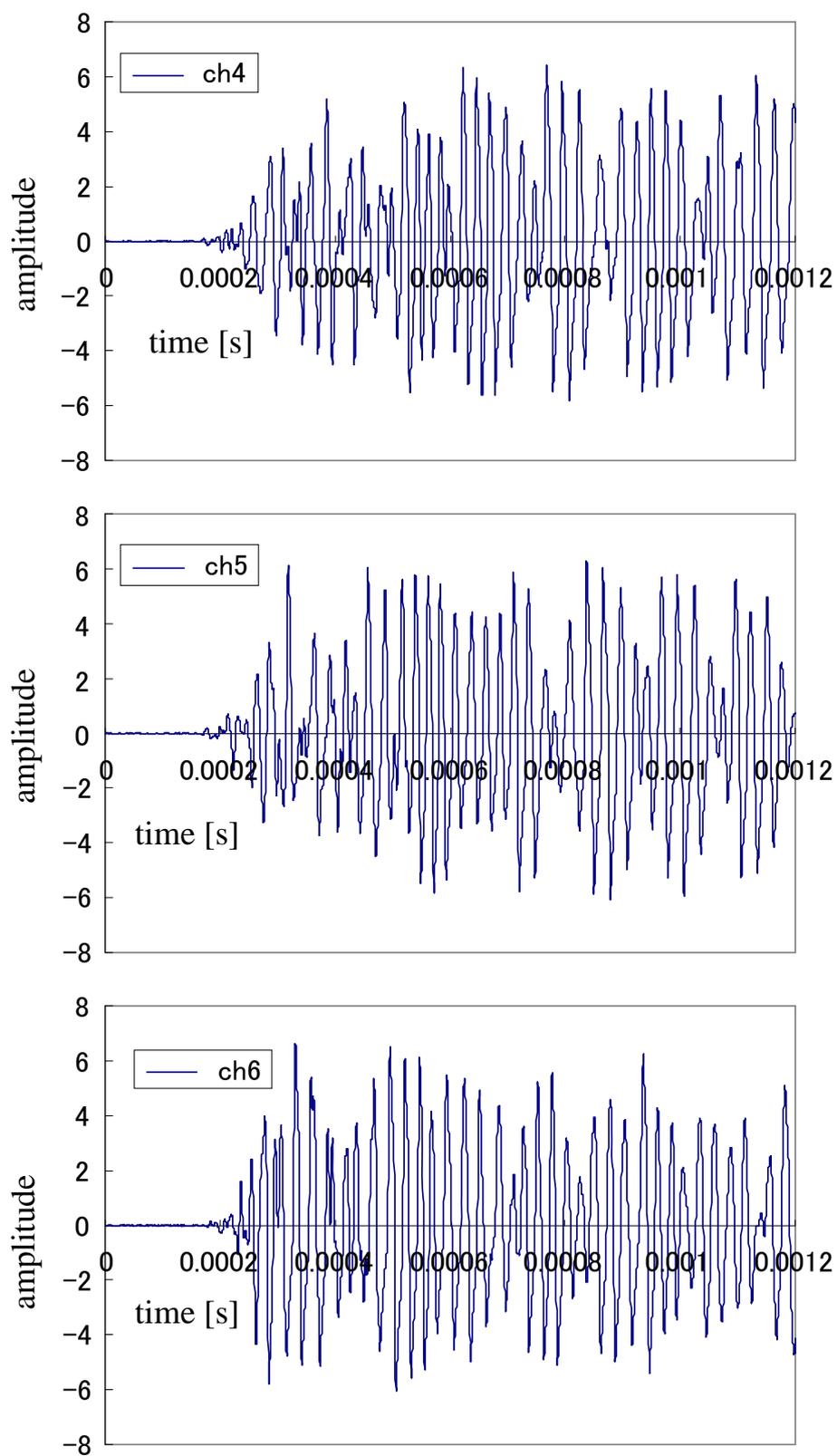


図4.16 各センサの減衰比較（波形全体）

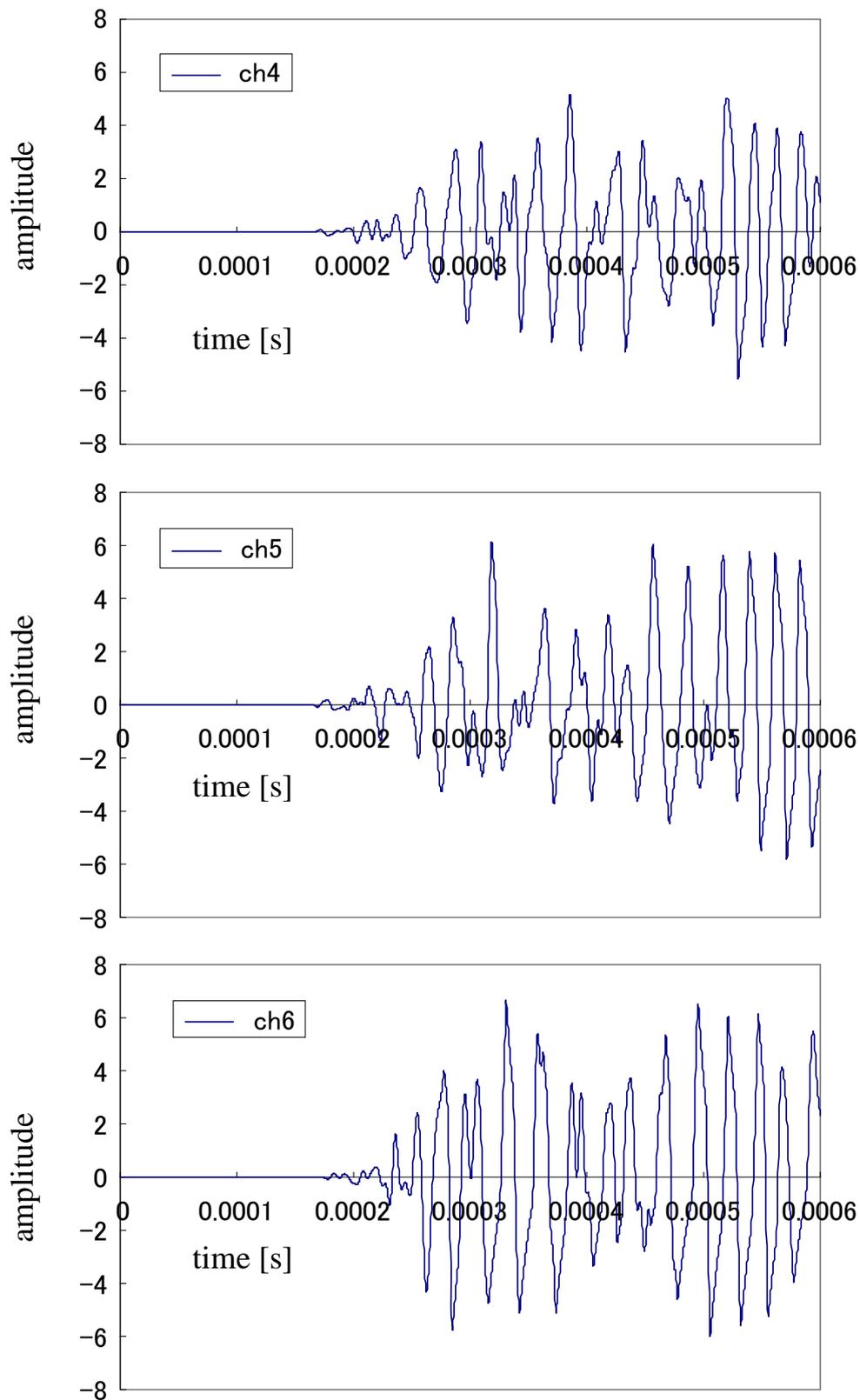


図4.17 各センサの減衰比較（波形の前半）

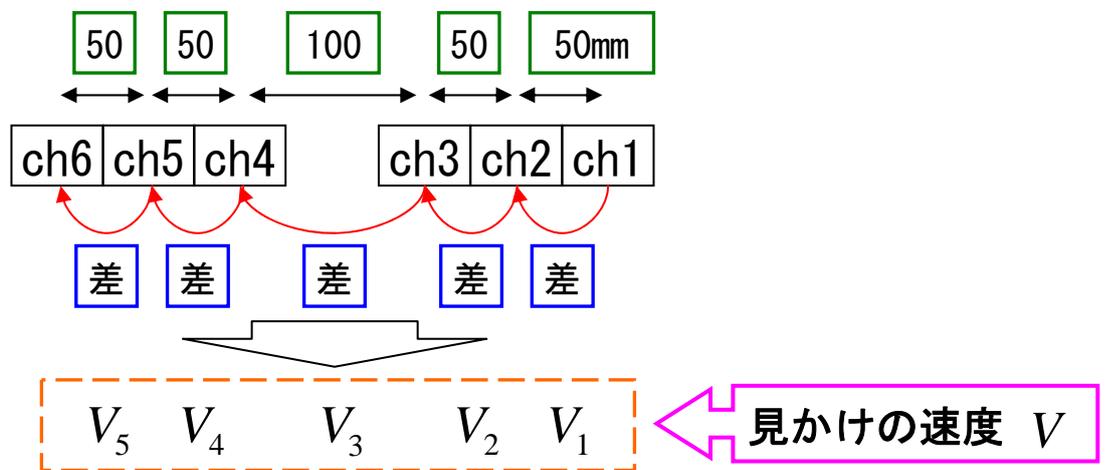
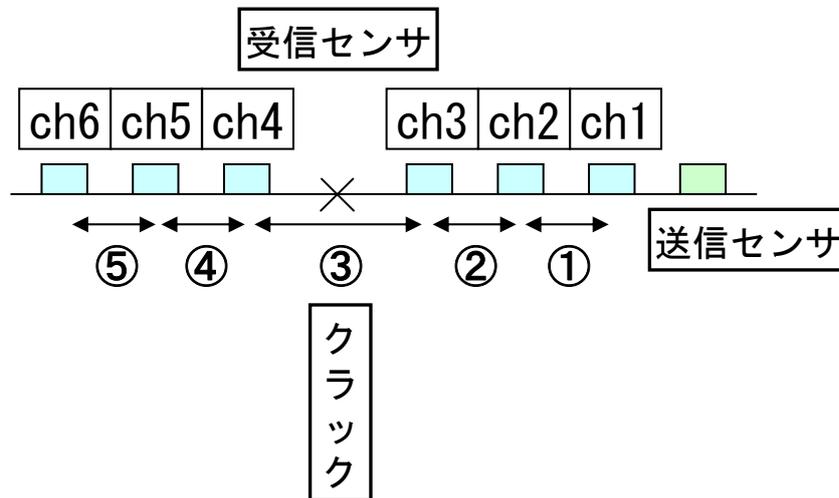


図4.18 見かけの速度算出方法

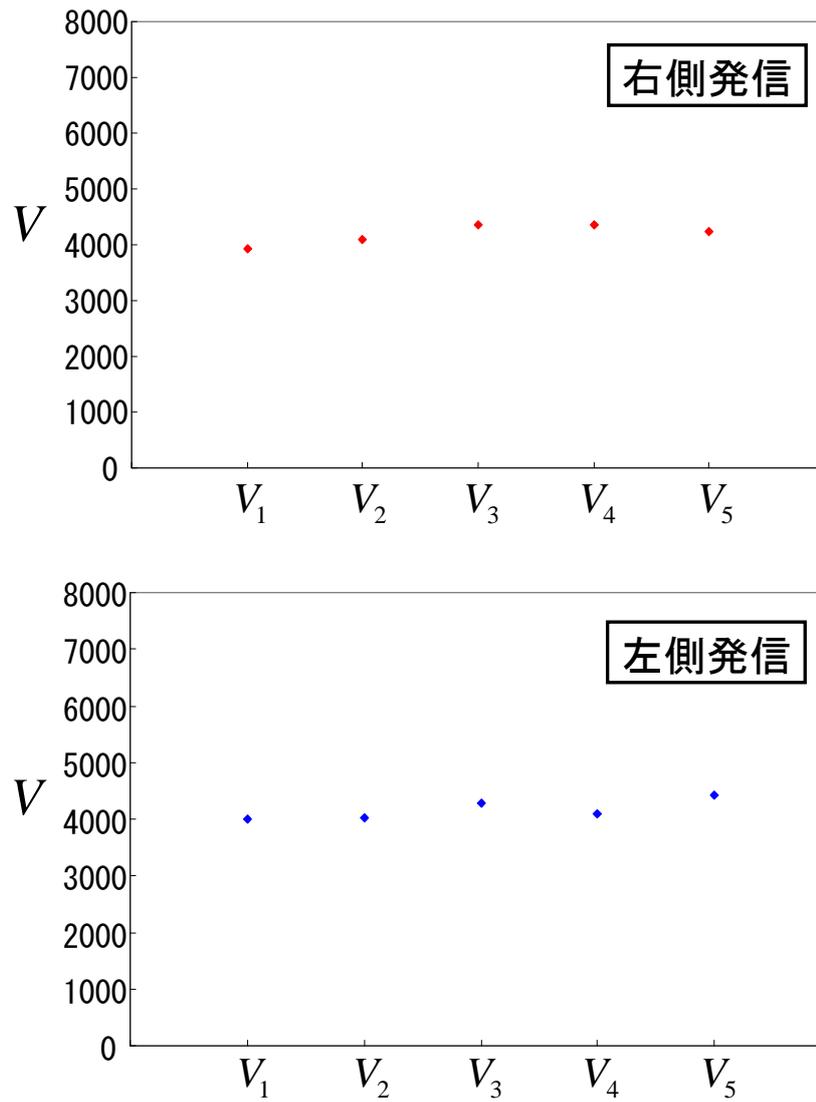


図4.19 見かけの速度結果（健全部）

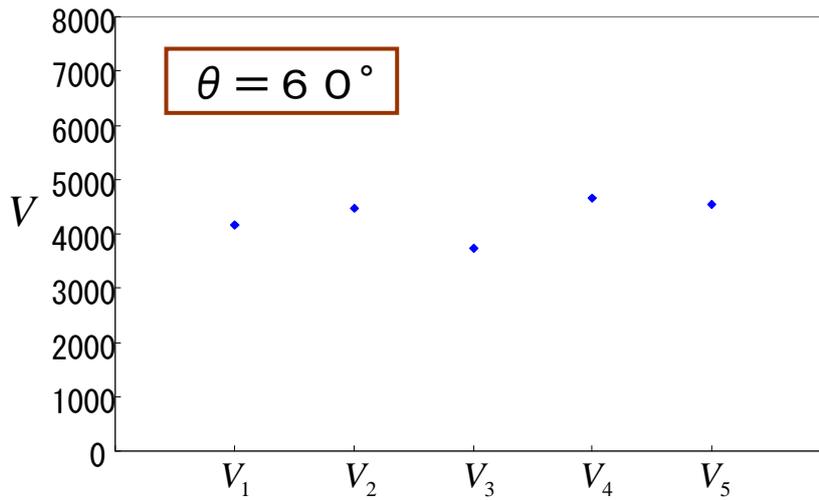
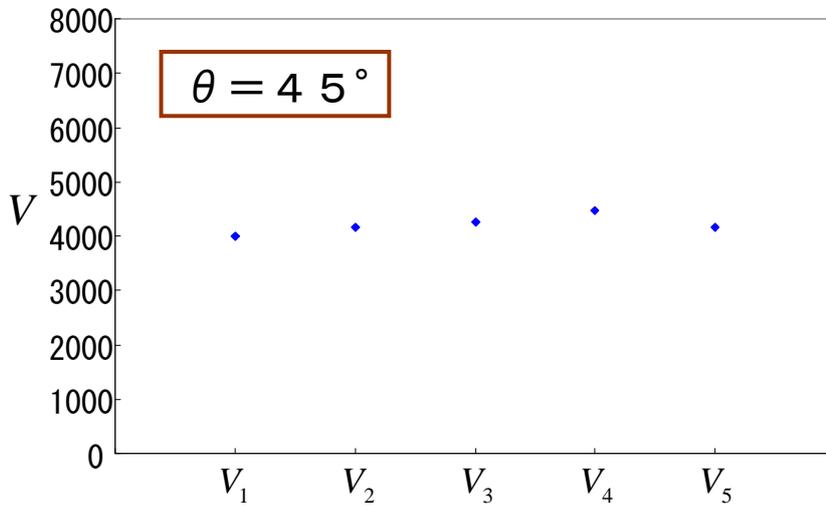
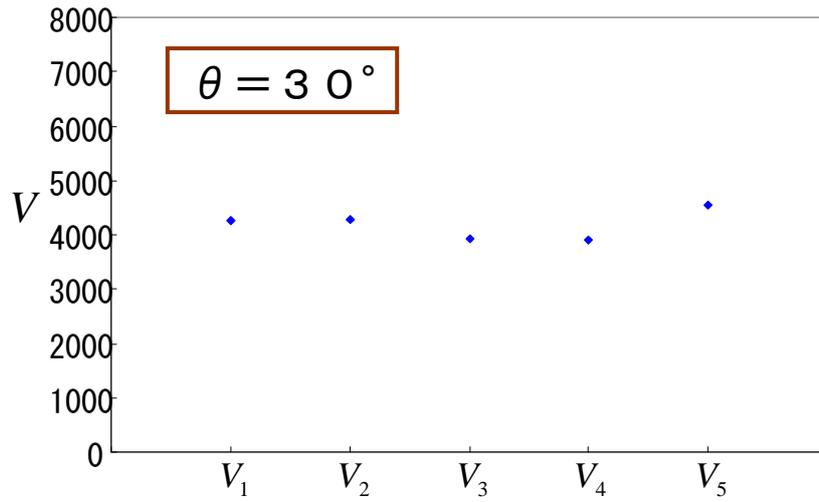


図4.20 見かけの速度結果 (30° ~60° )

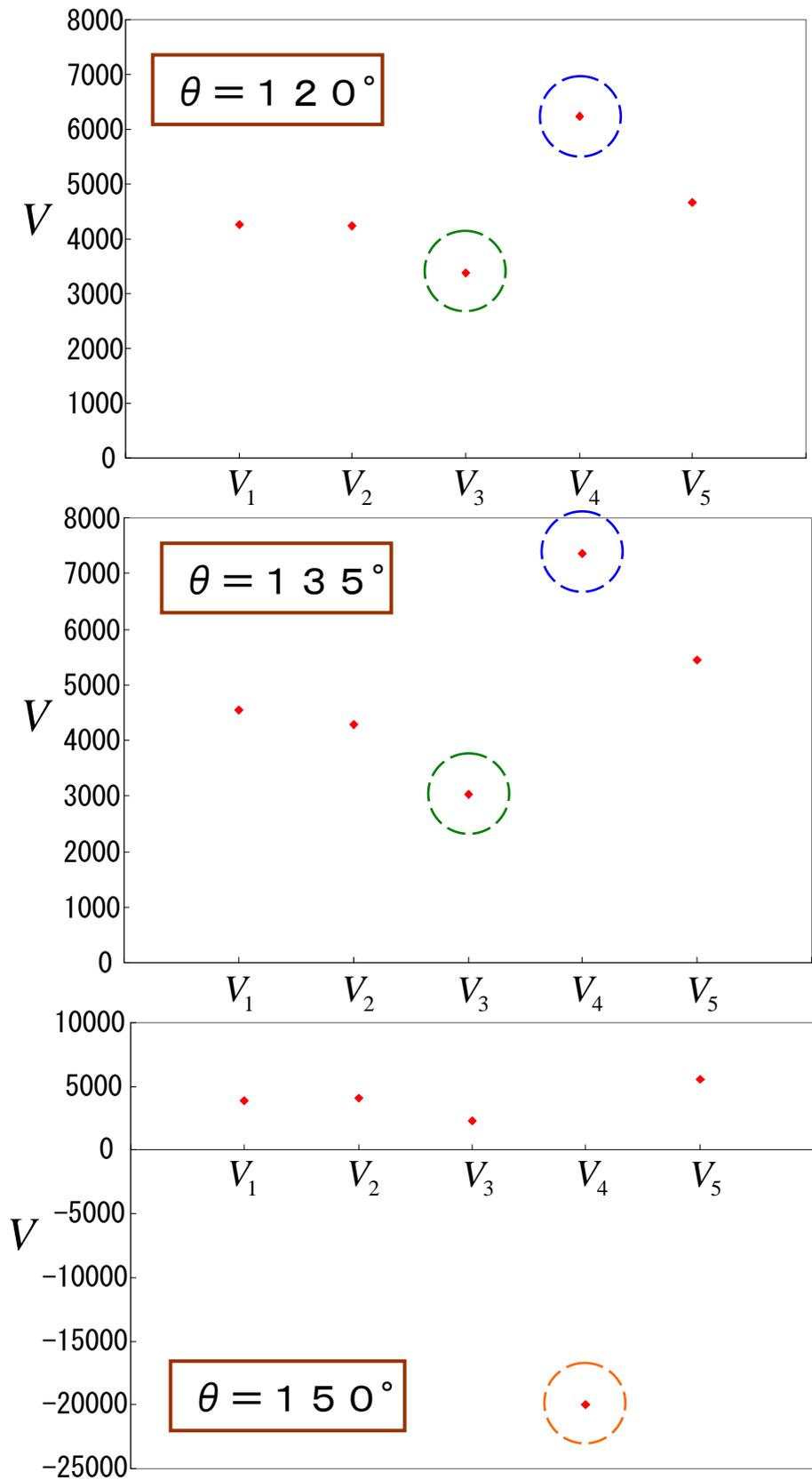


図4.21 見かけの速度結果 (120° ~150° )

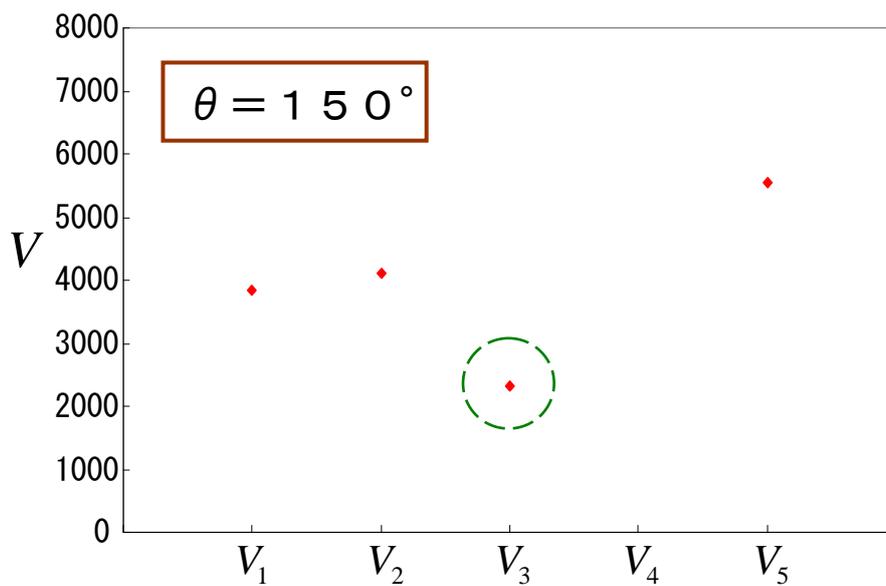
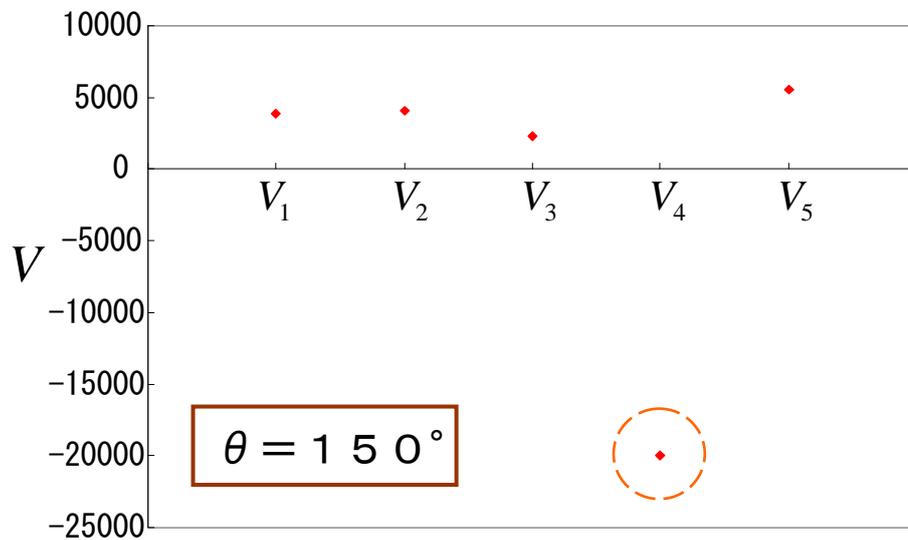
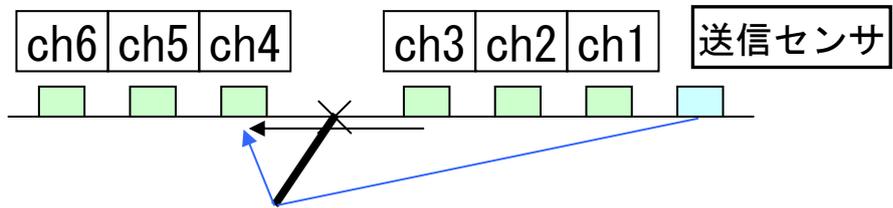
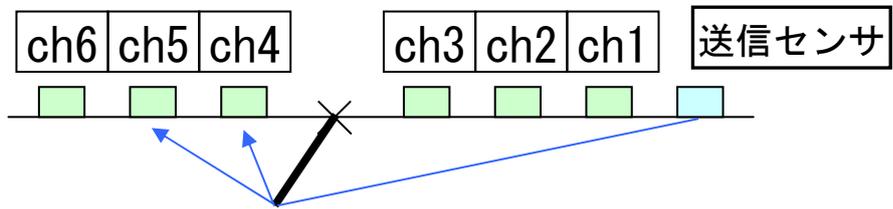


図4.22 見かけの速度結果 ( $150^\circ$ )

◎  $V_3$  の速度低下について



◎  $V_4$  の速度増加について



◎  $V_4$  の負の速度について

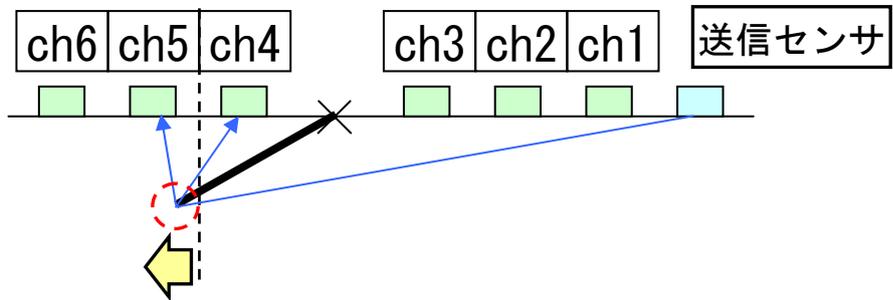


図4.23 見かけの速度変化の原因 (120° ~150° )

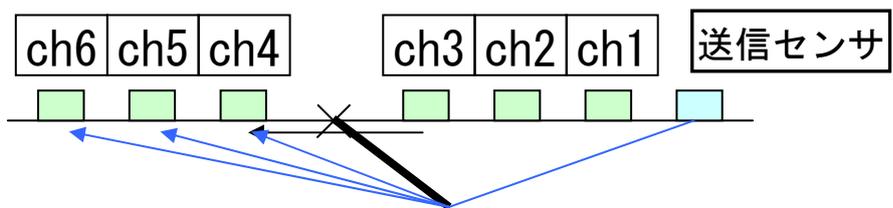


図4.24 見かけの速度変化の原因 (30° ~60° )