

擬似損傷を導入したモルタル試験体の  
AE トモグラフィ法による内部損傷の可視化  
に関する研究

平成 26 年 2 月 21 日

京都大学工学部地球工学科土木工学コース

高岡佑樹

## 要旨

2012年の笹子トンネルの天井板崩落事故など、インフラの機能低下は多くの犠牲をともなう。このように、近年、我が国では橋梁やトンネルなどのインフラ構造物の老朽化が問題となっている。また、年々削減される建設投資額も考慮すると、今後は構造物を効率的に維持管理していくことが重視されると予測できる。一般に、土木構造物は、様々な条件下で使用されている。しかし、計測箇所が限定される中で、内部の損傷を精度良く評価することは困難であると考えられる。また、維持管理を行う上で、構造物に大規模な変状が生じる前に補修・補強を行う予防保全の重要性は認識されているが、現状では予防保全に十分に資する診断手法は確立されていない。そこで、内部損傷を早期に定量的に診断する手法が求められているのである。

既往の研究において、非破壊診断技術の一つであるAE法とトモグラフィ法を応用したAE速度トモグラフィ法が新たな損傷評価手法として提案された。この手法は位置標定とトモグラフィ解析を同時に行うことで検査対象内部の速度構造を反映した解析を行うものであり、これまで筆者らのグループにより2次元AEトモグラフィの実構造物への適用性が確認されている。しかし、この手法では、損傷が2次元平面に投影されるため、より正確な損傷位置を立体的に表現できる手法が求められていた。

本研究では、筆者らのグループが提案し新たに開発した3次元AEトモグラフィの有用性を2種類の試験体を用いて検討した。具体的には、岩石供試体と擬似損傷を導入したモルタル試験体にて検討を行った。その結果、岩石供試体では、破壊の進展の様子がAEトモグラフィにより確認され、モルタル試験体では、損傷領域を特定することができた。また、今後、実構造物に適用する際の課題も明らかにすることができた。

## 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 AE (アコースティック・エミッション) .....	4
2.1 概説 .....	4
2.2 AE 計測法 .....	4
2.3 AE の波形特性 .....	5
2.4 AE パラメータ .....	5
第 3 章 AE トモグラフィ .....	8
3.1 AE 位置標定法 .....	8
3.2 トモグラフィ法 .....	9
3.3 AE 速度トモグラフィ法 .....	11
3.3.1 AE 速度トモグラフィの AE 位置標定手法 .....	12
3.3.2 AE 速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法 .....	13
3.4 3 次元 AE 速度トモグラフィ法 .....	14
3.4.1 2 次元 AE 速度トモグラフィの 3 次元への拡張 .....	14
3.5 既往研究の成果 .....	16
第 4 章 三軸圧縮試験中の岩石供試体への 3 次元 AE 速度トモグラフィの適用 .....	18
4.1 目的 .....	18
4.2 既往の研究 .....	18
4.2.1 供試体概要 .....	18
4.2.2 実験方法 .....	18
4.2.3 既往の研究の実験結果と課題 .....	19
4.3 解析結果と考察 .....	20
4.3.1 2 次元 AE 速度トモグラフィによる解析結果 .....	20

4.3.2 3次元 AE 速度トモグラフィによる解析結果 .....	21
4.4 まとめと今後の課題 .....	22
<b>第 5 章 擬似損傷を導入したモルタル試験体の損傷可視化に関する実験</b> .....	<b>24</b>
5.1 目的 .....	24
5.2 実験概要 .....	24
5.2.1 実験概要 .....	24
5.2.2 能動的に発生させた弾性波を用いた弾性波トモグラフィ .....	25
5.2.3 荷重により生じた AE を用いた AE トモグラフィ .....	26
5.3 実験結果と考察 .....	26
5.3.1 能動的に発生させた弾性波を用いた弾性波トモグラフィ .....	26
5.3.2 荷重装置により生じた AE を用いた AE トモグラフィ .....	27
5.3.3 結果の比較 .....	27
5.4 まとめと課題 .....	28
<b>第 6 章 結論と今後の展望</b> .....	<b>29</b>
6.1 本研究で得られた知見 .....	29
6.2 今後の課題と展望 .....	29
<b>参考文献</b> .....	<b>31</b>
<b>謝辞</b> .....	<b>33</b>

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

我が国では、戦後の復興期から高度経済成長期にかけて数多くの社会資本が設備され、現在もその多くが継続的に使用されており、**図 1.1**のように今後供用 50 年を経過する社会資本は大幅に増大する<sup>1)2)</sup>。これらの構造物を維持管理していくために多額の費用が必要となってくるが、**図**のように建設投資額は 1990 年代をピークに減少している。一方で、維持管理が不十分で老朽化した土木構造物の事故も顕在化しつつある。2012 年 12 月に中央自動車道、笹子トンネルにおいて、老朽化した天井板の崩落により 9 名の尊い命が奪われるという事故が発生したことは記憶に新しい。このような事故を防ぐためにも、土木構造物を効率的に維持管理する戦略的な維持管理手法が求められている。

ここで、コンクリートなど様々な土木構造物や構造物材料の維持・管理について考えると、床版などの土木構造物においては、劣化の進展は穏やかで補修の緊急性が低い。この場合、コストを考慮した補修時期の決定が一般的で、アセットマネジメントの考え方にに基づき、いかに LCC（ライフサイクルコスト）を最小にするかにメンテナンスの重点が置かれる。ここで、構造物の補修・保全には事後保全と予防保全という考え方がある。両者の違いは補修作業を行うタイミングによるものである。事後保全は構造物の劣化が顕在化してから補修を行う。これに対し、予防保全は劣化が顕在する前の段階で補修を行うというものである。**図 1.2**より LCC の観点から、予防保全は事後保全よりも少ない予算で構造物の長寿命化を図ることが可能であるとされ<sup>3)4)</sup>、予防保全の方がより優れた保全方法と考えることができる。そのため、構造物の維持管理の方法として、予防保全の実施が必要となるが、予防保全を実施するためには目視では検知できない内部の損傷の初期段階を検知・評価する必要がある。

そのため、様々な土木構造物にも広く適用可能で、内部の損傷位置と損傷規模を早期に検出可能な手法が求められている。しかし、現状としては、そのような内部損傷を定量的に評価する手法が確立されていない。現在までに提案されている非破壊検査手法としては、超音波法<sup>5)</sup>、X 線法、電磁波レーダー法など様々な手法が挙げられる。しかし、これらの手法は適用可能対象やコスト、あるいは損傷の早期検出において多くの課題を抱えている<sup>6)7)</sup>。

よって、本研究では、クラック形成における微視的破壊からクラック形成後の巨視的破壊に至るまで評価可能で、かつ対象破壊規模に応じた周波数を用いることで微視的損傷から巨視的損傷まで対応可能な AE トモグラフィ法について研究を進める。

## 1.2 研究の目的

顕在化以前の劣化や損傷により第三者に甚大な被害をもたらす事故が今後増大していくと考えられる。本研究では、土木構造物の健全性判断に必要となる内部損傷領域を定量的に診断できる技術の確立を目指す。土木構造物の健全性評価に寄与できるであろう AE トモグラフィに着目し、土木構造物の損傷可視化を目指し研究を進める。そこで筆者らのグループが提案し新たに開発した 3 次元 AE トモグラフィの適用可能性を検討していくことにする。まず、従来の 2 次元 AE トモグラフィで破壊の進展を概ね確認することができた岩石供試体に 3 次元 AE トモグラフィを適用し、2 次元 AE トモグラフィと同等以上の結果が得られるかどうか比較検討する。さらに、室内実験として既知の擬似損傷を導入したモルタル試験体に 3 次元 AE トモグラフィを適用し、従来手法の AE を用いない 3 次元 トモグラフィと比較し、3 次元 AE トモグラフィの妥当性を検討する。

## 1.3 既往の研究

本節では、AE トモグラフィ法を構成する AE 法とトモグラフィ法に関して既往研究を概観する。

AE 法をコンクリート床版の疲労損傷評価に適用した研究として、湯山ら<sup>8)</sup>は繰り返し荷重試験によりコンクリート床版内から AE 波を発生させ、その AE 波を利用して床版の損傷について検討した。その結果として、ひび割れ密度の履歴と AE 活動度の履歴を対照することにより、疲労荷重下における損傷の進展を AE の計測により予測・評価できることを示した。そして、ひび割れの目視観察結果と AE 発生源の平面位置標定結果を比較することで、AE 源位置標定を用いて、ひび割れ発生部位をある程度特定化できることも明らかにしている。また、AE 法を用いて損傷の進展を評価するには、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であることも示した。以上より、定期的な AE 計測で損傷進展が評価できるため、

AE法は実用的・経済的に有効な手段であることが示唆された。

しかし、AE法は既存の損傷位置で二次AEが発生しない場合にはその損傷が評価できないという欠点がある。そこで、弾性波を励起させるトモグラフィ法による追加計測が必要となる場合が多い。塩谷ら<sup>9)10)11)</sup>は、道路橋床版やダムなどの土木構造物に対して計測領域を取り囲むようにして、センサを複数の表面に設置し、弾性波の送受信を行う断面トモグラフィ法により得られる各セルの速度構造から、各領域の損傷レベルの推定、あるいは損傷部の可視化の可能性を示した。しかし、トモグラフィ法においては、セルを通過する波線密度が大きいほど解析精度が良くなる。そのため、広範囲の計測を行うには多数のセンサが必要となる。さらに能動的な弾性波の励起が必要であるため、実構造物への適用には多くの課題がある。

#### 1.4 本論文の構成

本論文の構成は全6章からなる。

第1章では、序論として研究背景、目的、および既往の研究との関連を述べた。

第2章では、AEの概説をするとともにAE計測法や特性パラメータを説明する。

第3章では、まず、本研究に用いたAEトモグラフィについての概要と基礎理論を説明する。

第4章では、崩落が懸念された岩盤のコアボーリングから得られた岩石供試体の三軸圧縮試験で発生したAEを利用して内部の損傷領域の評価と損傷の進展が可視化できるという既往の研究に対して、3次元AEトモグラフィを用いて、従来の結果との比較検証を行う。検証を行うために岩石供試体のセンサ断面で行った2次元AEトモグラフィの解析結果を用いる。

第5章では、擬似損傷を導入したモルタル試験体に載荷試験を行い、3次元AEトモグラフィ法によって内部の擬似損傷の可視化できるか検討を行う。本手法の妥当性を検討するために、能動的に弾性波を励起させ、従来手法の3次元トモグラフィ解析を行ったトモグラフィ結果を用いる。

第6章では、第4、5章で得られた知見からまとめを示し、また今後の課題についても考察を行う。

## 第2章 AE（アコースティック・エミッション）

本章では、AEやその計測法などを概観する。また、損傷と密接に関係するAEパラメータ指標についても説明する。

### 2.1 概説

AEとは、アコースティック・エミッション (Acoustic Emission) の略である。これを直訳すると「音響の放出」となり、この音響の放出は物体の破壊や変形に起因するものである。実際の破壊では、まず微小なレベルの破壊があり、それらが集積されて最終的な大規模な破壊（主破壊）に至る。AEを正確に定義すると、「固体材料内部の微小な破壊、あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象」といえる<sup>12)</sup>。AE法が適用されている分野は金属分野、岩盤および地震学の分野、コンクリート分野など多岐におよぶ。近年では、セラミック、繊維補強プラスチックなどの先端複合材料から医療分野にまで及んでいる。AEは微小破壊の監視手法として特に有効な手段である。また、先述のような幅広い適用範囲からもわかるように微小破壊が問題となる材料には何にでも適用可能である。そのため、インフラ構造物の予防保全にも活用できる計測法として注目されている。

### 2.2 AE計測法

AEは原理的には図2.1に示すような計測装置で検出される。AE現象により生じた弾性波は物体内を伝播し、物体表面に取り付けられたAEセンサによって検出され、電気信号に変換される。そして、信号はプリアンプで増幅され、AE計測装置本体内でエネルギーや到達時刻などのパラメータの抽出、演算が行われ、得られた結果が出力される。ここで、AEは非常に微弱であるため、センサは高感度である必要がある。また、検出された波形は縦波（P波）、横波（S波）、表面波、境界での反射波などが重なりあい非常に複雑な波形を取っており、数 $\mu\text{V}$ -数百 $\mu\text{V}$ の電圧で数kHz-数MHzの周波数成分を持っている。そこで、センサは対象とする破壊の規模や材料により適切な周波数を選択し、それに見合った周波数特性のセンサを用いる必要がある。

## 2.3 AE の波形特性

図 2.2 のように AE が弾性波動として AE センサに到達する過程では、縦波（P 波）、横波（S 波）、表面波など様々な波動が確認される。このうち、P 波、S 波は AE 発生源に直接関係し、実体波とも呼ばれる。また、次節以降説明するが、AE 速度トモグラフィに有効な情報は初動の読み取り時間であり、そのことから到達時間の最も速い P 波の到達時間が利用されている。本節では、このような波の種類（振動モードという）に着目し、特徴やそれを利用した有効な手法などを述べる。

### (a) 縦波（P 波）

縦波とは粒子の振動が波の進行方向と平行な方向、つまり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を伝播するため、固体、液体、および気体の中を伝播することが可能である。また、弾性波の中では速度が最大であり、P 波のエネルギーは弾性波全体の約 10% を占める。

### (b) 横波（S 波）

横波とは粒子の振動が波の伝播する方向と垂直な方向、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こ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。

## 2.4 AE パラメータ

図 2.3 に示すように得られた AE 波形から、様々な波形特性パラメータを得ることができる。これらのパラメータの発生履歴、頻度、相関、パターンなどを詳細に解析することで、欠陥の発生条件や進展特性を調べることができる。本節では、破壊の進展を調べることができる 8 つの AE パラメータについて記す。

#### (a) 立上り時間(Rise Time)

弾性波がしきい値を越えた時刻から最大振幅を取るまでの時間であり、各波形の立ち上がりの鋭さに関する情報を与える。

#### (b) 継続時間(Duration)

収録された1つの波形の継続受信時間を指す。この時間は最初にしきい値を超えた時刻から最後にしきい値を超えた時刻までの時間である。一般的に弾性波は、上述しているようにP波とS波が発生し、それらの速度が異なるためにDurationはある程度の長さ観測される。しかし、弾性波のエネルギーが小さい、もしくは弾性波が発信源からセンサまでの間に大きく減衰してしまう場合、受信時のエネルギーが小さくその波形の最大振幅付近のみがしきい値を超える場合がある。その場合は極端に小さい値をとることもあり、最小で $1\mu\text{s}$ となる。

#### (c) リングダウンカウント数(Ring-down Count)

しきい値を超える振幅に対してそのすべての振動回数を指す。AEの発生頻度は微小ひび割れの発生回数に依存するが、どの程度のひび割れに対応して計測されたかは伝播媒体、AEセンサの周波数特性に大きく依存する。そのため数字そのものにはあまり意味はなく、後述するAEヒットと同様に、ある条件下でいかにアクティブに発生しているかどうかの相対的な指標と考えるべきである。

#### (d) AE最大振幅値(Amplitude)

収録されている1波形の中で最も大きい振幅を指す。一般的には、AE発生源での微小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、破壊規模の大小に応じて振幅値が得られる。ただし、減衰の影響を考慮する必要があるということである。例えば岩質材料では、金属材料に比べ減衰が大きいため、伝播距離により振幅は大きく減少する。その結果、AE発生源が不明な場合、センサ近傍で発生した規模の小さいAE波と離れた地点で発生した規模の大きいAE波が、結局は同程度の振幅値のAEとして検出される場合があることに注意しておかなければならない。

#### (e) AE ヒット・イベント (AE hit, Event)

AE センサに入力された AE 信号の 1 つの波形を 1 ヒットという。これに対して、各センサで受信された同波形をまとめて 1 イベントという。つまり、発生した AE 事象が 1 イベントの場合でも、複数個の AE センサで検出されれば AE センサ個数分のヒット数として計数される。クラックの発生、進展などの突発型 AE の発生頻度や発生形態を推定するのに適した指標とされる。このパラメータから微小な破壊の発生頻度が得られ、ある条件下において、いかにひび割れがアクティブに発生しているかが検討できる。

#### (f) エネルギー(Energy)

AE 計測機器により定義が異なり、AE の包絡線検波波形の面積、AE 波形の積分値、あるいは最大振幅の 2 乗などとされる。発生した AE のエネルギーも相対的な比較を行う上では最適なパラメータといえる。

#### (g) 周波数(Frequency)

一般的な AE 波形にフーリエ変換を施すと、**図 2.4** のような周波数分布が得られる。この周波数分布に関して、最も卓越した周波数を卓越周波数 (Peak-Frequency)、周波数分布の重心を中心周波数 (Center-Frequency) と呼ぶ。また、リングダウンカウント数を継続時間で除したものを平均周波数 (Average Frequency) と呼び、後述する破壊種別の分類方法に利用する。

#### (h) RA 値/平均周波数(RA value/Average Frequency)

RA 値は最大振幅値を波の立ち上がり時間で除した値の逆数であり、いわば波の急峻度の逆数を取ったものである。ここで、そもそも AE はき裂が生じる際の一次 AE とき裂が摩擦などによって進展する際の二次 AE に分類される。一次 AE は破壊を突発的に引き起こすものなので、波の急峻度は大きく、平均周波数も大きくなる。また、二次 AE は既存のき裂の可逆的挙動、つまり摩擦やそのき裂からの流体の漏えいなどで生じる現象なので、急峻度は小さく、平均周波数も小さくなる。そこで、大津ら<sup>13)14)</sup>は**図 2.5** のようにこれらのパラメータを用いて、検出された AE の発生原因の分類方法を提案した。ここで、RA 値は波の急峻度の逆数であることを考慮する必要がある。

### 第3章 AEトモグラフィ

本章では、解析に用いる AE トモグラフィの概要と基礎理論、および既往の研究成果について述べる。まず初めに、AE トモグラフィを構成する 2 つの手法である AE 位置標定法とトモグラフィ法について述べる。続いて、AE 位置標定と速度トモグラフィを同時に行う 2 次元 AE 速度トモグラフィ法について述べる。最後に、本研究で主に用いる 3 次元に拡張した AE 速度トモグラフィについて、2 次元との違いについて概説する。

#### 3.1 AE位置標定法

AE 法は内部欠陥の位置情報を得るために行う手法である。基本的な手法としては、複数個のセンサを物体表面に設置し、供用荷重によって内部の微小な破壊から生じる AE が各センサに伝わる到達時間差を利用してき裂箇所の位置を決定する方法がある。

AE 法の利点は以下の 3 点である。

- ・ 自然発生する AE を利用することで、能動的に弾性波を励起する必要がなくアクティブな損傷(き裂)を特定できる点。
- ・ 内部から生じる AE を利用することで、発信時間を計測するセンサが不要で、センサの取り付け位置が一平面だけでも十分である点。
- ・ 損傷の進展にともない AE が発生し、その AE を利用して位置標定を行うので、リアルタイムで損傷箇所を検出できる点。

以上のような利点を持つ AE 法であるが、以下のような欠点もある。

- ・ 過去に発生した損傷からは、損傷が顕在化し、多くのせん断型クラックから生じる二次 AE を除き、クラック発生に起因する AE (一次 AE) が発生しないことから、その損傷箇所の検知は難しいという点。
- ・ ノイズが大きい場合にしきい値を高く設定すると、AE 信号が微弱であるために、到達時刻が P 波の初動と一致せず、エネルギーの大きい S 波や表面波の到達時刻と誤ってしまう点。
- ・ 対象構造物内部の速度構造を一定と仮定して位置を特定しており、内部の

速度構造が一定ではない実構造物や逐次進行する破壊源を有する材料においては、AE法による標定点は必ずしも正しいとは限らない場合がある点。

このような欠点があることから、従来のAE法では位置標定にある程度の誤差が含まれることを考慮せざるを得ない。

### 3.2 トモグラフィ法

トモグラフィ法には速度トモグラフィ法と減衰トモグラフィ法などがある。一般的に、クラックに水や空隙が存在すると、それらを透過する弾性波速度は340-1500 m/s程度と考えられるので、健全部分がそれに比べて十分大きな速度構造の場合、クラックは低速度域として弾性波速度で識別可能である。また、近年、地震学のQ値解析と同様に、受信波形の振幅に着目した減衰トモグラフィの研究も精力的に行われているが<sup>15)</sup>、本研究では、速度トモグラフィ法を採用する。減衰トモグラフィ法を採用しなかった理由は以下の2点である。

- ・ コンクリートのような振幅減衰量の大きな材料では、弾性波伝播中に損傷部分を通過すると、過敏な反応により急激に振幅の減衰が生じるため、損傷評価が難しい<sup>16)</sup>。
- ・ 振幅の減衰量と損傷度には定量的な関係が示されていない。

損傷部分を弾性波が伝播する際にも適度な速度低下がみられ、速度低下と損傷度にも関係性が示されている速度トモグラフィ法の方が多くの研究や実務で利用されている。以上より、既往の研究では速度トモグラフィ法を中心に研究が進められてきており、本研究でも、速度トモグラフィ法を用いて解析を行っていく。

速度トモグラフィ法は、調査断面、空間を複数のセルに分割し、調査対象内部の速度をセルごとに求めることで構造物内部の速度構造を検出する手法である。具体的な方法として、まず、対象物体を取り囲むようにセンサを設置し、それぞれのセンサ近傍でハンマやパルサーを用いて弾性波を励起する。そして、そのセンサで波形を受信した時刻を発信時刻とみなし、発信時刻を得る。このように、弾性波の発信時刻と受信時刻が既知である多数の波線を調査領域に透過させる。次に、セル内の伝播速度が一定であると仮定し、その伝播時間を用いてそれぞれ

の波線の伝播速度を求め、観測値に近づけるよう各セルの速度値を更新させる。最終的には、**図 3.1** のような解析手順を踏み、調査領域の内部構造を 2 次元の速度分布として求め、内部の不均質性や損傷を低速度として推定する。

以下に、その原理を説明する。**図 3.1** に示すように、入力情報として、弾性波の伝播時間、調査領域のセル分割、発信・受信点座標を入力し、各セルの初期スローネスを算出する。ここで、スローネスとは伝播速度の逆数である。この初期スローネスを用いて計算された各波線の理論到達時間と実際に得られた時刻との差を各セルに振り分け、再計算を行い、モデルの修正を行うという流れになっている。モデル修正の際には波線追跡が行われる。これは、初期スローネスの段階では弾性波の直接経路が仮定されているが、実際には、発信点と受信点の間に、ひび割れや空隙が存在する場合、波動は屈折または回折することで伝播時間が最短となる経路を通過する。このことを考慮し、再計算の際には迂回する経路も検討するという解析法である。この繰り返し計算には同時反復法が用いられている。また、同時反復法については以下に示す。また、波線追跡法の詳細は、3次元に拡張する際に述べる。

## 1. 同時反復法<sup>17)</sup>

得られたモデルについて求めた理論走時を  $T_{oi}$ 、観測走時を  $T_{ci}$  とすると、その差である走時残差を波線が通過したセルに、通過した長さに応じて振り分け、そして、それぞれのセルについて、振り分けられた走時残差と波線がセルを切る長さを用いて、そのセルのスローネスの補正量を求めるという方式である。

つまり、式(3.1)に示したように、すべての波線について走時残差  $\Delta T_i$  を求める。

$$\Delta T_i = T_{oi} - T_{ci} \quad (3.1)$$

次に、式(3.2)を用いて、走時残差を波線が通過するセルに振り分ける。セル  $k$  を横切る波線の長さを  $l_{ik}$ 、全ての波線の長さ  $L_i$  とする。

$$\Delta t_{ik} = \frac{\Delta T_i \cdot l_{ik}}{L_i} \quad (3.2)$$

セル  $k$  のスローネス補正量  $\Delta S_k$  は

$$\Delta S_k = \frac{\sum_i \Delta t_{ik}}{\sum_i l_{ik}} \quad (3.3)$$

として求められ、 $I$  回目の反復計算によって求められるセル  $k$  のスローネス  $S_k^{(I)}$  は、 $(I-1)$  回目の反復計算によって得られているスローネスを  $S_k^{(I-1)}$  とすると、

$$S_k^{(I)} = S_k^{(I-1)} + \Delta S_k \quad (3.4)$$

で求めることができる。

速度トモグラフィ法は、発信時刻と受信時刻の既知である多数の波線を透過させるために、既知の情報が多く、最終的な速度構造の精度が高いことが知られている。しかし、以下のような課題がある。

- ・ 波線密度の向上のためにセンサ配置の間隔を小さくとる必要がある。
- ・ センサを配置する際、対象を取り囲むように両面に設置する必要がある。
- ・ 能動的に弾性波を励起する必要がある。

### 3.3 AE速度トモグラフィ法

本節では、本研究で用いている AE 速度トモグラフィ法の概要と基礎理論を述べる。AE 速度トモグラフィ法も先述した速度トモグラフィ法も基本的な考え方は同じである。異なる点は、速度トモグラフィ法が、能動的に発信させた弾性波を用いているのに対して、AE 速度トモグラフィ法は構造物中から発生する AE 波を利用しているという点である。つまり、AE 速度トモグラフィ法では、AE 源から受信センサまでの波線を利用してトモグラフィ解析を行うことになる。ここで、従来の速度トモグラフィには発信源の時刻が必要となるが、AE 源は位置標定によって推定されるものであるため、AE 源の発信時刻は未知であり、その推定が重要となる。しかし、既往の AE 法の位置標定では、内部の速度構造を一定と仮定して解析を行うため、その標定された AE 源を用いてトモグラフィ解析を行っても速度構造は誤差を含んだほぼ一定の値として検出されるのみである。そこで、AE 速度トモグラフィと称して位置標定とトモグラフィを同時に行うプログラムが新たに考案された。

このプログラムの特徴として次の 2 点が挙げられる。

- ・ レイトレーシングを用いた位置標定とトモグラフィ解析の交互作用を取り入れている点である。これによって、対象構造物内部の速度構造を考慮した位置標定を行うことが可能になり、さらにその更新された位置標定点を用いてトモグラフィ解析を行うことができる。
- ・ 既往の AE 法は発信源に対して 1 つずつ位置標定を行っているのに対し、AE 速度トモグラフィでは複数の発信源を同時に推定するという点が挙げられる。この理由としては、複数の発信源を用いることによって多数の波線の利用が可能で、対象内部の速度構造の更新を精度良く行うことができるからである。

以下に、AE 速度トモグラフィの位置標定手法とトモグラフィ解析手法についてそれぞれの概要を述べる。

### 3.3.1 AE速度トモグラフィのAE位置標定手法

AE 速度トモグラフィにおいては、対象物内の弾性波速度の異方性や不均質性を考慮できるように試験体に位置標定点の候補となるノードを設定し、計測結果から最充のノードを位置標定点とするアルゴリズムを取り入れている。プログラムへの必要な入力情報は、

- ・ 受信点の位置データ
- ・ 標定点候補のノード
- ・ センサ間の到達時間差
- ・ 調査対象内部の平均伝播速度

の 4 つである。

ここで、ノード設定に関して、セルと中継点という概念を用いる。AE 速度トモグラフィではノードが位置標定点の候補となるため、ノードを細かく設定する必要がある。しかし、ノードを細かく設定すると、1 つのセルを通過する波線が減少し精度が低下することや、セルの数が多くなるにつれて計算時間が長くなるといった問題が生じる。そこで、AE 速度トモグラフィにおいては、セルを決定するセルノードとセル間隔を分割する中継点を設定することとした。例えば、分割数を 4 とする場合、 図 3.2 のような中継点が設定される。このセルノードと中

継点全てが位置標定点の候補となる。

次に、位置標定手法について説明するために、例として図 3.3 のようなセンサを  $n$  個用いたノードを  $m$  個有するモデルを考える。初めに、ある特定のノード  $i$  から発信した弾性波をセンサ  $j$  で時刻  $t_j$  に受信するための“ノード  $i$  を発信すべき時刻  $T_{ij}$ ”を内部の速度構造を考慮して算出する。この作業を全てのノードで試行し、各ノードでセンサの個数が  $n$  個の推定発信時刻  $T$  が算出される。この発信時刻の推定には波線追跡法が用いられている。そして、センサの数だけ求められた推定発信時刻の分散を式(3.5)で全てのノードについて計算し、得られた分散が最も小さいノードを標定点とする。

$$s_T^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (T_{ij} - \bar{T}_i)^2 \quad (3.5)$$

ここで  $s_T^2$  は分散、 $n$  はセンサ数、 $T_{ij}$  は観測値、 $\bar{T}_i$  は観測値の平均値である。

### 3.3.2 AE速度トモグラフィの速度トモグラフィ解析手法

AE 速度トモグラフィと速度トモグラフィの手法は基本的に同様であるが、1つ大きく異なる点として、発信点に上述した位置標定手法で求めた AE 源を用いることが挙げられる。前述したように、AE 速度トモグラフィでは発信源の発信時刻が未知であるので、発信時刻を推定する必要がある。この発信時刻は、位置標定の過程でセンサの数  $n$  個分得られた  $T$  の平均値とした。

その標定位置と発信時刻、そして対象内部の速度構造と波線追跡法を用いて理論走時を求める。また、発信時刻と各センサの受信時刻を用いて観測走時を求め、その残差とセルを通過する波線から同時反復法を用いて繰り返し計算を行う。

このように本プログラムでは、上述した位置標定とトモグラフィ解析を交互に行う仕組みになっている。図 3.4 に AE 速度トモグラフィの解析の手順を示した。まず、初期に入力されたスローネスで位置標定を行い、その初期位置標定点とセンサまでの到達時間差を用いてトモグラフィ解析を行う。その結果更新された対象内部の速度構造を用いてさらに位置標定を行い、更新された標定位置と発信時刻を用いてトモグラフィ解析を行う。このように位置標定とトモグラフィ解析を繰り返し計算することが、従来の方法に比べて大きく改善された点である。

### 3.4 3次元AE速度トモグラフィ法

これまで述べてきた AE 速度トモグラフィ法は、センサで囲まれた断面について解析を行う 2次元 AE 速度トモグラフィ法についてのことであった。しかし、この方法では、解析結果として二次元平面で示されるため、三次元構造物の測定では、センサ設置平面にない奥にある損傷も二次元平面に投影されてしまうという問題点があった。また、立体的な構造物においては、センサで囲まれた平面上での解析結果しか反映されず、構造物全体の損傷を把握することは困難であった。そのため、2次元 AE 速度トモグラフィ法の 3次元への拡張が急務となっていた。そこで、筆者らグループでは 3次元 AE 速度トモグラフィ法を開発し、AE 速度トモグラフィ法による解析手法を大きく飛躍させた。本節では、これまで述べてきた 2次元 AE 速度トモグラフィ法と 3次元 AE 速度トモグラフィ法の違いを述べる。

#### 3.4.1 2次元AE速度トモグラフィの3次元への拡張

3次元 AE 速度トモグラフィは、2次元 AE 速度トモグラフィにおける波線追跡法の内容を 3次元に拡張した。以下に、2次元プログラムの拡張する箇所の詳細を記述し、その後、3次元プログラムへの変更点を述べる。

#### 有限要素法における波線追跡法

この波線追跡法は有限要素法における解析メッシュ上で波線追跡を行っている。これによって、対象断面を三角形要素と四角形要素によって分割することが可能になり、中継点を設けることによって波線の再現精度を高めている。波線を構成する線分と要素境界との交点は、それぞれのセルを単純な形状に写像することによって求めることができる。例えば、以下のような関数によって、四面体要素においては正方形要素，三角形要素については直角二等辺三角形に写像される。

$$x(e, \eta) = \sum_i N_i(e, \eta) X_i \quad (3.6)$$

$$y(e, \eta) = \sum_i N_i(e, \eta) Y_i \quad (3.7)$$

ここで、 $x$ および $y$ は任意点の全体座標系における座標、 $e$ および $\eta$ は、要素座標系に

おけるその任意点の座標、 $X_i$ および $Y_i$ は、全体座標系における要素頂点の座標、 $N_i(e, \eta)$ は写像関数である。写像関数は、一般的に有限要素法において採用されている内挿関数を使用する。波線を構成する線分は明らかに直線であるため、2次元直交座標系においては、以下のように表される。

$$ax + by + c = 0 \quad (3.8)$$

このため、この直線の要素座標系における表現は、式(3.6)、(3.7)を式(3.8)に代入することによって、以下のように示される。

$$a \sum_i N_i(e, \eta) X_i + b \sum_i N_i(e, \eta) Y_i + c = 0 \quad (3.9)$$

これにより、線分と要素境界の交点は、式(3.9)に要素境界の要素座標系における座標を代入することによって求めることができる。交点の全体座標系における座標は、求められた要素座標系における交点の座標を式(3.6)、(3.7)に代入することによって求められる。これらにより、その線分における走時を求めることができる。

3次元AEトモグラフィは、この波線追跡法の内容を3次元に拡張するものである。

具体的には、波線の表現を3次元対応にするために、二平面

$$a_1 x + b_1 y + c_1 z + d_1 = 0 \quad (3.10)$$

$$a_2 x + b_2 y + c_2 z + d_2 = 0 \quad (3.14)$$

の交線とし、

$$z(e, \eta) = \sum_i N_i(e, \eta) Z_i \quad (3.12)$$

及び式(3.6)及び式(3.7)に、さらに式(3.12)を追加し、内挿関数を三次元要素対応に変更する。これにより、六面体に分割した対象領域においても、線分の走時を求めることができる。そして、先述した2次元プログラムと同様の解析手順を辿ることによって3次元AE速度トモグラフィが可能になる。

### 3.5 既往研究の成果

既往の研究では、上記の特徴を持った 2 次元 AE 速度トモグラフィを用いて室内実験でコンクリート供試体への適用性を検討し、以下の知見を得ている。

1. AE 源の数が増加することでトモグラフィ精度が上昇する。しかし、その中に位置標定誤差を含んだ AE 源を用いた場合、解析精度が低下する。また、少数の AE 源でも位置標定精度の高い AE 源を用いることでトモグラフィ解析が可能である。したがって、精度の高い結果を得るためには、正確な位置標定が行われた AE 源を選択して用いることが重要である。
2. AE 源の位置に関して、対象領域の中央に偏ってしまった場合、波線の通過するセルが限定され、解析結果に誤差が生じる可能性がある。それに対して、領域端部に AE 源が存在する場合はセルを通過する波線がある程度存在するため、トモグラフィによって損傷領域を検証可能である。つまり、波線密度を大きくすることで解析精度が向上する。
3. 既往の AE 法で内部の不均質性により位置標定結果に誤差が生じる場合でも、AE 速度トモグラフィで位置標定とトモグラフィを繰り返し計算することで AE 標定精度が著しく向上する。
4. 既往の研究では、センサ配置が 2 次元平面配置であっても、直方体供試体中央に存在する損傷部分から発生する AE を用いて、中央の損傷箇所を推定することができる。これによって、小さな供試体における AE 速度トモグラフィの適用性が明らかとなっている。
5. 解析に用いる AE 源が少数であっても、それらのエネルギーが大きい場合、対象内部の損傷を捉えることが可能である。
6. 現在使用されている構造物では、過去に生じた損傷で 2 次 AE が発生しなければ AE 源は未知であるが、既往の研究では損傷部分における既存の AE 源位置をそれ以降に発生した AE 源を用いて推定することができる。つまり、過去の損傷部分をそれ以降に生じた AE によって評価できる。

以上の結果を踏まえ、AE 速度トモグラフィには位置標定精度の高い AE 源を用いることが最も重要であると考えられる。ここで、位置標定精度を向上させるためには AE 波の初動を正確に読み取ることが大切である。そのためには P 波の初

動振幅が大きいことが必要であり、5 の結果とも合わせて、エネルギーの大きい AE 源を選択することで AE 速度トモグラフィの精度が向上すると考えられる。

既往の研究においては、室内実験により擬似損傷を与えた小規模実験体に 2 次元 AE 速度トモグラフィを適用し、その有用性を確認した。しかし、3 次元 AE 速度トモグラフィについての適用性は確認されていない。そこで、本研究では、まず、既往の研究で 2 次元 AE 速度トモグラフィの適用が確認された、実際の岩盤から採取した岩石供試体に、3 次元 AE 速度トモグラフィを適用する。このことにより、2 次元 AE 速度トモグラフィ法による結果と 3 次元 AE 速度トモグラフィ法による結果を比較・検討する。さらに、損傷位置が既知である擬似損傷を与えたモルタル試験体を作成し、その載荷実験より得られる AE 源を利用して、3 次元 AE 速度トモグラフィを適用し、内部損傷の可視化検証を行う。ここで、擬似損傷モルタルでは能動的に発生させた従来の弾性波トモグラフィも実施し AE トモグラフィ結果と比較検討することでの有用性を検討する。

## 第4章 三軸圧縮試験中の岩石供試体への3次元AE速度トモグラフィの適用

### 4.1 目的

2次元AE速度トモグラフィで破壊の進展を確認することができた岩石供試体を用いて、3次元AE速度トモグラフィを適用し、同等以上の結果が得られるかどうか検討する。検討にあたって、従来研究では行われていなかったセンサ設置2平面近傍について2次元AE速度トモグラフィを行い、破壊の全体像を2断面により確認した後で、3次元AE速度トモグラフィの適用を行う。

試験体は、北海道の立岩履道地区で採取された円柱岩石供試体である。実験は三軸圧縮試験を用い、軸差応力の増加にともなう内部損傷の進展時のAEデータを用いる。

### 4.2 既往の研究

#### 4.2.1 供試体概要

供試体のセンサ配置を図4.1に示す。供試体は北海道立岩履道地区での岩盤崩落現場からコアボーリングにより採取されたコアを直径100mm、高さ200mmに整形したものである。本供試体は凝灰岩を基礎岩石とし、その中に礫が含まれている。AE計測は、図4.1に示されるように8個のセンサを3次元に配置して行われた。本実験で使用したAEセンサは60kHz共振型で、シリコンシーリング剤を用い、供試体に直接接着させた。しきい値は50dBとした。その他、供試体には直交するひずみゲージを2対（合計4枚）設置し、供試体のひずみ量を求めることにより、ひずみ量とAEを時系列で比較検討可能な配置とした。

#### 4.2.2 実験方法

本実験では、圧密排水条件のもと、三軸圧縮試験を行った。拘束圧は294kPaとし、1kN/minの載荷速度で軸圧を増大させた。実験時の供試体を図4.3に示す。最終破壊は、経過時間が3965s、最大主応力差25.7MPaとなった時に生じた。せん断破壊直後の供試体を図4.4に示す。評価対象はセンサ1、2、5、6で囲まれた範囲とした。その断面を図4.2に示すように16分割し、セル設定とした。

### 4.2.3 既往の研究の実験結果と課題

試験終了までに 907 個の AE イベントが検査対象断面周辺において得られた。

図 4.5 は、時間と累積 AE イベント数、時間と横ひずみの関係をそれぞれ示している。ここで、供試体がせん断破壊されるまでの累積 AE イベント数の増加にしたがい、破壊の進展を図のように A、B、C の 3 つの段階に分類した。A は初期のマイクロクラックの発生段階、B は安定的なマイクロクラック成長を示す段階、そして C は、急速にマクロ破壊が進行し、最終破壊に至る段階である。

以下では、上記の各段階における内部の速度構造の変化を AE 速度トモグラフィで検討するために、図 4.5 に示すように step 0-3 を設けた。ここで、AE 速度トモグラフィは、多数の二次 AE 源を用いて内部の速度分布を推定する手法であるが、本実験では軸圧が刻々と変化し、内部損傷が進展する一次 AE 源を用いることに注意されたい。詳細には、内部損傷の異なる時刻で計測された AE 源を同時に解析すると、異なる時刻の AE 源は異なる内部損傷を反映したものであるため、解析結果は真の解析ステップ時の損傷を反映するものではない、ということである。そこで、各段階の損傷領域を精度よく示すためには、内部構造の変化が急激に起こらないような時間での位置標定点を複数用いることが重要である。つまり、対象時間あるいは破壊区分最終直近の AE 源を用いることが本解析では特に重要といえる。そこで、step0-1 においては直近の 10 個の AE イベントを、step1-2 においては 20 個の AE イベントを利用した。

図 4.6 に二次元 AE トモグラフィ結果を示す。赤い円が AE トモグラフィに用いた AE 源である。また、灰色の点はその step までに得られた累積 AE 源である。同図より、step0 の損傷の初期段階においては大部分の領域で低速度域による損傷箇所は見られなかった。step1 においても、step 0 の結果と比較しても大部分の領域で損傷の進展は見られなかった。また、step2 において、step1 の結果と比較すると、全体的な速度低下が若干認められた。また、横ひずみに着目すると、step0 から step1 では顕著な変化が生じなかったが、step1 から step2 において安定増加が認められた。さらに step3 の解析結果から大部分の領域で低速度域、つまり、損傷が進展していることが推定され、また、横ひずみに関しても step2 から step3 においては急激な増加が示された。つまり、横ひずみの増加が示す大規模な破壊と調和的な結果が AE 速度トモグラフィの結果から得られた。また、実際の累積損傷は既存の AE 源が反映していると考えられるので、灰色の点とトモグラフィ

結果を比較する。step0-2においては、累積 AE 源と低速度域との調和的な関係は確認が難しいが、累積 AE 源が増えるにつれ速度低下を確認することができる。step3においては、累積 AE 源と低速度域とが一致しており、このトモグラフィ結果は実際の損傷を表わしているといえることができる。以上より、AE 速度トモグラフィによって、試験体内部の破壊の進展が概ね可視化できたものと思われる。

### 4.3 解析結果と考察

以上のように、既往の研究では、センサ 1、2、5、6 で囲まれた断面のみで解析を行った。そこで、本研究では、既往の研究に加え、センサ 3、4、7、8 で囲まれた平面について、同様の解析を行い、破壊の進展が確認できるかどうか確認する。ここで、センサ 1、2、5、6 で囲まれた断面を A 面、センサ 3、4、7、8 で囲まれた平面を B 面と定義する。

#### 4.3.1 2次元AE速度トモグラフィによる解析結果

B 面の解析でのセル設定は図 4.7 のように設定した。ここで、AE 速度トモグラフィを用いて解析を行うにあたって、速度が収束するまでに必要な繰り返し計算回数を検討した。その結果、0-15 の 16 分割した各セルの速度構造が収束する様子を図 4.8 に示す。図 4.8 より、繰り返し計算は 10 回以上、つまりここで実施した最大繰り返し回数である 50 回で十分であり、A 面の AE 速度トモグラフィでの繰り返し回数が 50 回であったことから B 面でも A 面と同様に、繰り返し回数 50 回を採用した。また、載荷前の弾性波の平均伝播速度は 2700 m/s であったため、速度構造の上限値を 2700 m/s とした。A 面同様、対象時間あるいは破壊区分最終直近の AE 源を用いることが解析精度向上に大きく寄与することとなるので、step0-1 においては直近の 10 個の AE イベントを、step2-3 においては 20 個の AE イベントを利用した。

2次元 AE 速度トモグラフィでは、解析を行う際に標定点を解析断面上に投影するため、解析断面から遠くにある AE 源を用いて解析を実施すると精度が低下する可能性がある。そこで、今回は、AE 源を図 4.9 のように解析面近傍のみに選定し、解析を行った。具体的には、解析断面からの距離が 0.5 cm 以内である AE 源に絞って解析を行った。以下、その結果を記述する。

図 4.10 より、損傷の初期段階といえる step0 においては、ほぼすべての領域で

損傷を示す低速度域は見られなかった。図 4.11 においても、step0 と同様、低速度域は見られなかったが、中央付近で速度減少が若干確認することができた。また、図 4.12 においては、少し速度低下が見られ、急速な大規模破壊が進行し始めるであろう step2 の状態を表す結果となったといえる。さらに、図 4.13 では、他の step に比べて広い範囲で低速度領域が確認された。これは、大規模破壊の形成を表わしており、他のパラメータ挙動より判断される結果と一致した。破壊時の供試体の写真と B 面の解析結果の比較を図 4.14 に示す。図 4.14 より、センサ 4 からセンサ 8 にかけて損傷が確認され、AE 速度トモグラフィ解析結果より、同解析でも同様にセンサ 4 からセンサ 8 の部分にかけて低速度域が見られた。したがって、AE トモグラフィは実際の破壊領域を弾性波の低速度領域で表現できていると考えることができる。また、既往の研究よりセンサ 2 からセンサ 5 の方向に向かい、せん断面が確認できる。このせん断面は B 面においては、中央付近に表れてくるはずであり、既存の損傷を表わす累積 AE 源（灰色の点）も中央付近に分布していることから、中央付近で低速度域が確認できるはずである。B 面の解析結果より、中央付近の速度低下が確認でき、予測されたせん断面も概ね再現できたものと考えられる。

### 4.3.2 3次元AE速度トモグラフィによる解析結果

セル設定は図 4.15 のように 96 個設定した。ここで、2次元 AE トモグラフィ同様に速度が収束するまでの繰り返し計算回数を考える。今回はセルが 96 個と多く、収束の様子をグラフにすると繁雑になるので、収束率を以下のように定義し、各セルの速度収束の様子を確認した。

$$\text{収束率} = \frac{|V(n) - V(n-1)|}{V(n-1)} \times 100 \quad (\%)$$

V(n): 繰り返し回数 n 回目の弾性波速度

これより、収束率が小さくなればなるほど、速度変化が起こらなくなっていると考えることができる。図 4.16 より多くのセルで 10 回の繰り返し計算回数で収束していることが分かった。このため、今回の解析では、繰り返し計算回数 10 回で解析を行う。また速度構造の上限値も 2次元 AE 速度トモグラフィと同じ 2700 m/s とした。以下、解析結果とその考察を述べる。

図 4.17 より、step0 においては速度低下が全く起こらず、損傷の進展が起こっていないと考えることができる。図 4.18 の step1 においては中央付近で速度低下が確認することができた。図 4.19 の step2 においては、全体的な速度低下というより、一部（図中中央右側）に集中した速度低下が見られた。これらは大規模な損傷が生じたことで応力再分配がなされ一旦体積変化していた範囲が回復した可能性もある。いずれにせよ、step1 に比べると、全体的な速度低下は確認できなかった。最後に、図 4.20 の step3 においては、中央右上側から下左側にかけて大きな速度低下を確認することができた。step3 は破壊の最終段階であると考えられるので、この大きな速度低下は大規模破壊帯の形成を表わしていると考えられる。またこの破壊形態を A 面と B 面と比べてみると、低速度域の分布が、A 面の低速度域の分布と一致している。

また、この結果と各ステップで得られた 3 次元 AE 源との比較を行う。図 4.21-24 に各ステップにおける累積 AE 源を示す。AE 源のプロットは振幅により色分けし、50 dB 以上は青色、60 dB 以上は緑色、70 dB 以上は黄色、80 dB 以上は赤色を用いた。振幅が大きくなるほど、破壊の規模が大きいと考えることができる。また、図 4.25-28 は AE 源（図 4.21-24）と AE トモグラフィ結果（図 4.17-20）を重ねたものである。図 4.26 より step1 においては、試験体中心部分に多く AE 源が分布しており、AE トモグラフィ解析結果と一致する。図 4.27 より step2 においては、AE 源は広範囲にわたっているが、AE トモグラフィ解析では、それを確認することができなかった。しかし、破壊規模の大きな AE 源が発生しており、AE トモグラフィ解析結果でも大きく速度低下が起こり始めていることから、この状態の供試体の様子を表したものといえる。最後に、図 4.28 の step3 においては、右上から左下にかけて、振幅の大きな AE 源が見え、AE トモグラフィ解析結果にも同じように右上から左下にかけて、低速度域が見られており、両者は一致する。よって、本 AE トモグラフィより得られた低速度領域は累積 AE 源を利用して推定される実破壊領域に概ね合致し、本 3 次元 AE トモグラフィ手法の有用性が確認できたものと考えられる。

#### 4.4 まとめと今後の課題

本研究により、3 次元 AE 速度トモグラフィにおいても岩石供試体の逐次進行する内部損傷の進展が評価できたと考えられる。ここで、損傷の進行に沿ってす

すべての AE を計測する必要はなく、ある段階において直近の複数の AE イベントを用いて AE 速度トモグラフィ解析を行うことで損傷の進展は十分評価可能であった。また、横ひずみの増加により内部に大規模破壊が生じ、これらは 3 次元 AE 速度トモグラフィ結果より確認することができた。さらに、3 次元 AE トモグラフィにおいて破壊領域の形状を表わすことができることがわかった。以下に、研究で得られた知見を示す。

1. 各 step の 3 次元 AE 速度トモグラフィ結果と累積 AE 源分布を比較すると、累積 AE 源の増加にともない、AE 速度トモグラフィ結果における内部の速度構造の低下がみられた。つまり、累積 AE 源の増加と AE 速度トモグラフィ結果における損傷の進展には調和的な関係がある。
2. 3 次元 AE トモグラフィ step3 の結果より、中央右上から左下にかけて低速度域を確認することができ、これらはせん断面（帯）形状を示唆していると考えられた。この低速度域を、2 次元 AE 速度トモグラフィの解析結果や、破壊時の写真、累積 AE 源の分布を考慮した結果、破壊にともなうせん断面（帯）を概ね表現していることが明らかとなった。

本研究では軸差応力の増加にともなう内部損傷を AE 速度トモグラフィで評価できた。ここで、今後の課題を以下に示す。

1. 本研究においては、直径 100 mm、高さ 200 mm の小規模な岩盤供試体への 3 次元 AE 速度トモグラフィの適用性が確認できた。今後は、大規模な岩石供試体や原位置斜面など実構造物に同プログラムが適用可能か検討を行う必要がある。
2. 本研究では速度を損傷評価のパラメータに用いたが、エネルギーより得られる減衰に着目すれば既往の文献より、より小規模の破壊（損傷）が評価可能であって、これらは脆性材料である岩石材料からなる斜面などの早期変状を捉える場合に有効となる。
3. 3 次元 AE 速度トモグラフィ解析は、2 次元 AE 速度トモグラフィ解析に比べて、解析時間に時間を要する。解析を行う際には、速度収束を観察しながら、適切な繰り返し計算回数を採用する必要がある。

## 第5章 擬似損傷を導入したモルタル試験体の損傷可視化に関する実験

### 5.1 目的

4章では、逐次進行する AE 源を用いて AE トモグラフィの有用性を検討した。そこで、本章では、擬似損傷を導入したモルタル試験体を用意し、3次元 AE 速度トモグラフィ法によって内部損傷の可視化を検討する。具体的には、試験体に圧縮荷重を加え得られた AE 源を用いて、AE トモグラフィ解析し、内部の擬似損傷を確認する。また、同時に能動的に弾性波を励起させる従来の弾性波トモグラフィを実施し、その結果と AE を用いた 3次元 AE 速度トモグラフィ結果を比較し、3次元 AE 速度トモグラフィ法の有用性を検討する。

室内実験において 3次元 AE 速度トモグラフィの適用性が確認できれば、これまで 2次元 AE 速度トモグラフィでは難しかった三次元構造物の内部損傷を検知することが可能となる。今回は室内実験のみであるが、将来的に実構造物でも 3次元 AE 速度トモグラフィが可能となれば、外部変状が発現する以前の早期の内部損傷が評価可能となり、その結果が予防保全、しいては LCC の最小化に資すると考えられる。

### 5.2 実験概要

#### 5.2.1 実験概要

擬似損傷を 0、1、2 個導入した 3 パターンの試験体を用意した。試験体は早強ポルトランドセメントと豊浦砂を用いたモルタルで作成し、水セメント比は 0.35:0.50 とした。試験体の大きさは、直径 100 mm、高さ 200 mm とした。また、再現性を高めるために同じパターンの試験体を 3 つずつ用意し、合計 9 つの試験体で実験を行った。擬似損傷には、発砲スチロール球（直径 40 mm）を使用し、試験体を打設する際にタコ糸で固定し、**図 5.1-2** のような位置に導入した。センサ設置の際には、試験体側面が曲面であることから、センサ設置箇所となるモルタル試験体表面をサンドペーパーにより平滑に処理した後、高真空接着剤エレクトロンワックス S(1082040、フルウチ化学株式会社)を使用し固定した。センサは **図 5.3** における黄色い点の位置に配置にした。センサには、60 kHz 共振型 AE センサ(AE603SWA40、富士セラミックス社製)を使用した。ここで、60kHz 共振型のセンサを用いる場合、AE 波形の観測可能距離は 1-2 m 程度であることが知られて

おり、この対象領域内で発生する AE 波はセンサまで十分到達可能であると考えられる。

実験を行う前に試験体の弾性波速度の測定を行った。図 5.4 のように試験体の両面にセンサを配置し、ペンシルの芯を圧折することで弾性波を励起し、受信した弾性波の時間差を利用して、弾性波速度を算出した。同じパターンの試験体につき 9 回測定を行った。測定結果は、図 5.5 に示す通りである。これより、擬似損傷を導入していない試験体の平均速度は 4010 m/s であり、これが健全時の弾性波速度と考えることができる。よって、以下の解析では、4000m/s を速度の上限値として解析を行うことにする。また、実験を行う前に、健全時のモルタル試験体の強度を測定した。その結果を図 5.6 に示す。得られた最大荷重の平均を健全時の最大荷重とした。この結果を用いて、擬似損傷を導入した試験体の実験の載荷段階を以下の 4 つの step に分け、実験を行った。

- ・ 最大荷重の 30%
- ・ 最大荷重の 60%
- ・ 最大荷重の 75%
- ・ 破壊まで

図 5.7 に実験手順を示す。はじめに、載荷前の段階で、能動的に弾性波を励起させ弾性波トモグラフィ計測を行う。次に、最大荷重の 30%まで 3 回繰り返し載荷を与え、発生する AE を測定する。その後、再度能動的に弾性波を励起する弾性波トモグラフィ計測を行う。次に、最大荷重の 60%を繰り返し加え AE 計測を実施するとともに、載荷後、再度弾性波トモグラフィ計測を行う。このように能動的な弾性波を励起させる弾性波トモグラフィ計測と AE 計測を各載荷ステップで交互に実施しながら実験を進める。

### 5.2.2 能動的に発生させた弾性波を用いた弾性波トモグラフィ

本実験では、AE 弾性波の計測機器には DiSP（フィジカルアコースティクス社製）を用い、ソフトは AEWin（フィジカルアコースティクス社製）を使用した。

試験体側面に弾性波励起を行う発信点として、図 5.8-9 のように 50 個の点をとった。その各点から、ペンシルの芯を折る方法（以下、芯圧折）と、鋼球打撃によって弾性波を励起する方法（以下、鋼球打撃）の 2 種類の方法によって、弾性波を励起した。2 種類の方法によって実験を行ったのは、波長の違いによって、

考慮できる損傷規模に違いが生じるからである。ペンシル芯圧折はエネルギーが高く、約 500 kHz までの高周波の弾性波励起が可能となり、鋼球はその直径に応じて特徴的な低周波の弾性波を励起させることができる。例えば、鋼球直径と発生する弾性波との間には式(5.1)のような関係が知られており、本実験では直径 5 mm の鋼球を用いたため、発生する周波数は、58.2kHz となる。 $f$  は弾性波の周波数、 $D$  は鋼球直径 (m) を示す。

$$f = \frac{291}{D} \quad (5.1)$$

測定は試験体載荷前と最大荷重の 30、60、75% のそれぞれの段階で行った。

### 5.2.3 荷重により生じた AE を用いた AE トモグラフィ

図 5.10 のような荷重装置(1000kN 油圧式耐圧試験機)を使用し、最大荷重の 30、60、75% と破壊までの 4 つの step において発生する AE を計測した。荷重装置を設置する際に試験体の上下にテフロンシートを挟み、荷重装置と試験体との摩擦によりノイズが発生するのを防いだ。

## 5.3 実験結果と考察

荷重試験時に発生した AE 源を図 5.11 に示す。図 5.11 より最大荷重の 30% ではほとんど AE が発生せず、最大荷重の 60% で若干の AE が見られ、最大荷重の 75% では、多数 AE を得ることができた。今回の実験では、損傷の初期段階で発生する AE を用いて内部損傷の可視化を実施するために、損傷の初期段階と考えられる最大荷重 60% の荷重過程で発生した AE を用いて解析を行った。図 5.11 より、AE は最大荷重の 60% 付近で発生しているため、この結果の妥当性を調べるために、能動的に弾性波を発生させる実験の最大荷重 60% の結果を比較する。解析の繰り返し計算回数は 10 回として解析を行った。

### 5.3.1 能動的に発生させた弾性波を用いた弾性波トモグラフィ

図 5.12 における赤丸の段階において、能動的に発生させた弾性波からトモグラフィ解析を行った。ここで、弾性波励起を芯圧折であたえ、図 5.13-14 のような結果が得た。緑色の点はこの段階までに得られた累積 AE 源である。この結果は、最大荷重 60% における試験体内部の状態を表していると考えられることができる。擬

擬似損傷 1 個の場合、試験体の中央付近で若干の速度低下が見られ、内部の擬似損傷位置や累積 AE 源と合致した。また、擬似損傷が 2 個の場合も、擬似損傷周辺や累積 AE 源付近で速度低下を確認することができた。よって、AE を使って解析を行わない従来の 3 次元トモグラフィより、擬似損傷は概ね可視化可能となる。

### 5.3.2 载荷装置により生じたAEを用いたAEトモグラフィ

最大荷重 60%の载荷過程で発生した AE 源を用いて AE トモグラフィ解析を行った。解析を行う際、既往の研究により、エネルギーの大きい位置標定点に注目することが重要であると考えられており、今回の解析では、エネルギーが 1 以下という極端に低いものを除去することにする。図 5.15-16 は、それぞれ、擬似損傷 1 個と 2 個の際に発生した全ての AE 源で、エネルギーで AE 源の選定を行い、矢印で示した AE 源だけを用いて解析を行った。擬似損傷 1 個の場合も 2 個の場合も解析に用いた AE 源の数は 5 個である。

図 5.17-5.18 に示すのが 3 次元 AE 速度トモグラフィの解析結果である。擬似損傷 1 個の場合は、中央付近で若干の速度低下が見られた。この速度低下の位置は擬似損傷のある位置から少し離れてはいるが、擬似損傷による低速度域を概ね表しているものと思われる。また、擬似損傷 2 個の場合も、完全に一致しないものの概ね損傷領域付近で大きい速度低下領域を確認することができた。

### 5.3.3 結果の比較

ここで、先ほど得られた 3 次元速度トモグラフィの結果が妥当なものであるかを能動的に弾性波を発生させる実験により得られた 3 次元トモグラフィの解析結果と比較検討する。損傷領域は、内部に導入した擬似損傷と AE 源の位置と考察を行っていく。

まず、擬似損傷が 1 個の場合を考察する。能動的に発生させた弾性波を用いた解析結果と载荷試験により発生した AE を用いた解析結果を比べてみると、AE を用いた解析の方が試験体全体において速度が低下していることが確認できる。擬似損傷が存在する領域の付近では、大きく速度が低下していることが確認でき、擬似損傷を可視することができた。また、速度低下が起きている領域に AE 源（図 5.17 の P23）が位置標定されていることから、この部分にクラックが発生し、それが AE トモグラフィ結果に反映されたものと思われる。

次に、擬似損傷が2個の場合を考察する。能動的に発生させた弾性波を用いた解析では、擬似損傷領域付近で速度低下が発生し、それ以外の領域では速度低下はあまり見られなかった。しかし、AEを用いた解析では、擬似損傷付近に大きな速度低下がみられ、その周辺も速度低下が発生した。擬似損傷があることは確認することは可能であるが、正確な位置の特定は少し難しい結果となった。これは、AEトモグラフィを用いたAE源が試験体中心付近に集中していることから、解析精度が低下し、さらに加えて中央付近で既存損傷に加えて新たな損傷（クラック）が発生し、これらを低速度領域として示した可能性が高い。また、**図 5.19**のように波線がほとんど擬似損傷を通過していないことも解析精度が低下した要因に挙げられる。

以上より、AE源を用いた解析では、全体的な速度低下に加え、擬似損傷領域で、大きな低速度領域が確認でき、さらに、AE源位置においても若干の速度低下が確認できた。これらより、モルタル試験体の内部損傷の存在をAEトモグラフィ法により確認することができた。

#### 5.4 まとめと課題

本研究により、3次元AE速度トモグラフィにおいても試験体に導入した擬似損傷を確認することができた。本研究では、損傷の初期段階で発生するAE源をエネルギーにより選定を行い、選ばれた5個のAE源を用いて解析を行ったが、そのAE源でも十分に損傷領域を特定することができた。解析に用いたAE源の数が少ないのにも関わらず、損傷位置が概ね特定できたことにより、あまりAE源が発生しない場合でも3次元AEトモグラフィ解析が行えることを示せた。以下に今後の課題を列挙する。

1. 本研究においては、直径100 mm、高さ200 mmのモルタル試験体への3次元AE速度トモグラフィの適用性が確認できた。今後は、コンクリートなどのモルタル以外の材料でも、損傷領域の推定が可能かどうか検討していく必要がある。
2. 今回用いた擬似損傷の大きさは、直径40 mmと試験体に対して非常に大きなものであった。今後は、もう少し擬似損傷の大きさを小さくしても、損傷領域を推定できるかどうか検討を行う必要がある。

## 第6章 結論と今後の展望

### 6.1 本研究で得られた知見

本研究では、3次元トモグラフィ解析の有用性を確認するため、岩石供試体の三軸試験に本解析手法を適用し、破壊の進展を弾性波の低速度領域として評価可能か検討した。さらに、擬似損傷を導入したモルタル試験体で、既知の損傷領域の特定が本手法で可視化可能か検討した。その結果は以下のようにまとめられる。

1. 各 step の 3次元 AE 速度トモグラフィ結果と累積 AE 源分布を比較すると、累積 AE 源の増加にともない、AE 速度トモグラフィ結果における内部の速度構造の低下がみられた。つまり、累積 AE 源の増加と AE 速度トモグラフィ結果における損傷の進展には調和的な関係がある。(第4章参照)
2. 3次元 AE トモグラフィ step3 の結果より、最終破壊形態で低速度域が広い範囲で確認することができ、破壊時のせん断面(帯)が示唆された。この低速度域は、2次元 AE 速度トモグラフィの解析結果や、破壊時の写真、AE 源の分布などを考慮したところ、破壊時のせん断面(帯)を表現している可能性が確認できた。(第4章参照)
3. 擬似損傷を導入したモルタル試験体において、損傷の初期段階で発生する AE 源 をエネルギーにより選定を行い、選ばれた 5 個の AE 源を用いて解析を行い、擬似損傷や AE 源を損傷領域として検討した結果、AE トモグラフィ解析により既存損傷を特定できることが確認された。(第5章参照)

### 6.2 今後の課題と展望

本研究において今後検討すべき課題を以下のようにまとめ、今後の研究に繋げるものとする。

1. 本研究においては、直径 100 mm、高さ 200 mm の小規模な岩盤供試体への 3次元 AE 速度トモグラフィの適用性が確認できた。今後は、大規模な岩石供試体や原位置斜面など実構造物に同プログラムが適用可能か検討を行う必要がある。
2. 本研究では速度を損傷評価のパラメータに用いたが、エネルギーより得ら

れる減衰に着目すれば既往の文献より、より小規模の破壊（損傷）が評価可能であって、これらは脆性材料である岩石材料からなる斜面などの早期変状を捉える場合に有効となる。

3. 3次元 AE 速度トモグラフィ解析は、解析時間に長時間を要する。解析を行う際には、速度収束を観察しながら、適切な繰り返し計算回数を設定することが肝要となる。
4. 本研究においては、直径 100 mm、高さ 200 mm のモルタル試験体への 3次元 AE 速度トモグラフィの適用性が確認できた。今後は、コンクリートなどのモルタル以外の物質でも、損傷領域の推定が可能かどうか検討していく必要がある。
5. 今回用いた擬似損傷の大きさは、直径 40 mm と試験体に対して非常に大きなものであった。今後は、擬似損傷のスケールを変化させ、励起させる周波数とともに速度構造を検討すること（通常の弾性波トモグラフィ）、また、AE トモグラフィで得られる速度構造がいずれの励起周波数結果に合致しているのか、これらを総合的に検討することが実構造物の健全性評価に対する本手法の適用には重要となる。

## 参考文献

- 1) 国土交通白書 2012：社会資本の的確な維持管理・更新，第 I 部，第 2 章，第 1 節，6，図表 150，2012.
- 2) 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.
- 3) 松井繁之：道路橋床版，設計・施工と維持管理，森北出版，pp. 216-219. 2007.
- 4) 日経コンストラクション：長寿命化時代のコンクリート補修講座，日経 BP 社，pp. 130-133，2012
- 5) 吉田秀典，高橋恵介，塚孝司：超音波法を用いたコンクリートのひび割れ深さの同定に関する研究，土木学会論文集 No.732/V-59，pp.121-133，2003.
- 6) 社団法人地盤工学会北海道支部，岩盤崩落の機構解明と計測技術に関する研究委員会：岩盤崩壊の発生機構と計測技術，社団法人地盤工学会北海道支部，pp. 143-149, pp. 170-174, 2000.
- 7) 鎌田敏郎，内田慎哉：コンクリート構造物の診断における非破壊検査の適用の現状と今後の展望，物理探査，第 60 巻第 3 号，pp.253-263，2007.
- 8) 湯山茂徳，李正旺，友清剛，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損傷評価，土木学会論文集，No. 627, Vol.44, pp. 251-259, 1999.
- 9) H.K, Chai, S. Momoki, D.G. Aggelis, Y. Kobayashi and T. Shiotani: Recent development in tomography techniques for non-destructive evaluation of concrete, Proceedings of the Second Asia-Pacific Young Researchers and Graduates Symposium (YRGS 2010), pp. 10-18, 2010.
- 10) Y. Kobayashi, T. Shiotani, D.G. Aggelis and H. Shiojiri: Three-dimensional seismic tomography for existing concrete structures, Proceedings of Second International Operational Analysis Conference, Vol. 2, pp. 595-600, 2007.
- 11) 塩谷智基，Dimitrios G. Aggelis，桃木昌平：弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の健全性評価技術，とびしま技報，No. 56, pp. 111-116, 2007.
- 12) 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，pp. 2，2005.
- 13) TC212-ACD, Recommendation of RILEM TC 212-ACD: Acoustic emission and

related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete/Test method for classification of active cracks in concrete structures by acoustic emission, *Materials and Structures*, Vol. 43, 2010.

- 14) 西畑精華, 渡辺健, 橋本親典, 大津政康: AE法による再生骨材を用いたコンクリートの破壊性状の評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.27, No.1, 2005
- 15) 宮永孝志, 畔木寛仁, 桃木昌平: 三次元弾性波トモグラフィによるコンクリート構造物の補修改良効果の検証, *電力土木*, No.345, 2010
- 16) 桃木昌平, 蔡華堅, 塩谷智基, 小林義和: 弾性波の減衰特性を用いたコンクリート内部損傷可視化技術の開発, *とびしま技報*, No. 58, pp. 27-32, 2009.
- 17) 佐々宏一, 芦田譲, 菅野強: 物理探査, 森北出版, pp. 122-123. 1993.

## 謝辞

最後になりましたが、本論文の作成にあたって、お世話になった方々に感謝の意を表します。

まず、ご多忙の中、熱心にご指導していただいた京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・大津宏康教授に心から感謝致します。ゼミを通して貴重な発表の場を提供していただくと共に、研究を進める中で、自分で気付かな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差し伸べていただきました。厚くお礼申し上げます。

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・塩谷智基准教授には、筆者が研究で行き詰った時に度重なるご指導と的確な方向性を示していただきました。先生の親身なご指導のおかげで本論文を書き上げることができました。深く感謝致します。

京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻・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。深く感謝致します。

秘書の大八木智子さんには、研究面だけでなく生活面においても大変お世話になりました。研究に励む環境を作って頂き、充実した研究生活を送ることができました。本当に感謝しております。

飛島建設株式会社・桃木昌平氏には、本研究の実験を行うにあたって、実験の進め方や計測機器の取り扱いなどを教えていただきました。また、年末のお忙しい時期に何度も質問させていただいた時にも、親切に答えて下さいました。心からお礼申し上げます。

日本大学・小林義和氏には、AE トモグラフィ解析を行うにあたって、解析プログラムの詳細や解析の改善点などを教えていただきました。また、筆者の疑問に対しても、的確に答えて下さいました。本当に感謝しております。

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、非常に有意義な研究生活を送ることができました。特に高田さんと大澤さんには、同じ系列の研究をしている先輩として、的確な助言をいただき、筆者をいつも助けて頂きました。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ました。本当にありがとうございました。

また、研究以外にもたくさんの人たちと関わることができ、多くのことを学ば

せていただきました。心より感謝しております。

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。

### 【建設年度別橋梁数】

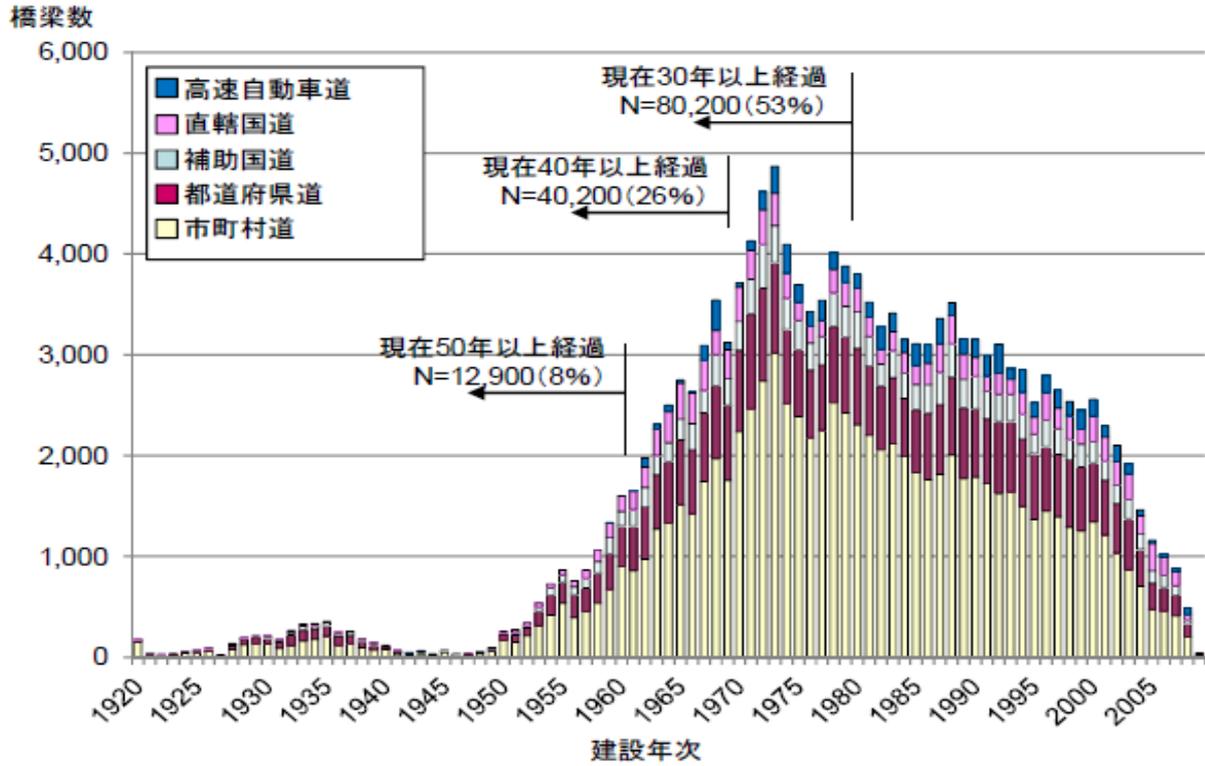


図 1.1 建設年度別橋梁数

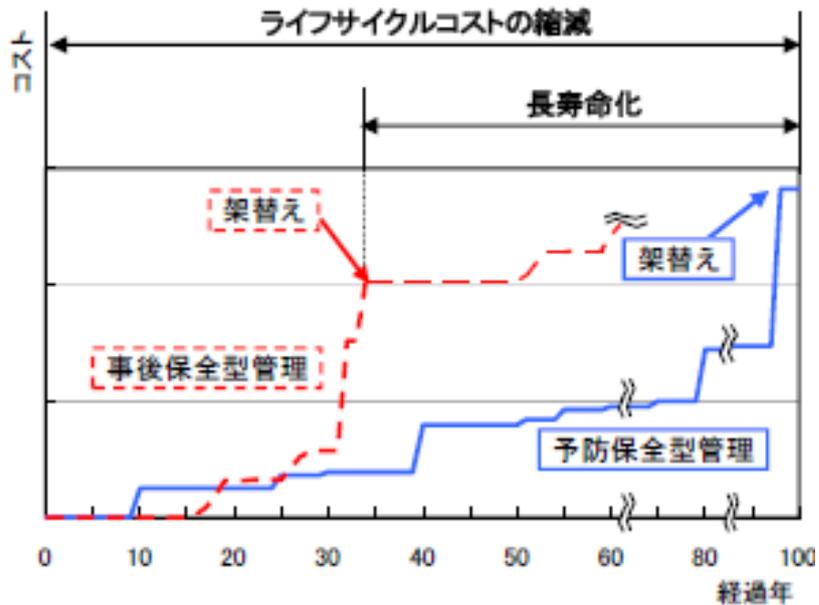


図 1.2 保全方法によるライフサイクルコストの縮減

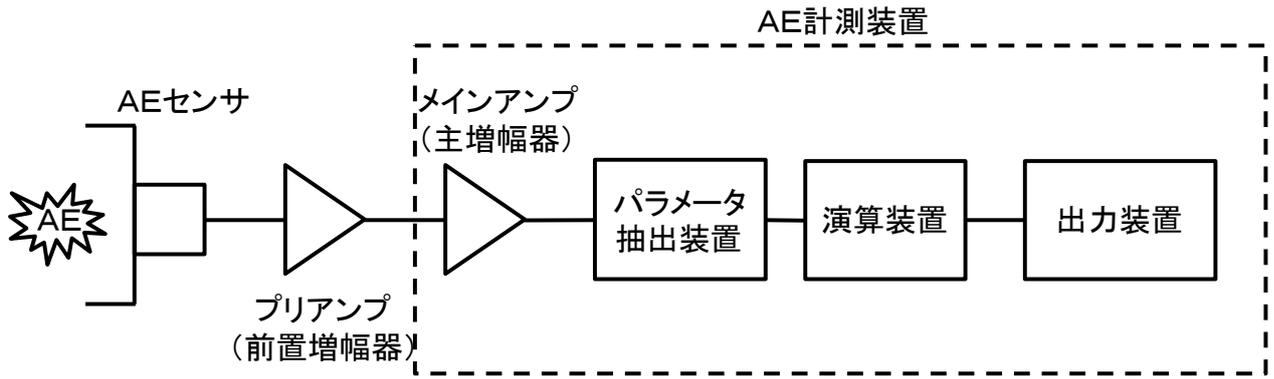


図 2.1 基本的な AE 検出装置

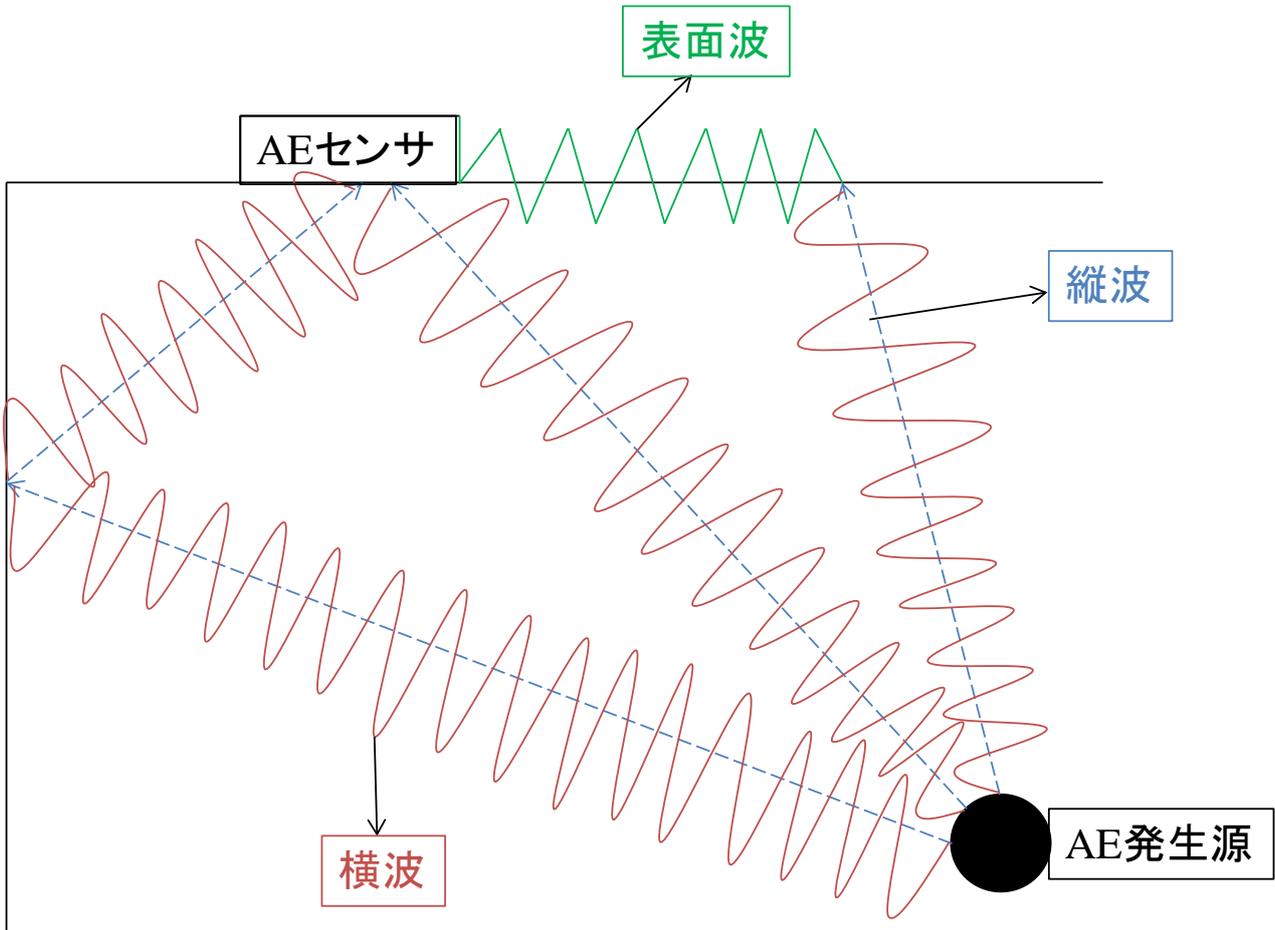


図 2.2 AE 波動の伝播過程

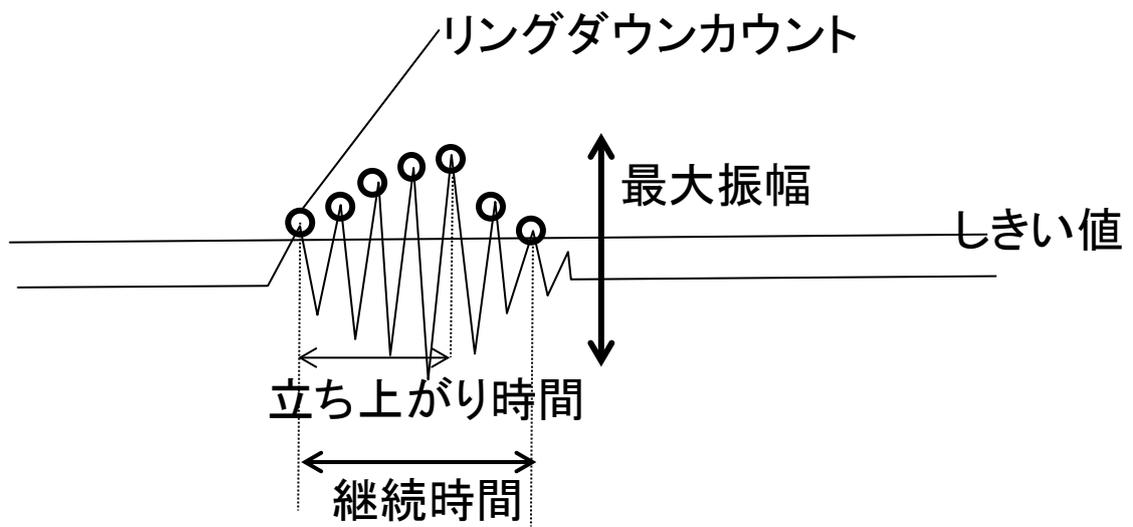


図 2.3 AE 波形

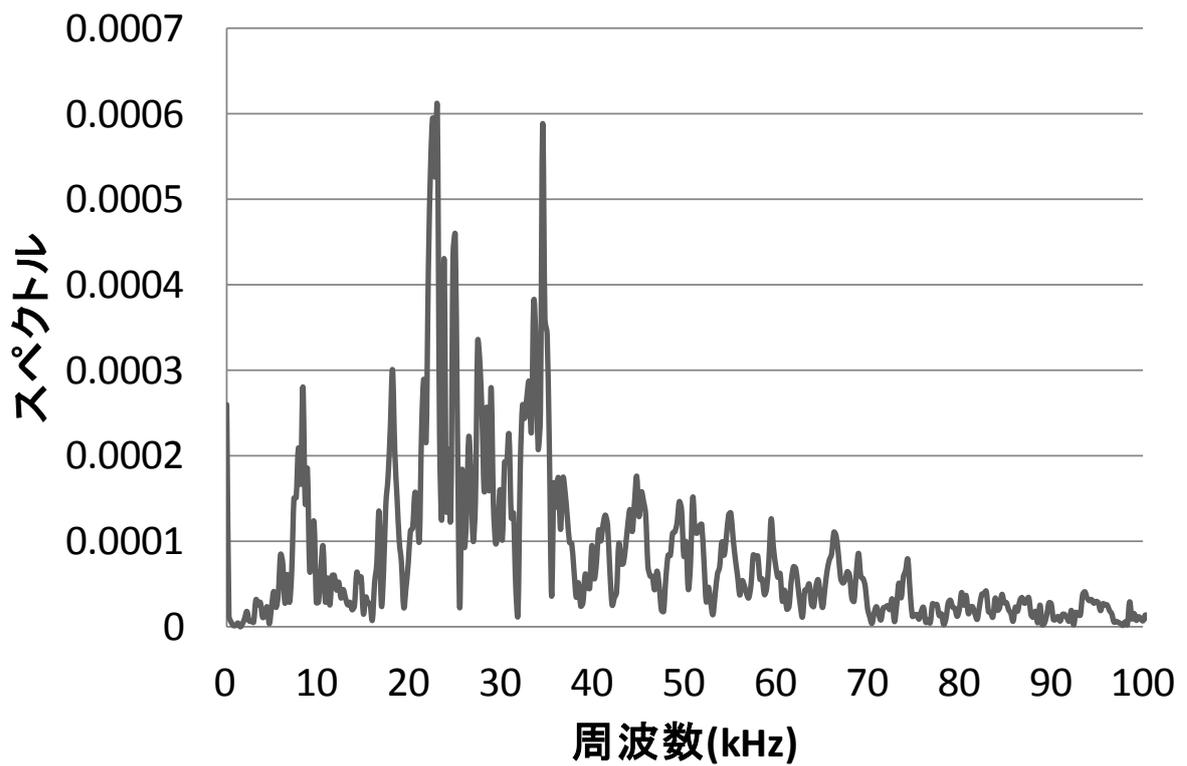


図 2.4 周波数分布

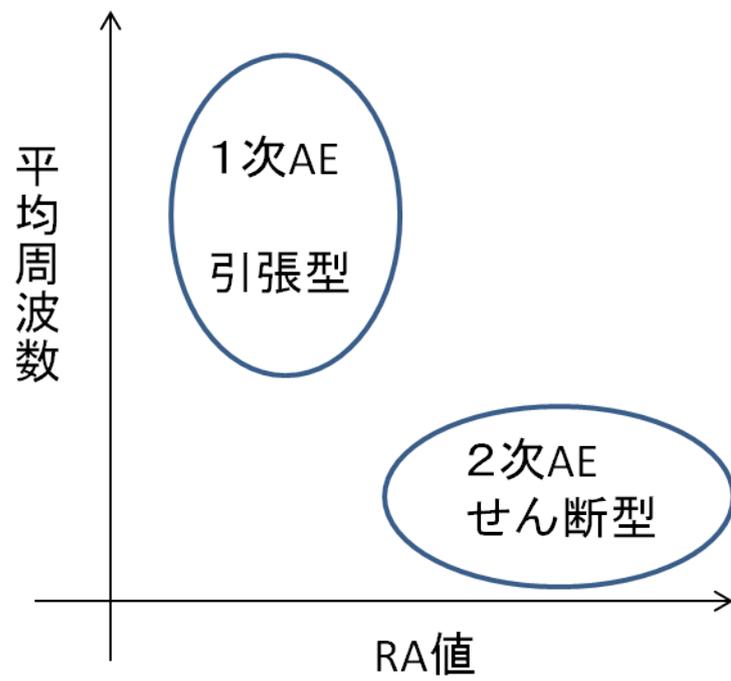


図 2.5 RA 値と平均周波数による発生原因の分類

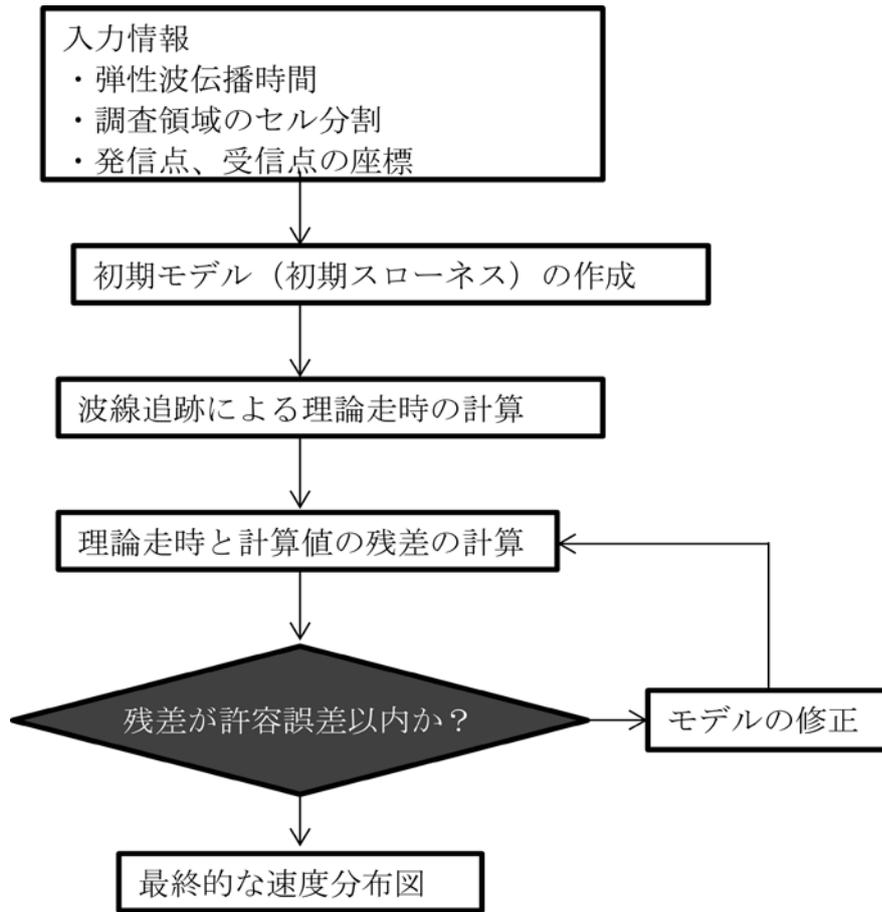


図 3.1 速度トモグラフィ解析の流れ

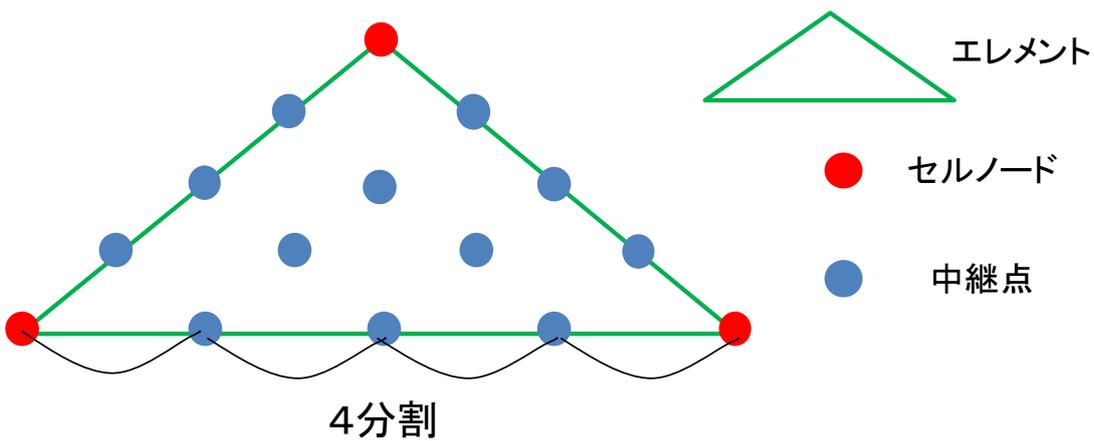


図 3.2 セルの設定と中継点

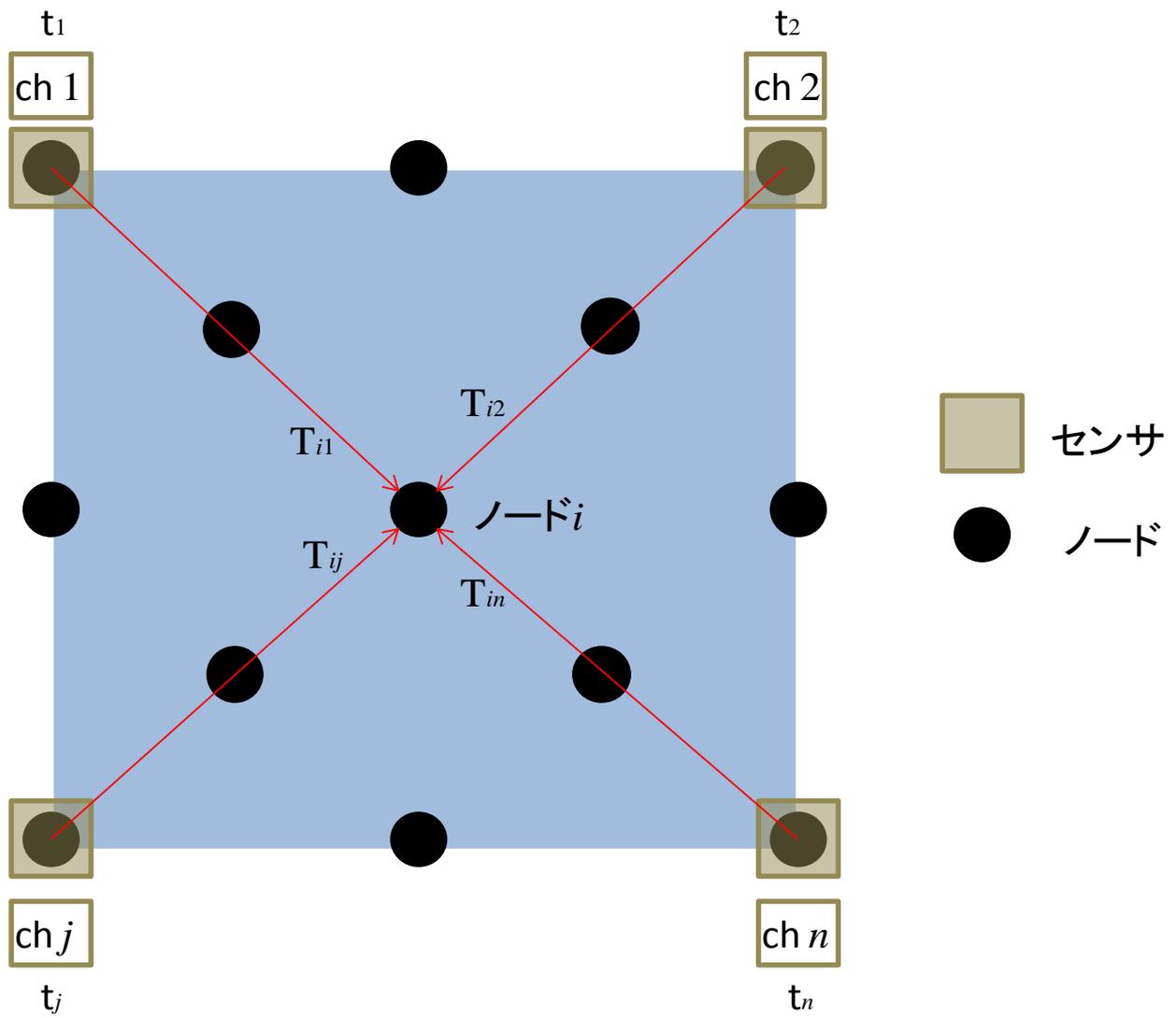


図 3.3 発信点の推定

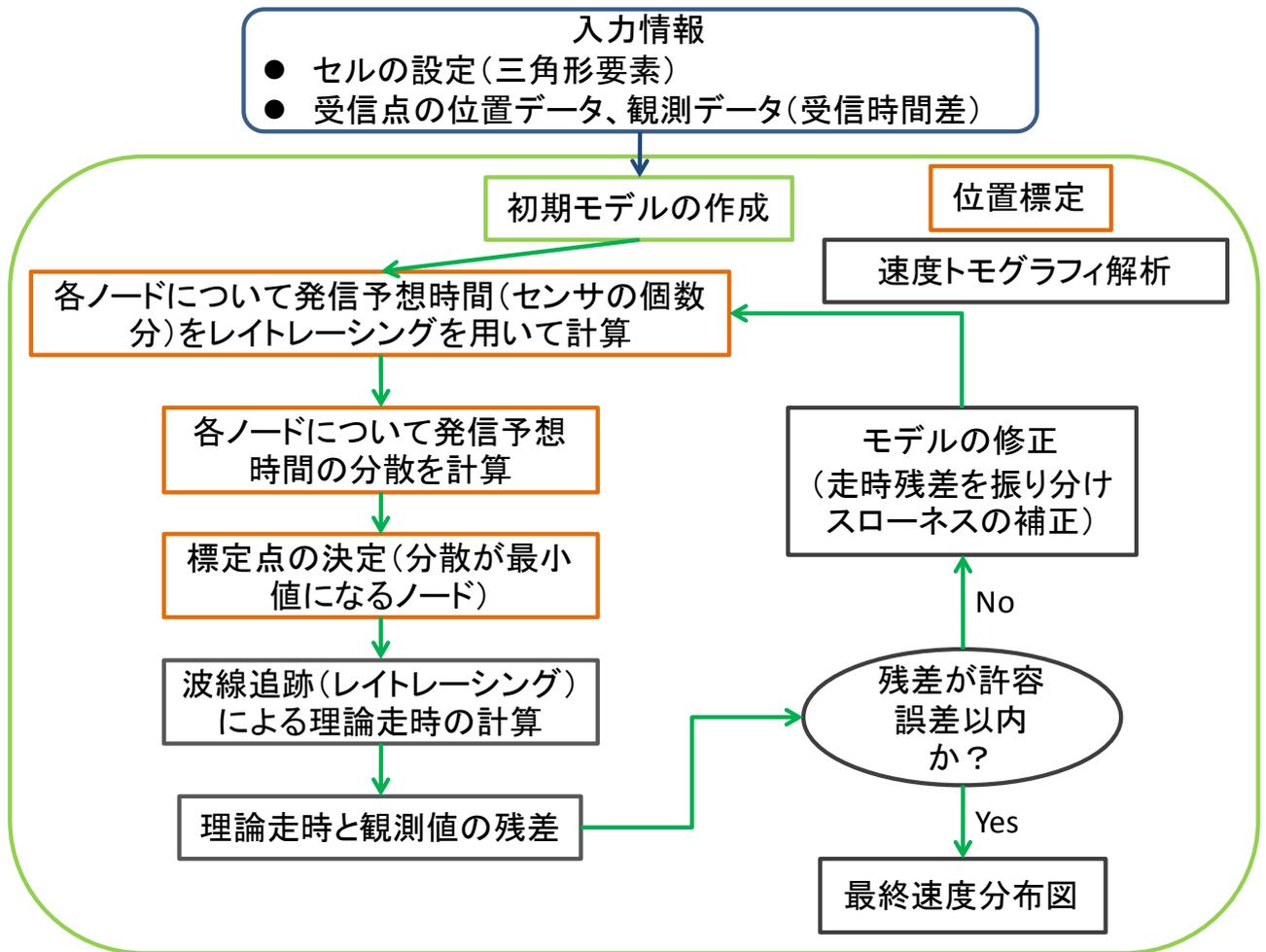


図 3.4 AE 速度トモグラフィ解析のフロー

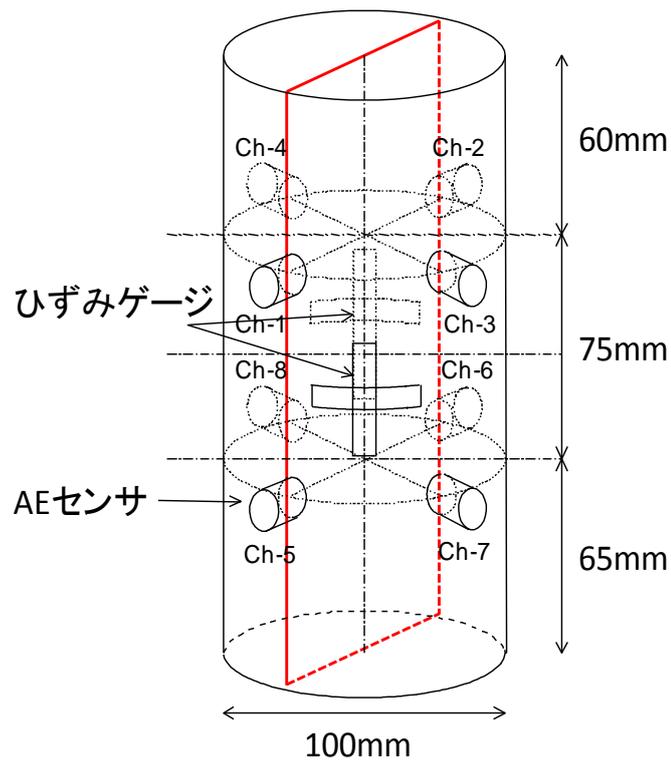


図 4.1 供試体のセンサ配置

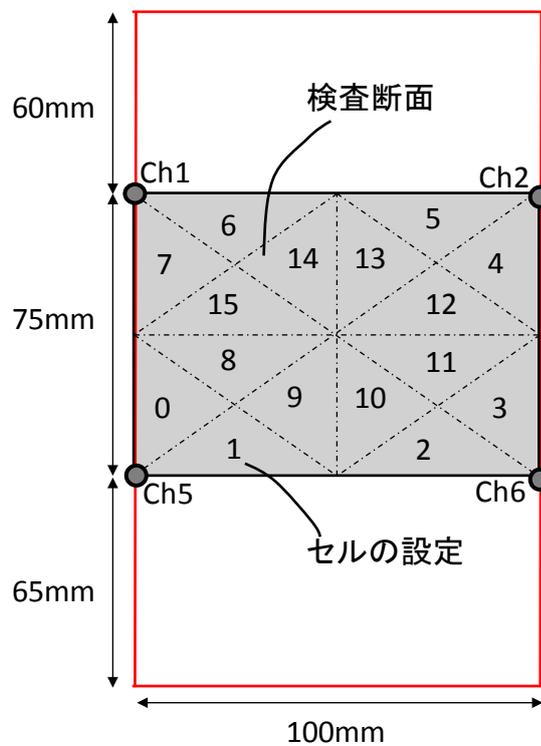


図 4.2 検査断面図

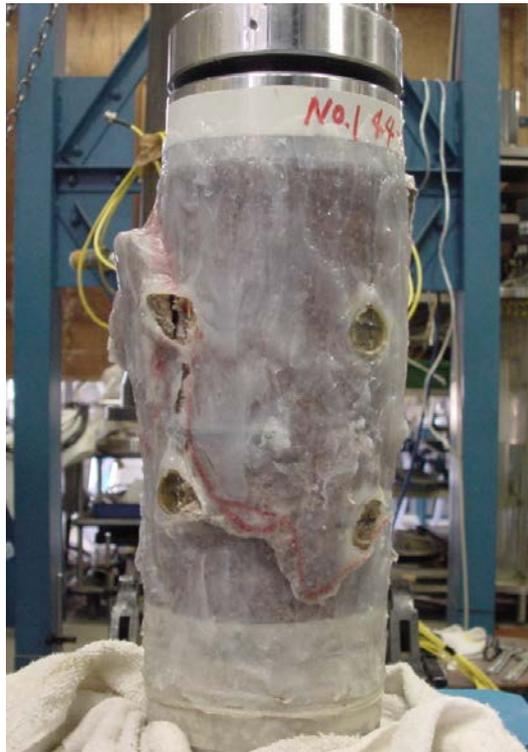


図 4.3 実験時の供試体



図 4.4 せん断破壊直後の供試体

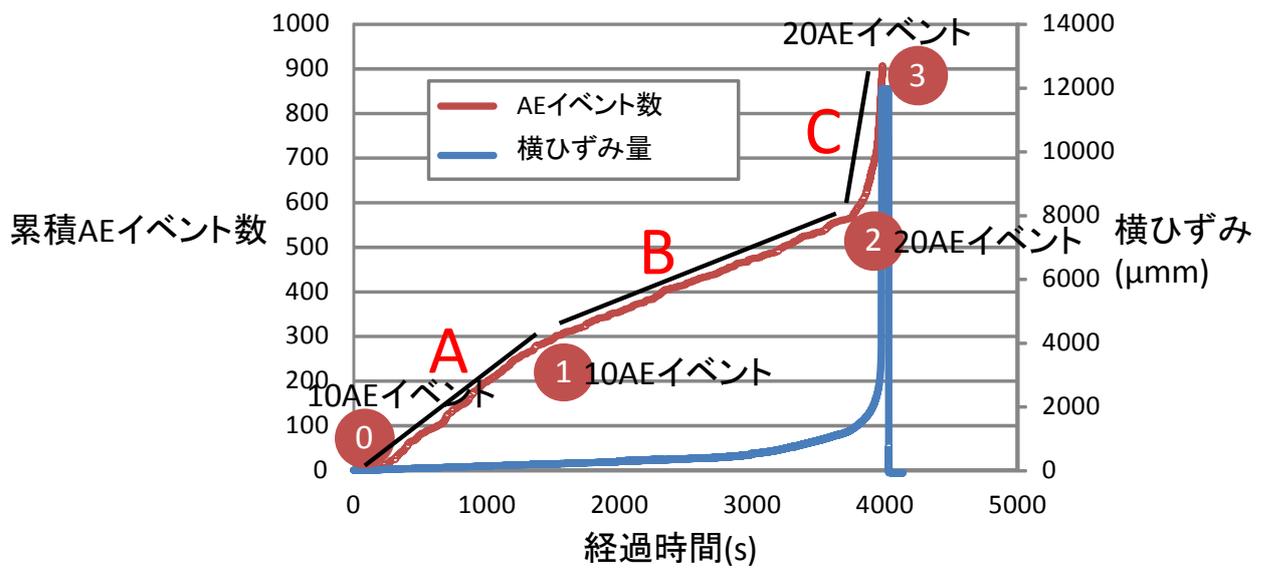


図 4.5 時間と累積 AE イベント数、横ひずみの関係

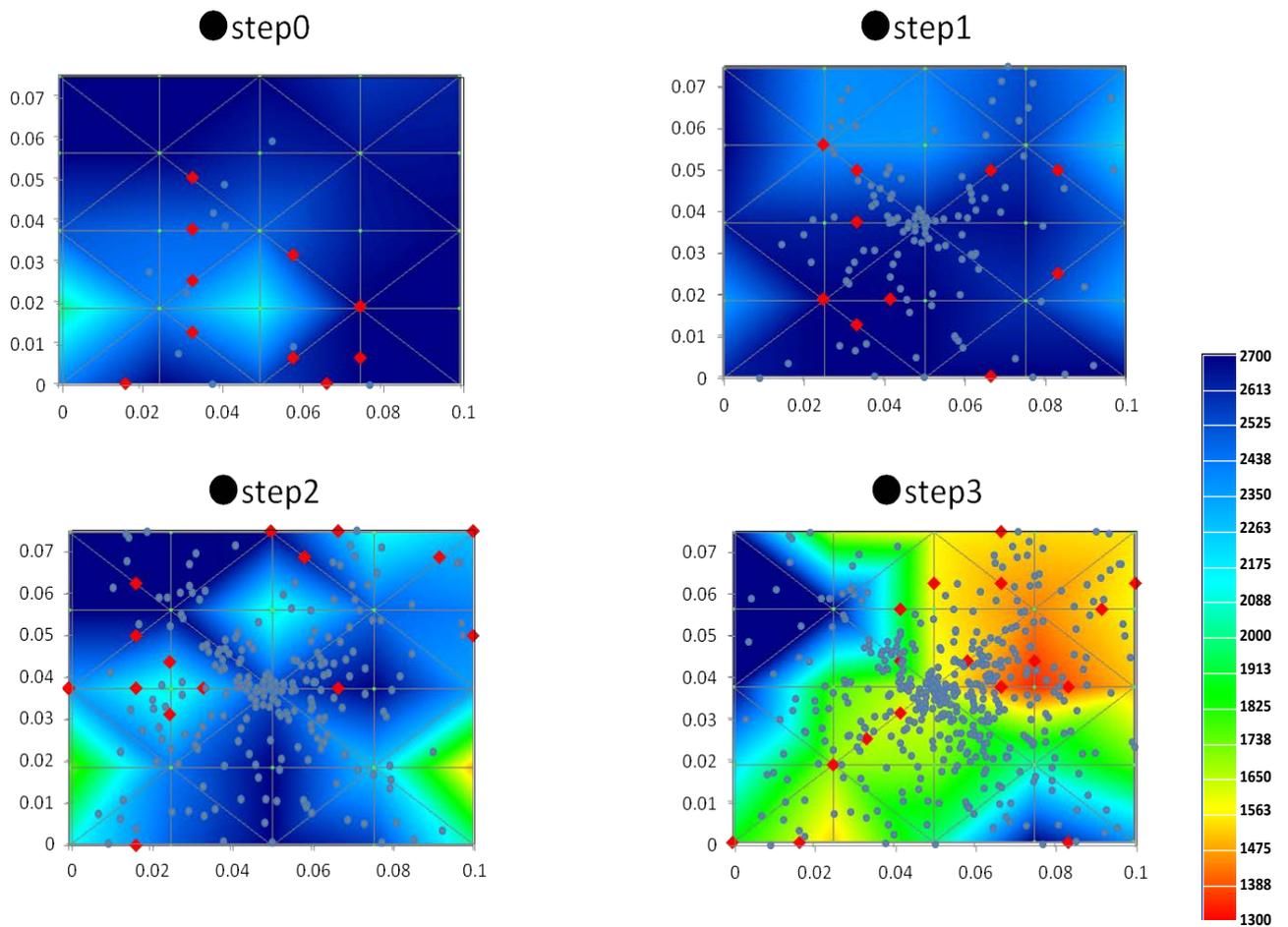


図 4.6 既往の研究の解析結果 (A 面)

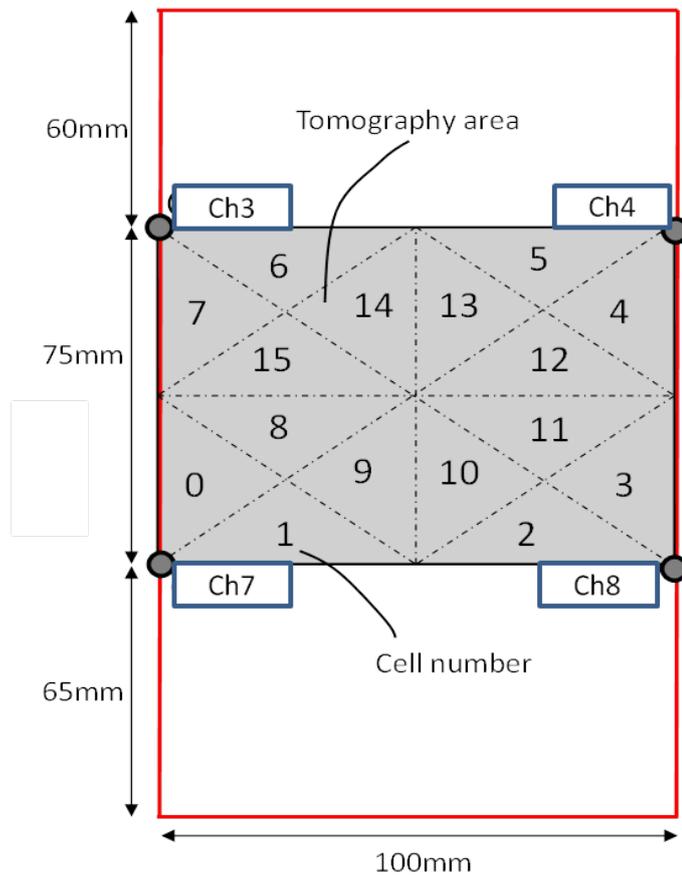


図 4.7 B 面のセル設定

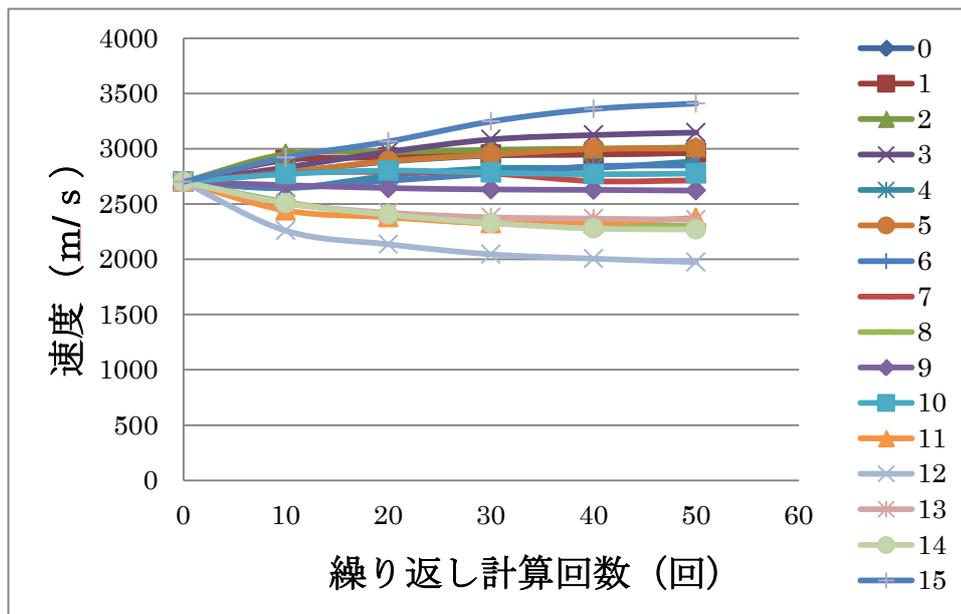


図 4.8 速度収束の様子

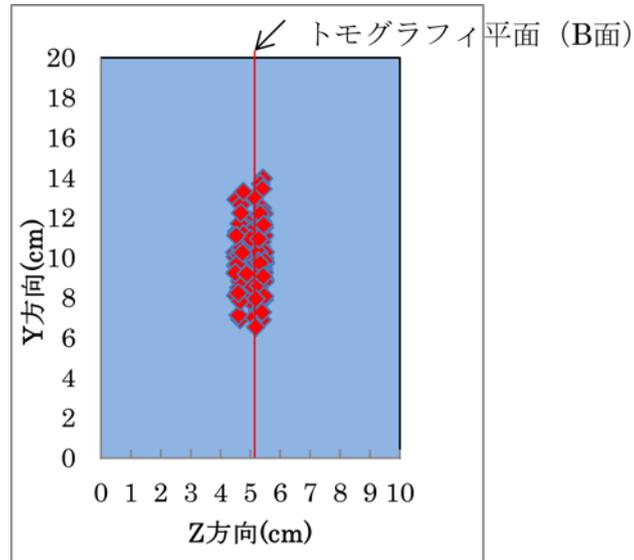


図 4.9 解析に用いる AE 源の選定 (B 面)

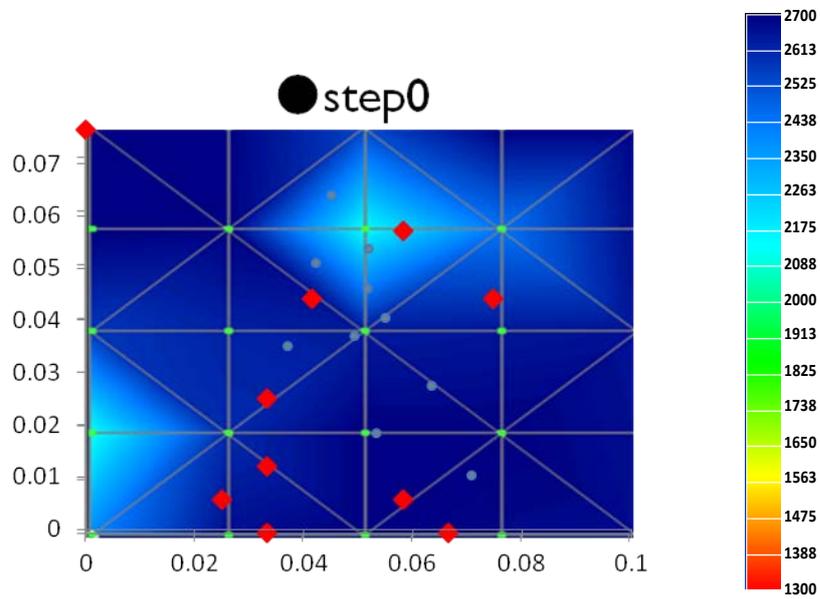


図 4.10 step0(B 面)

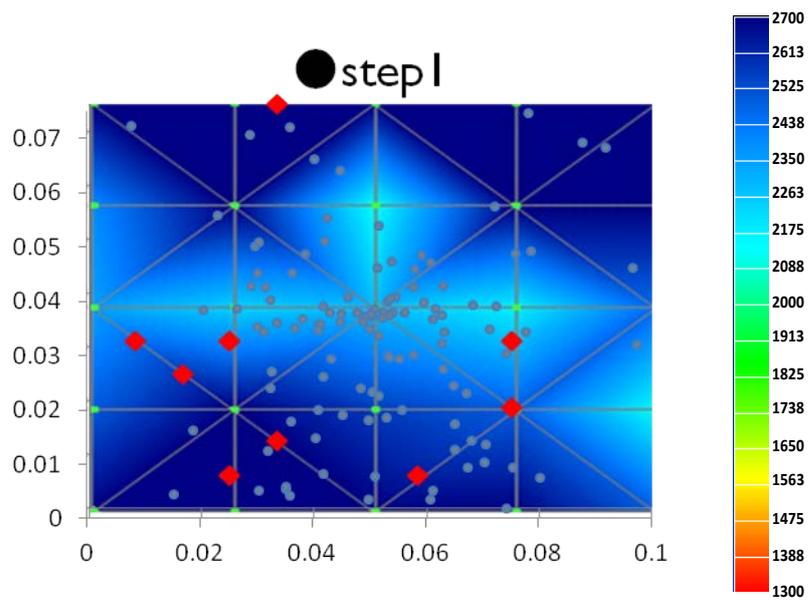


图 4.11 step1(B 面)

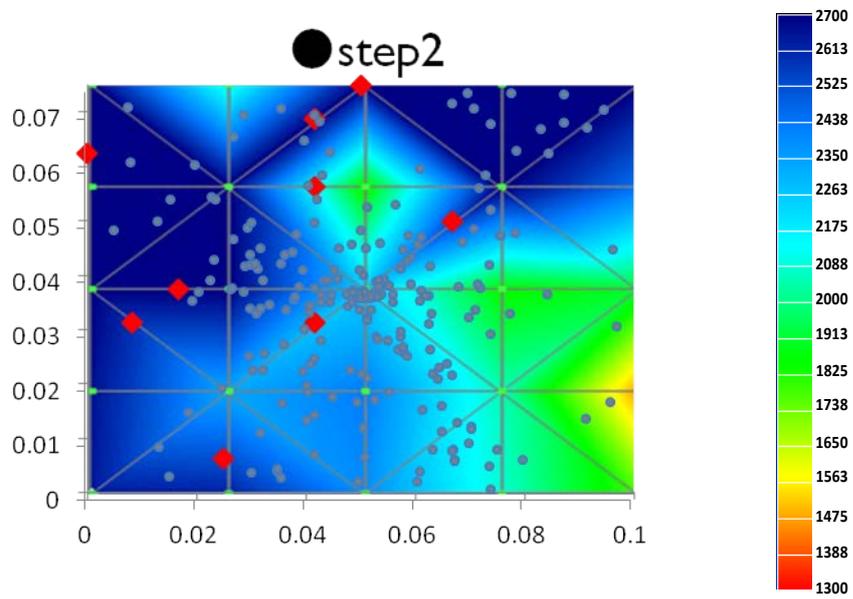


图 4.12 step2(B 面)

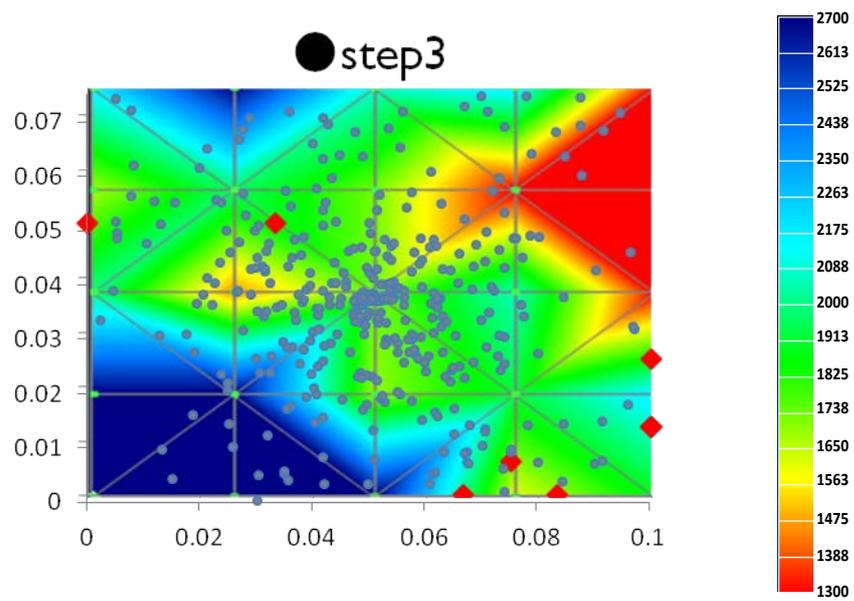


図 4.13 step3(B 面)

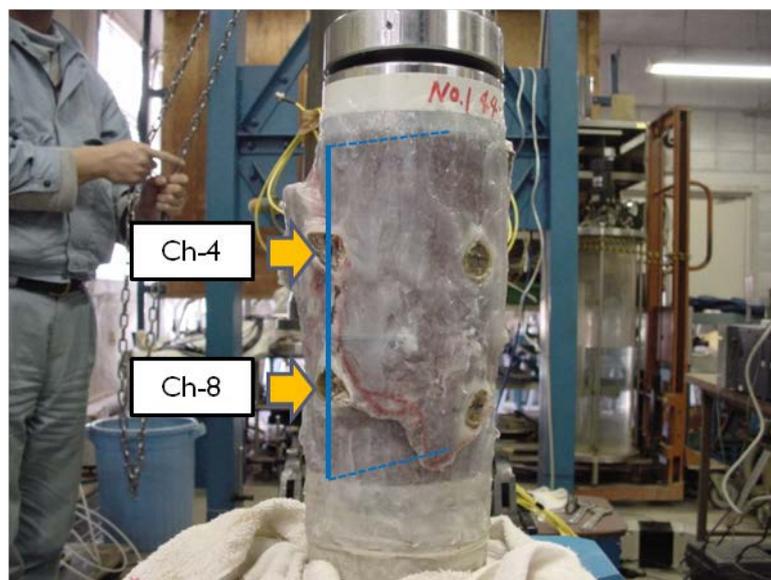


図 4.14 実際の破壊との比較

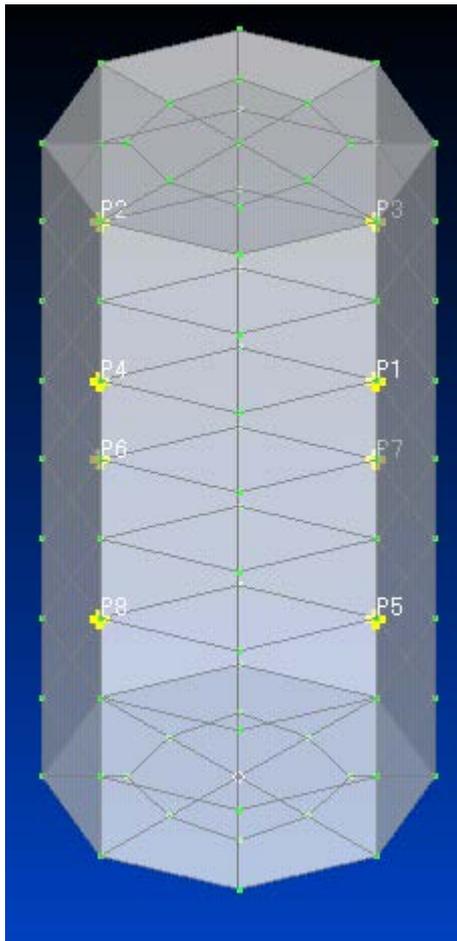
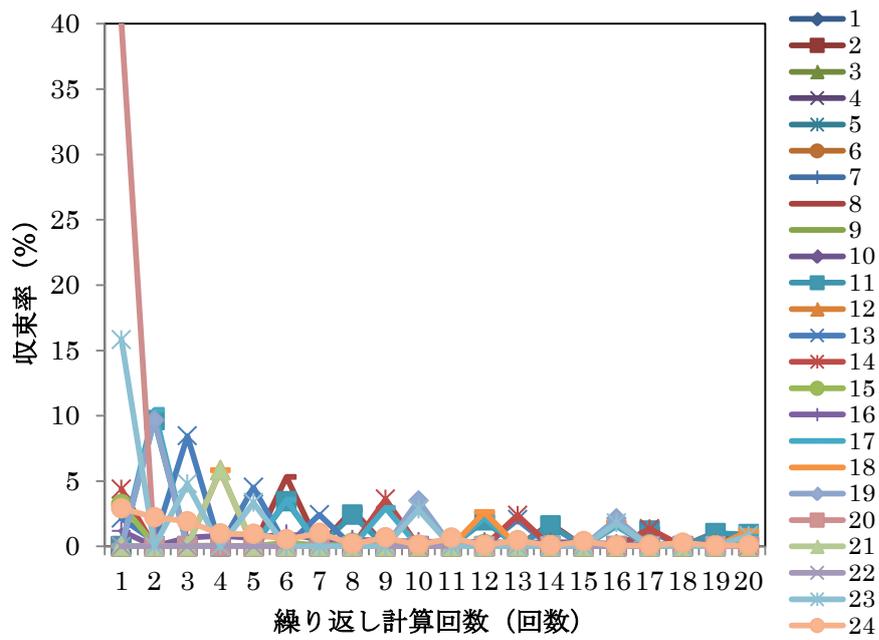


図 4.15 セル設定





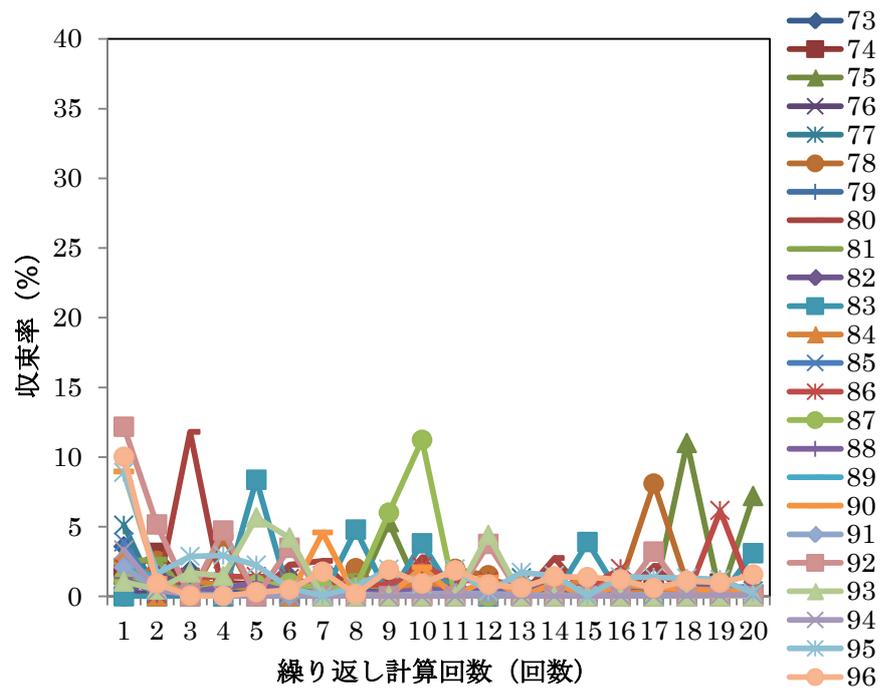


図 4.16 収束率

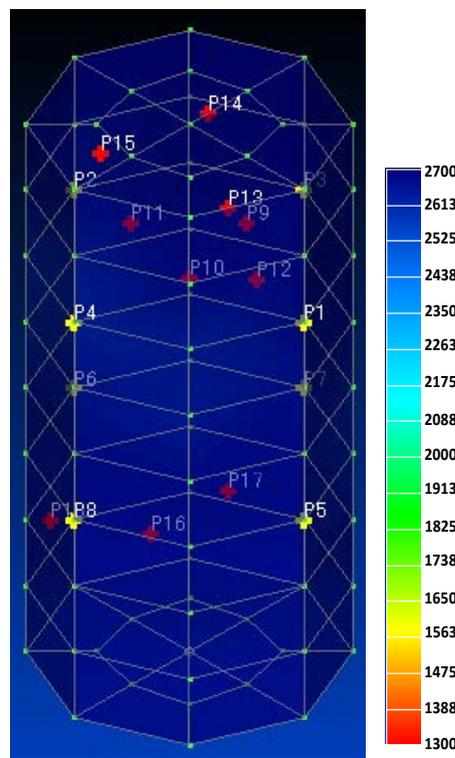


図 4.17 3次元 AE 速度トモグラフィ解析結果 (step0)

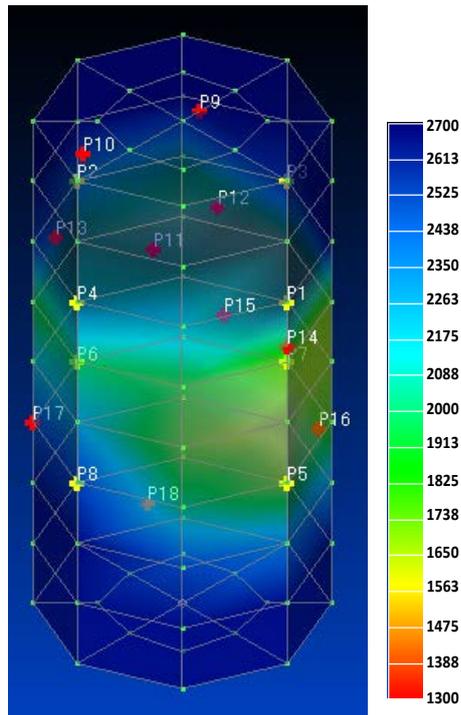


図 4.18 3次元 AE 速度トモグラフィ解析結果 (step1)

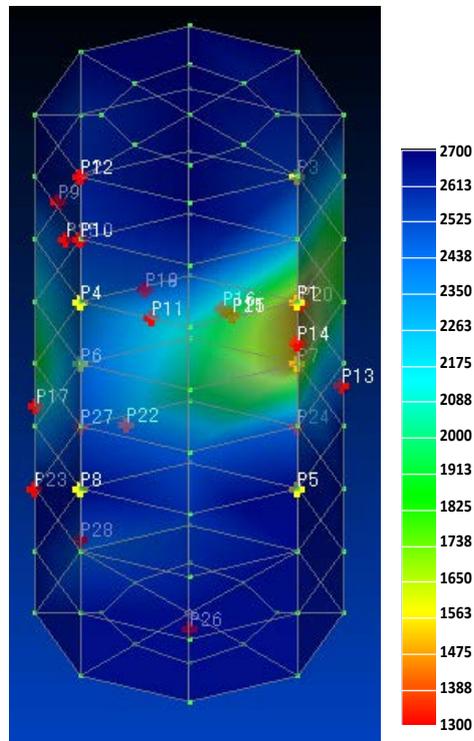


図 4.19 3次元 AE 速度トモグラフィ解析結果 (step2)

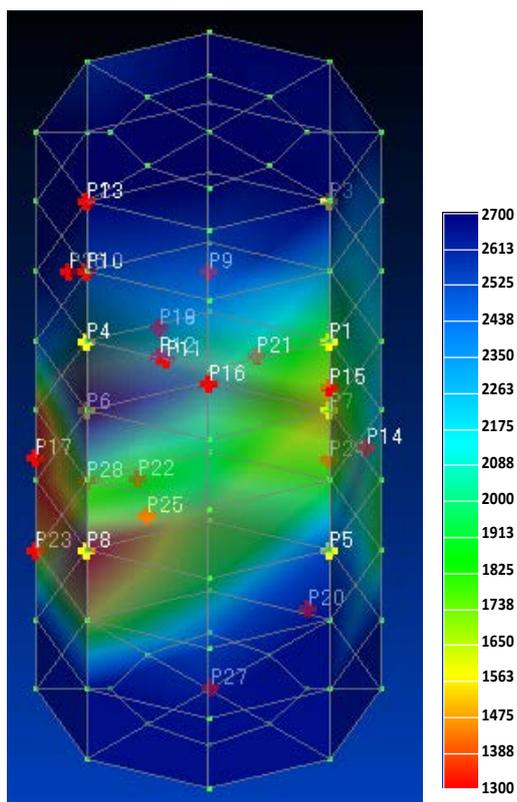


図 4.20 3次元 AE 速度トモグラフィ解析結果 (step3)

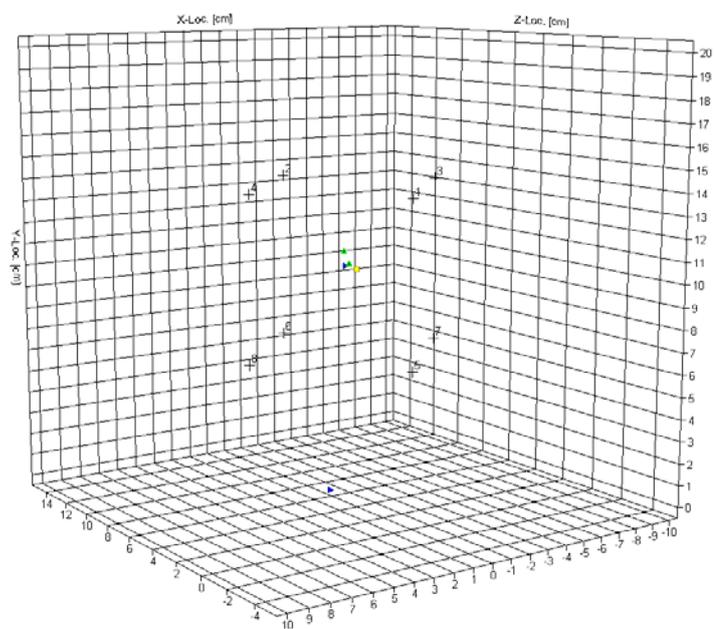


図 4.21 3次元 AE 源 (step0)

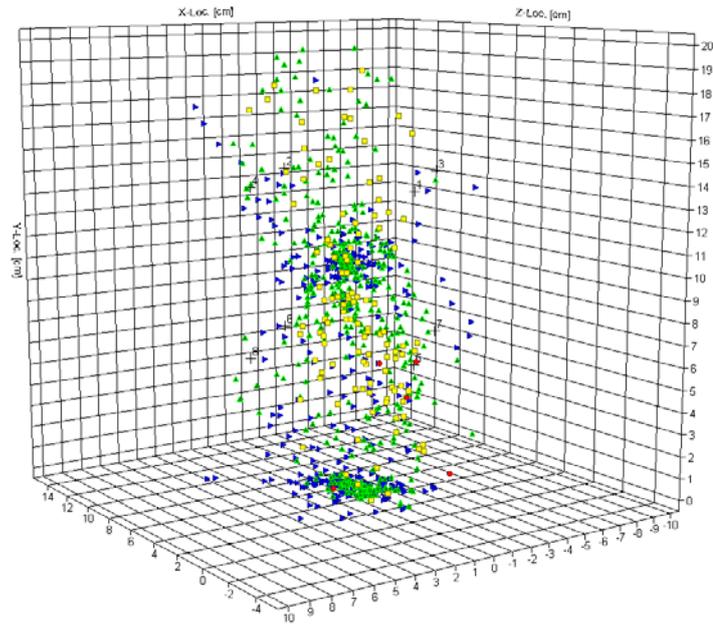


图 4.22 3 次元 AE 源 (step1)

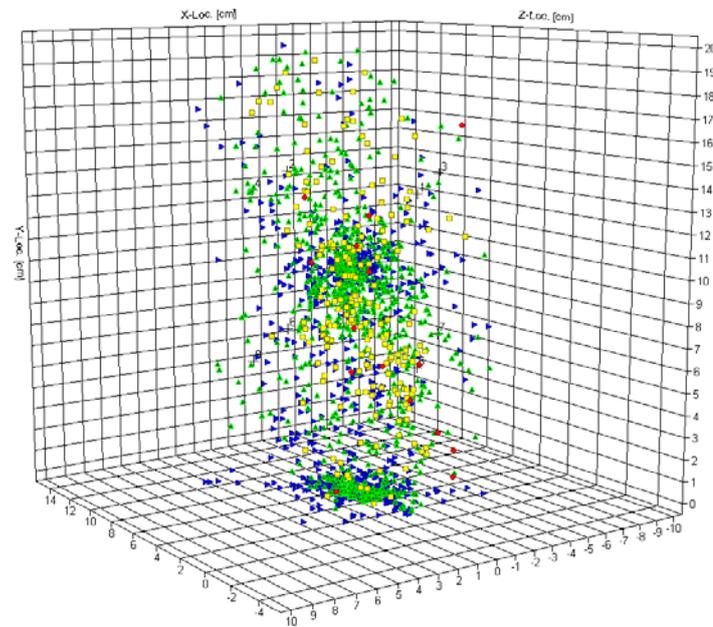


图 4.23 3 次元 AE 源 (step2)

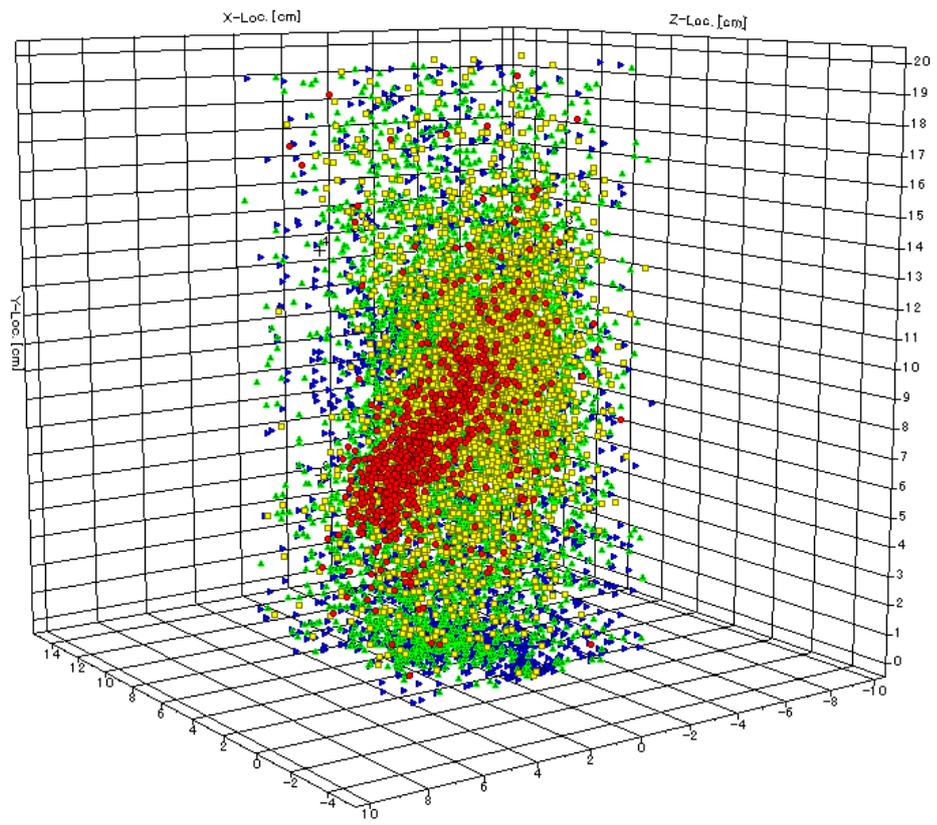


图 4.24 3次元 AE 源 (step3)

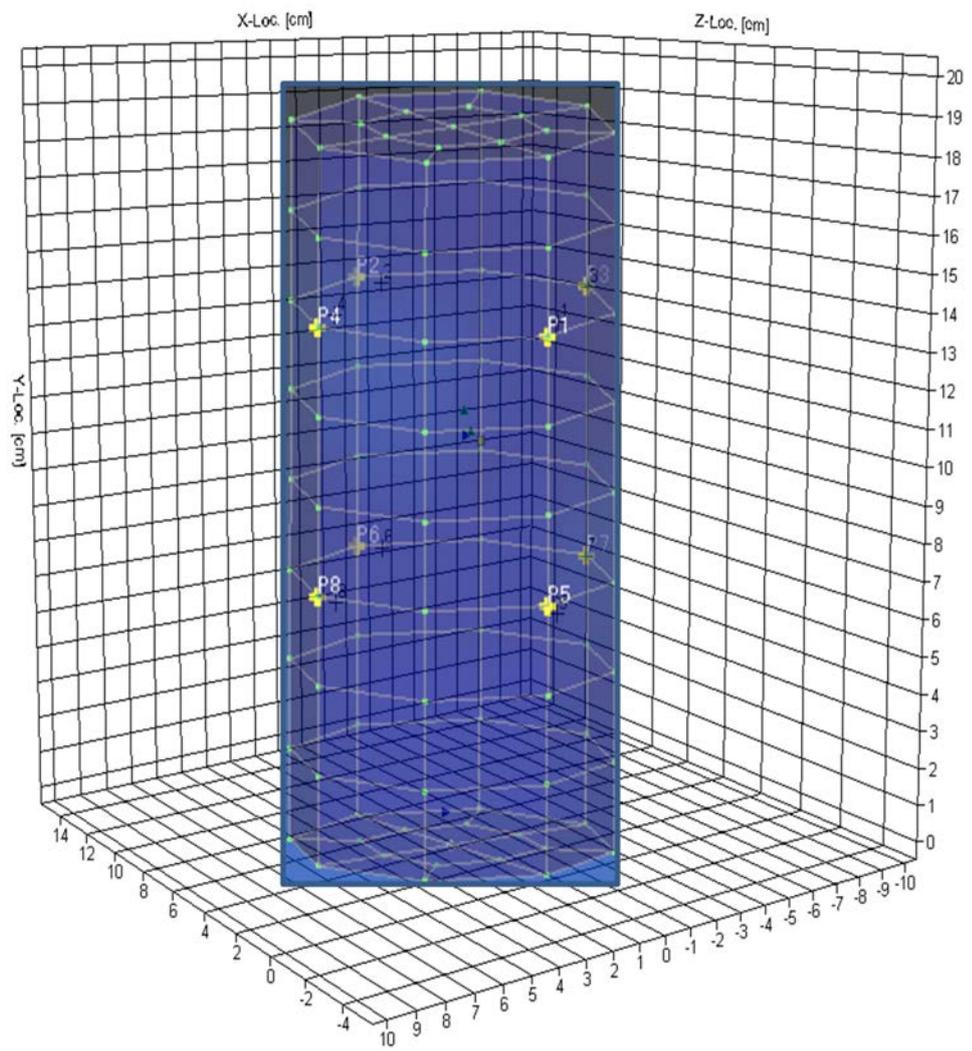


図 4.25 3次元 AE 源と AE トモグラフィ結果 (step0)

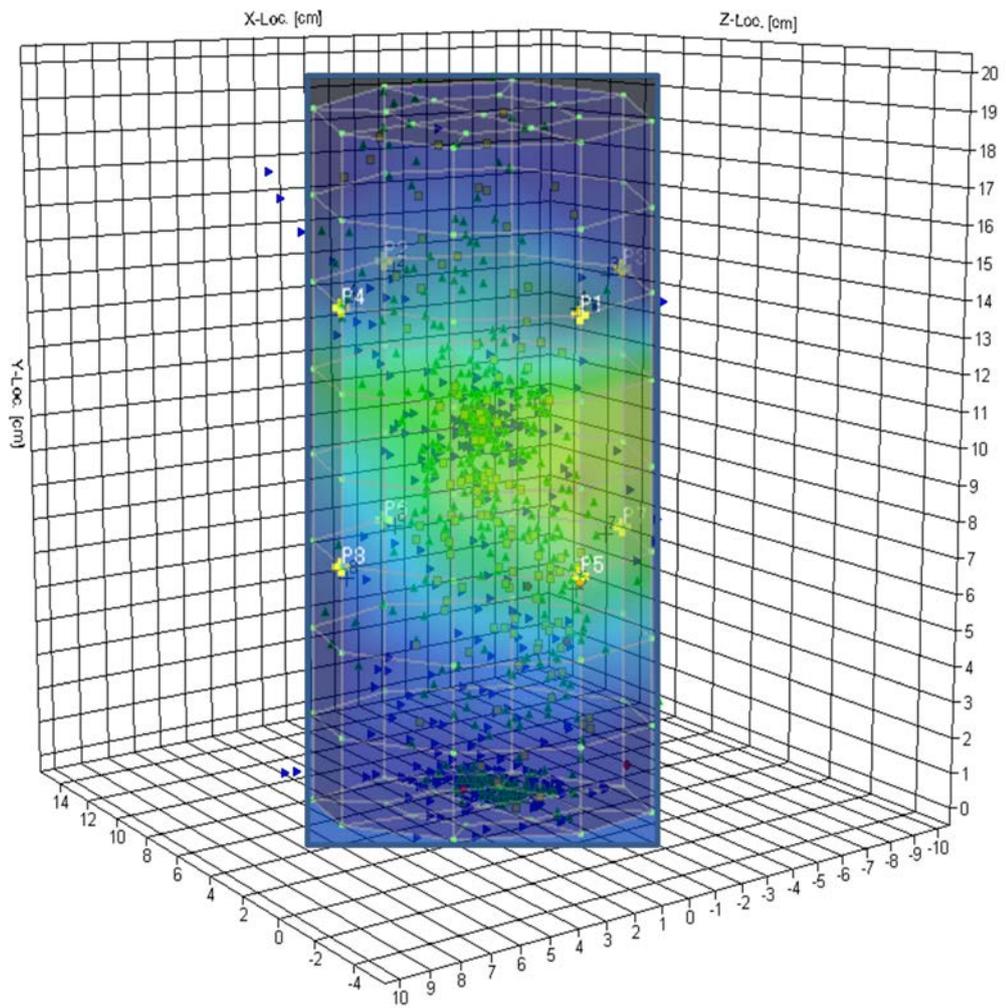


図 4.26 3次元 AE 源と AE トモグラフィ結果 (step1)

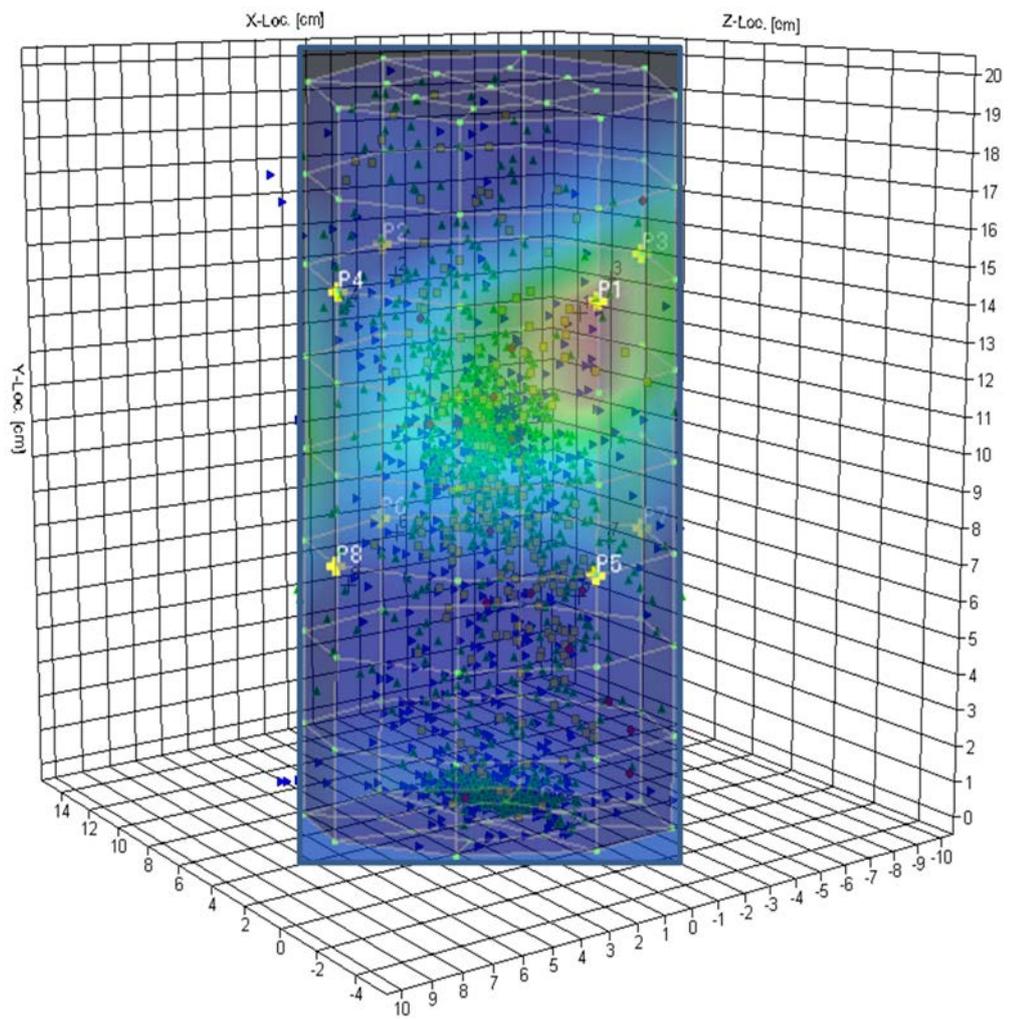


図 4.27 3次元 AE 源と AE トモグラフィ結果 (step2)

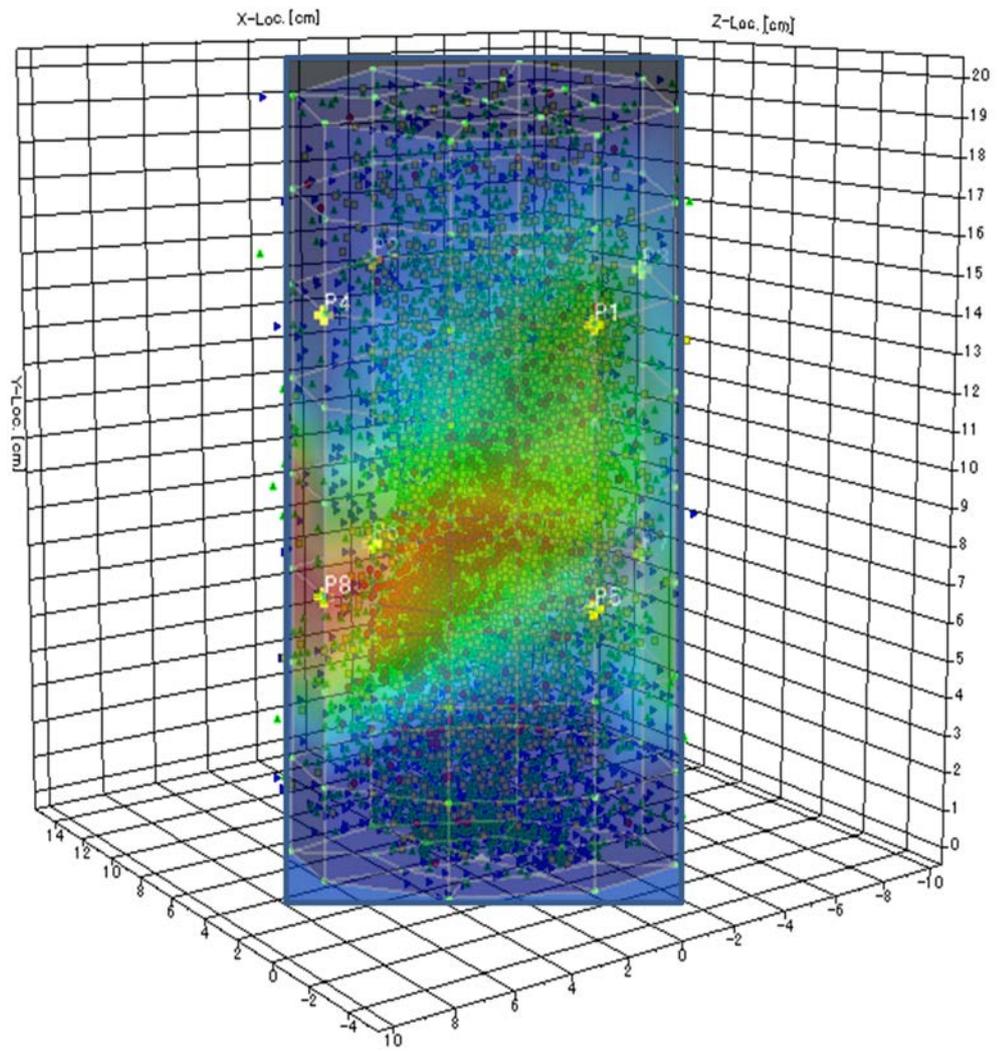


図 4.28 3次元 AE 源と AE トモグラフィ結果 (step3)

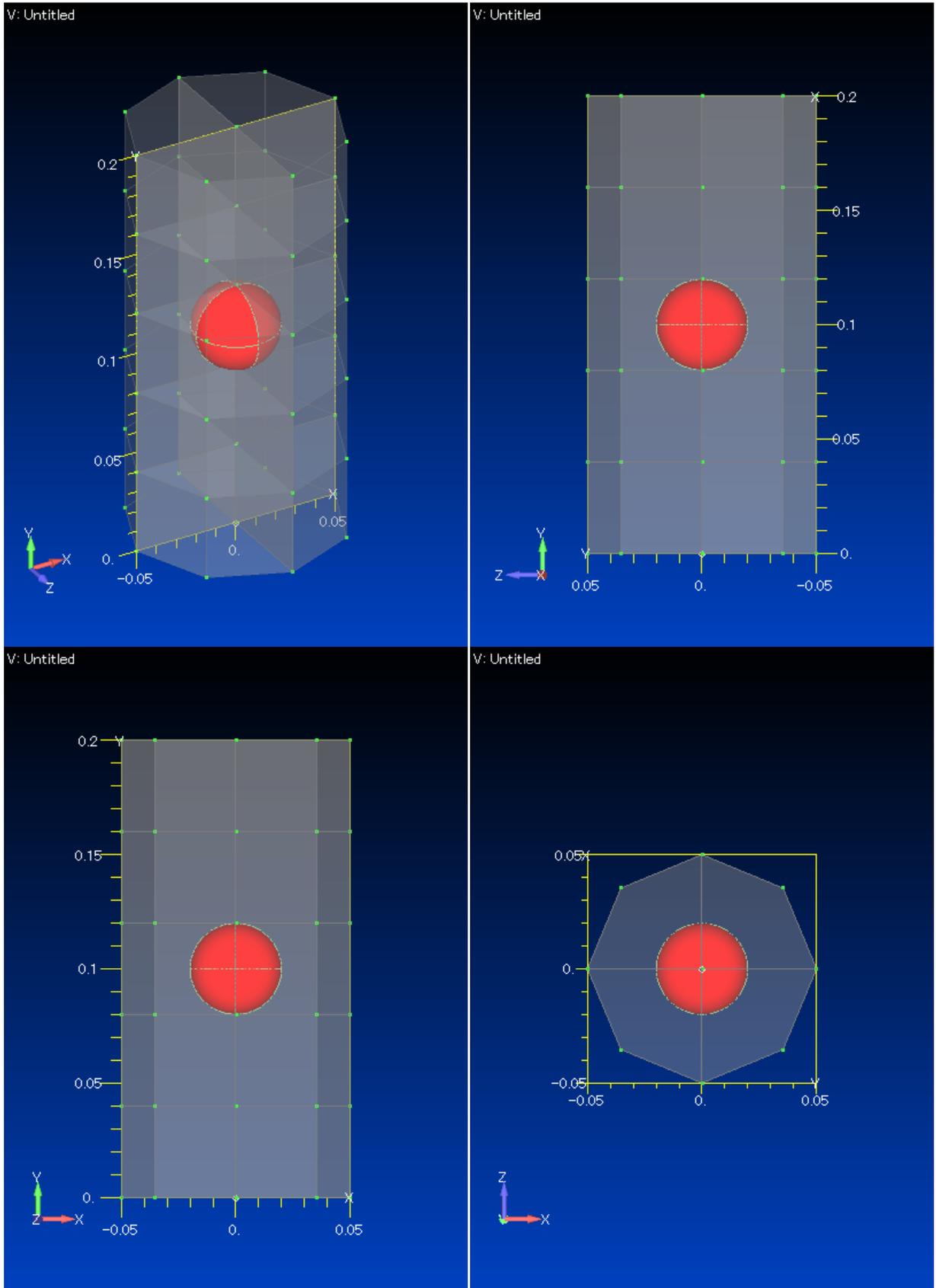


図 5.1 擬似損傷の位置 (1 個)

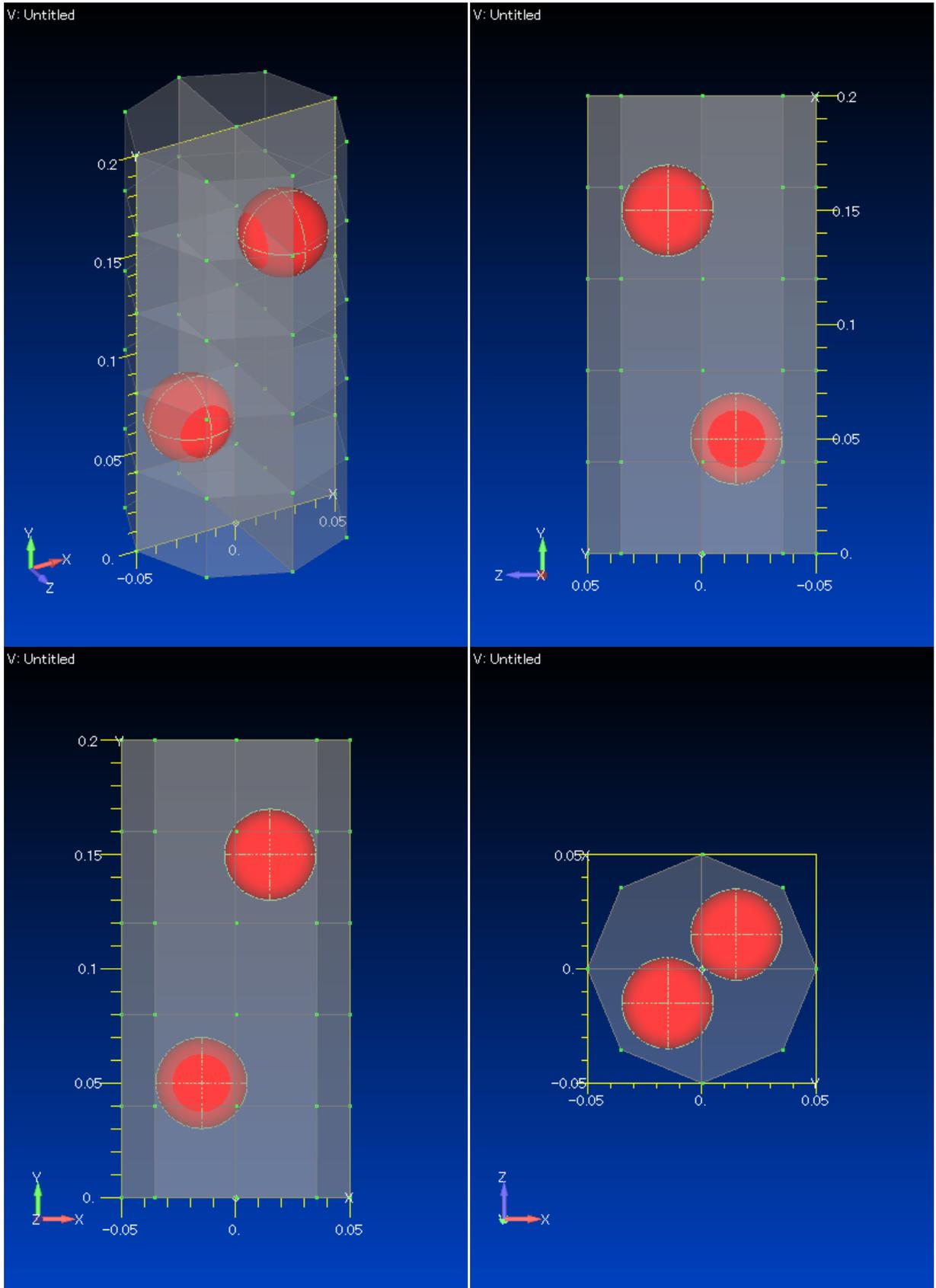
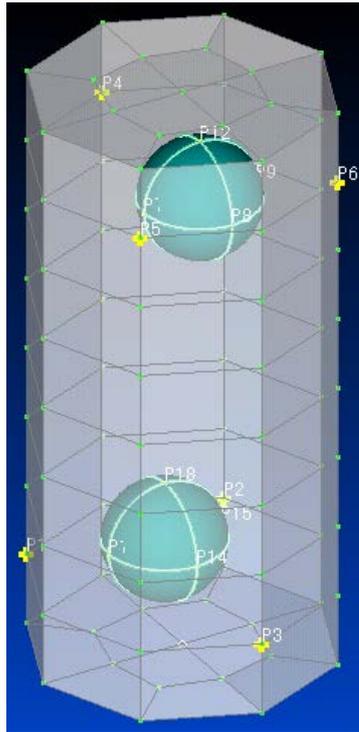


図 5.2 擬似損傷の位置 (2 個)



センサ番号	X	Y	Z
1	-0.035	0.025	-0.035
2	0.035	0.025	-0.035
3	0	0.025	0.050
4	0	0.175	-0.050
5	-0.035	0.175	0.035
6	0.035	0.175	0.035

単位 (m)

図 5.3 センサ位置

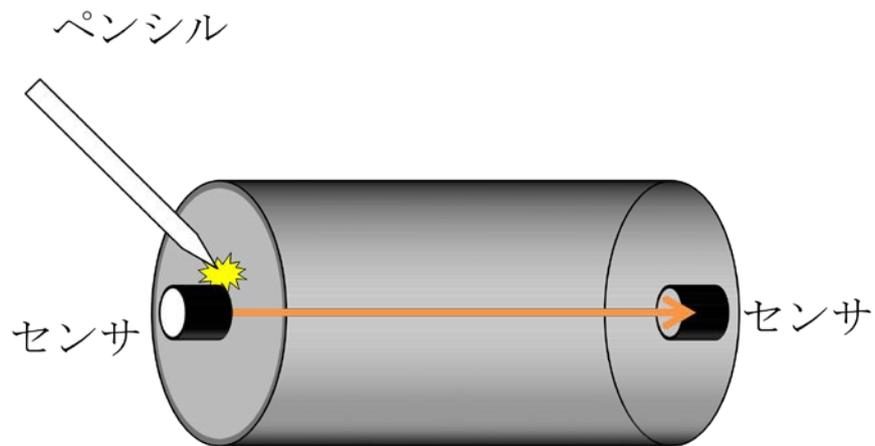


図 5.4 試験体の弾性波速度の測定

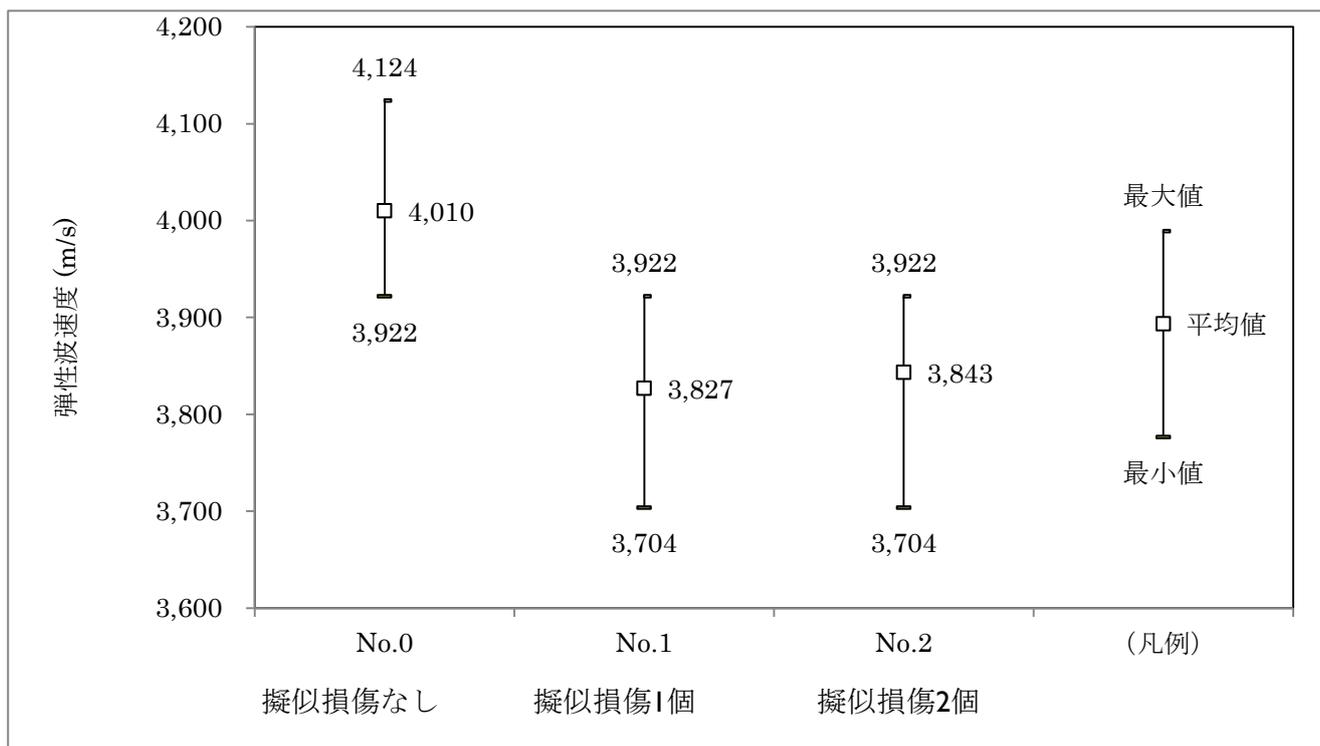


図 5.5 弾性波速度測定の結果

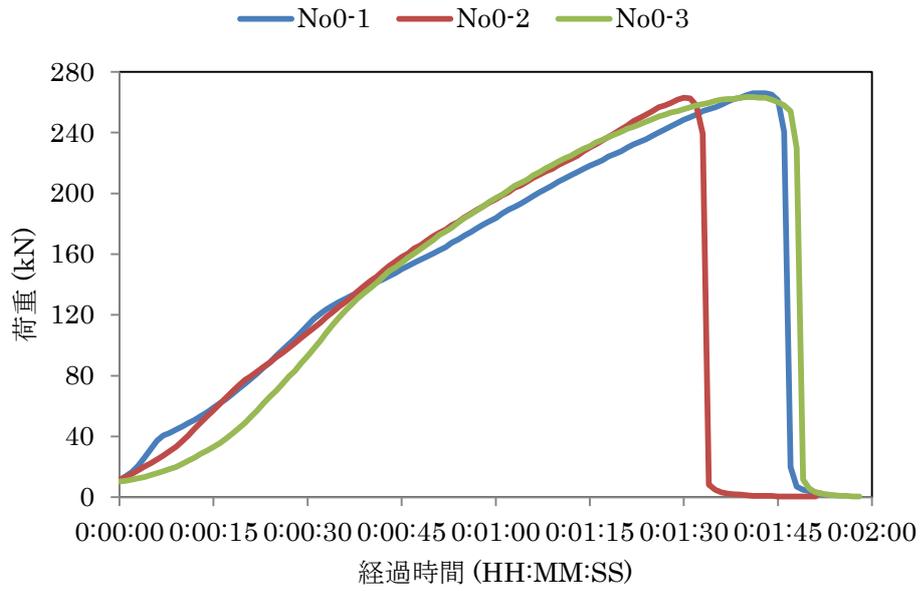


図 5.6 モルタル試験体の健全時強度

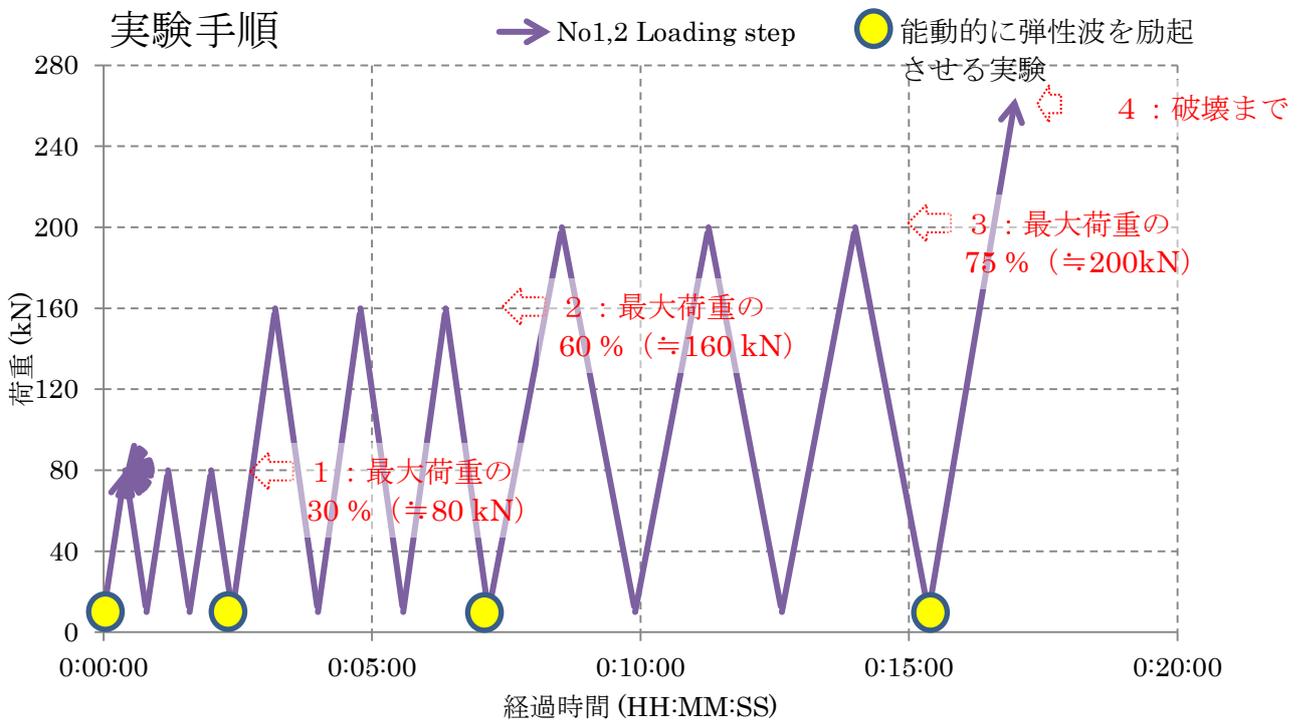


図 5.7 実験手順

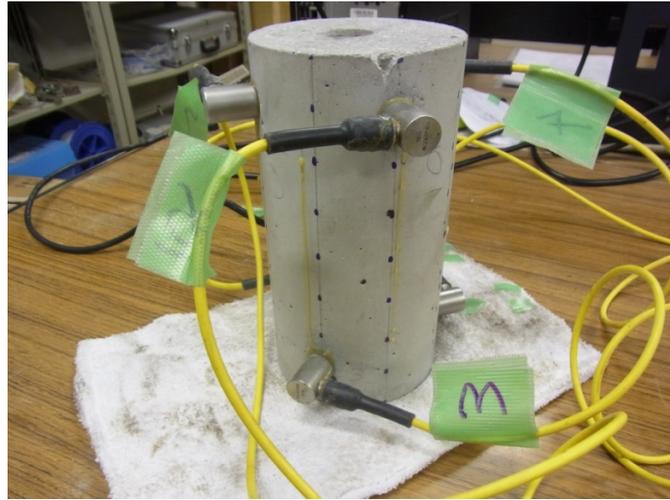


図 5.8 弾性波励起を行う発信点

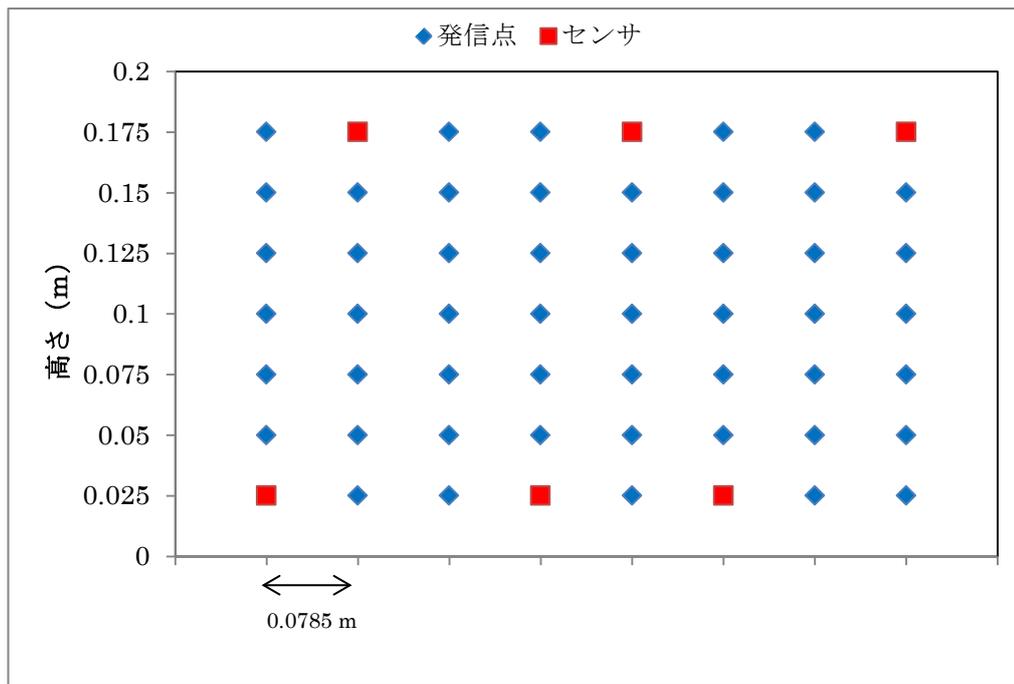
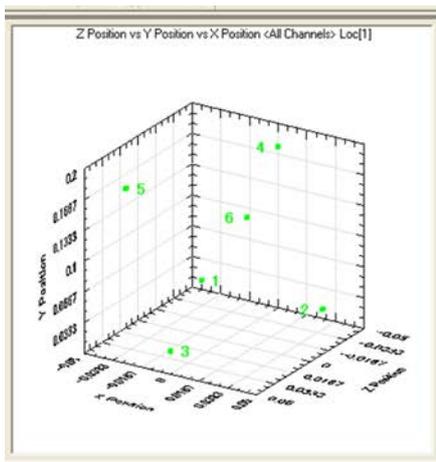


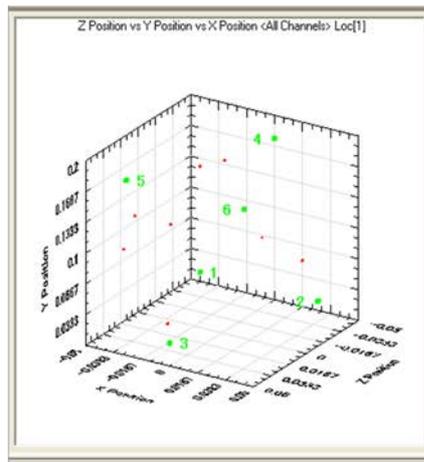
図 5.9 弾性波励起を行う発信点(試験体側面)



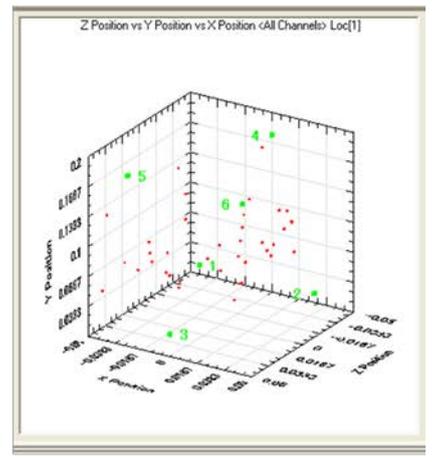
図 5.10 載荷装置



30%



60%



75%

図 5.11 各載荷段階で発生した AE(擬似損傷 1 個)

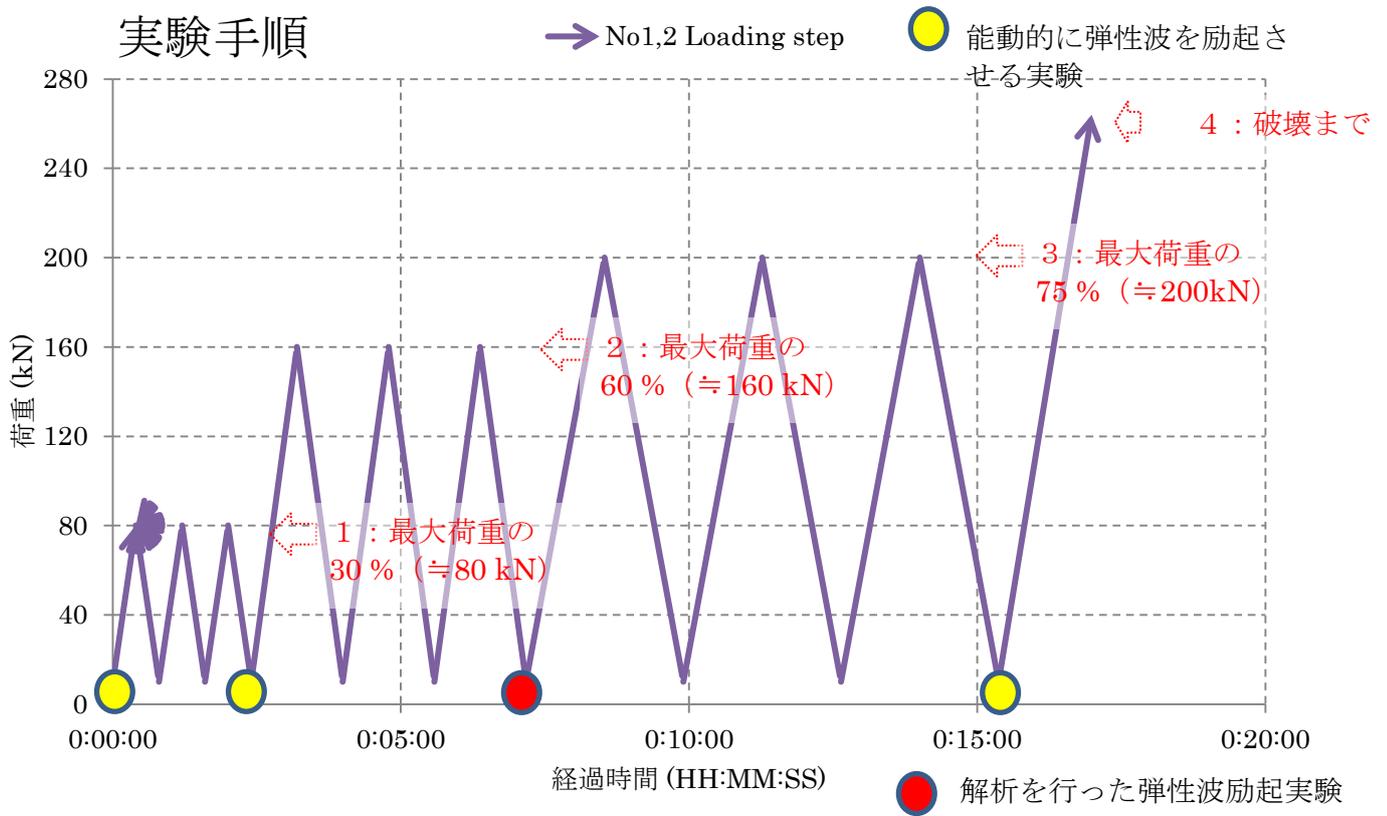


図 5.12 トモグラフィ解析を行った実験段階

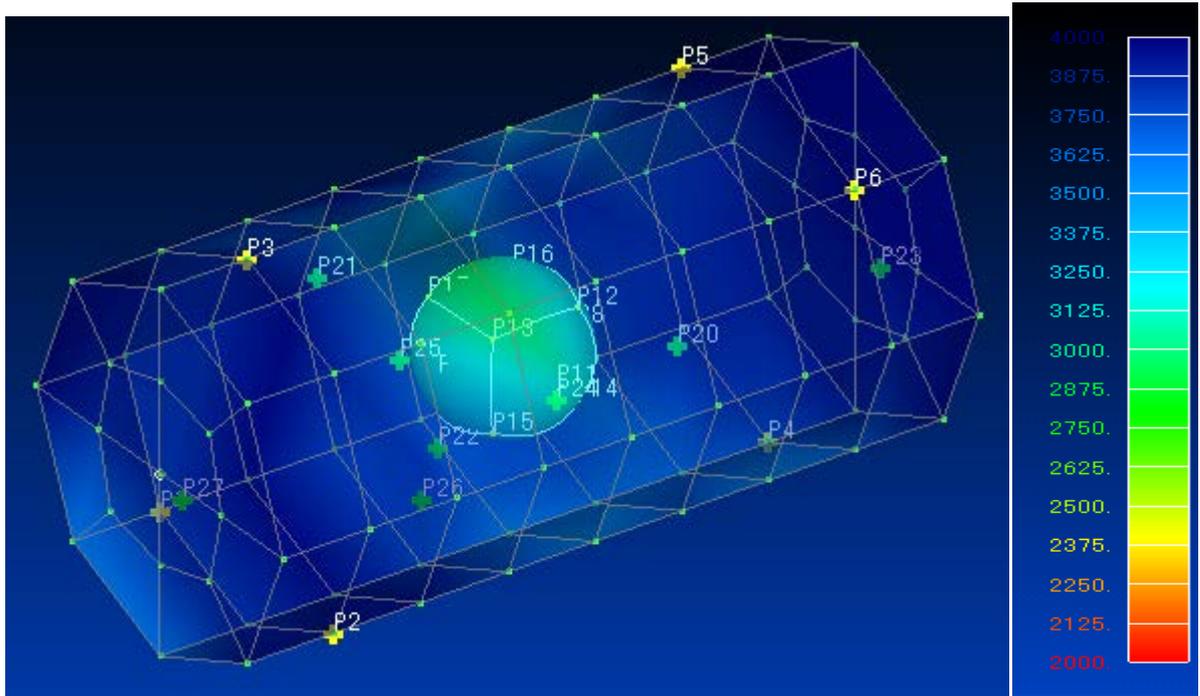


図 5.13 能動的に発生させた弾性波による解析結果（擬似損傷 1 個）

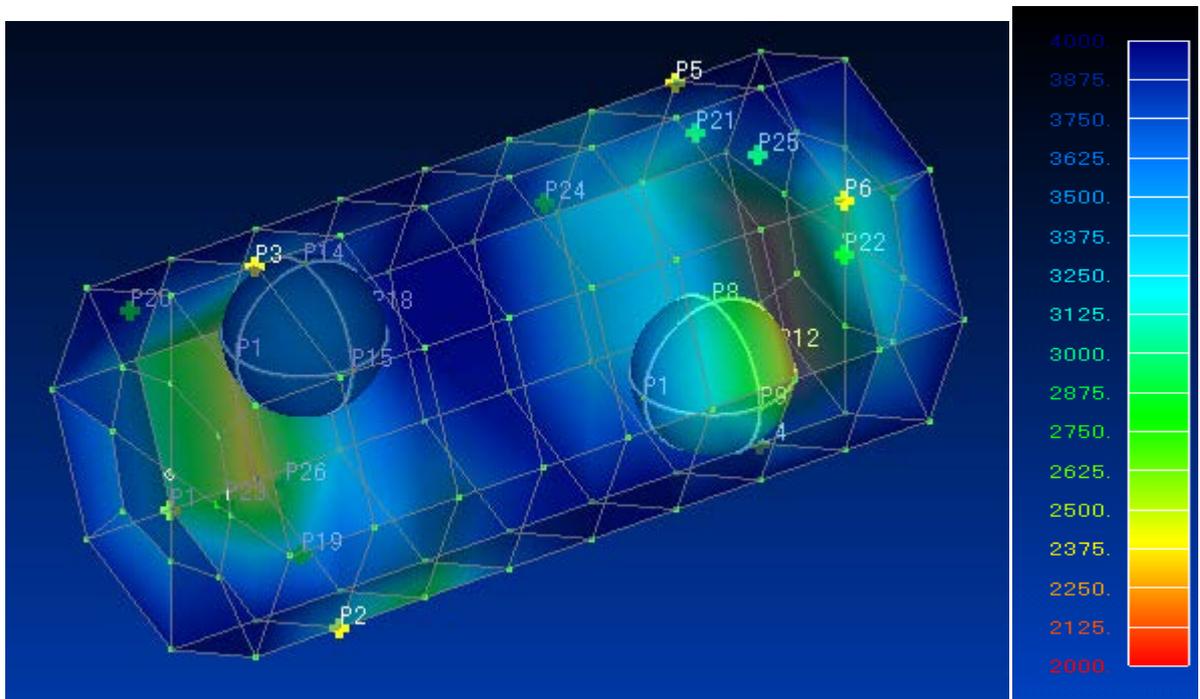


図 5.14 能動的に発生させた弾性波による解析結果（擬似損傷 2 個）

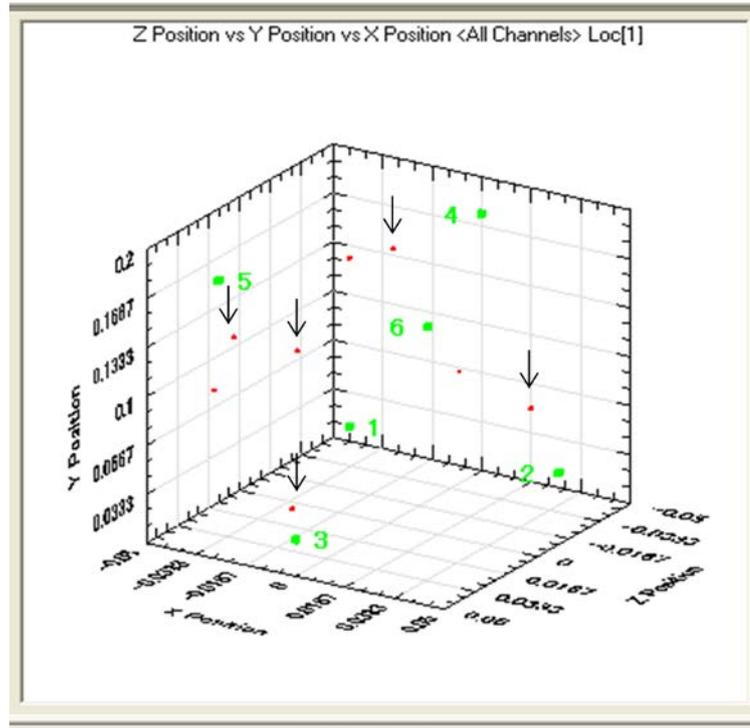


図 5.15 解析に用いた AE 源 (擬似損傷 1 個)

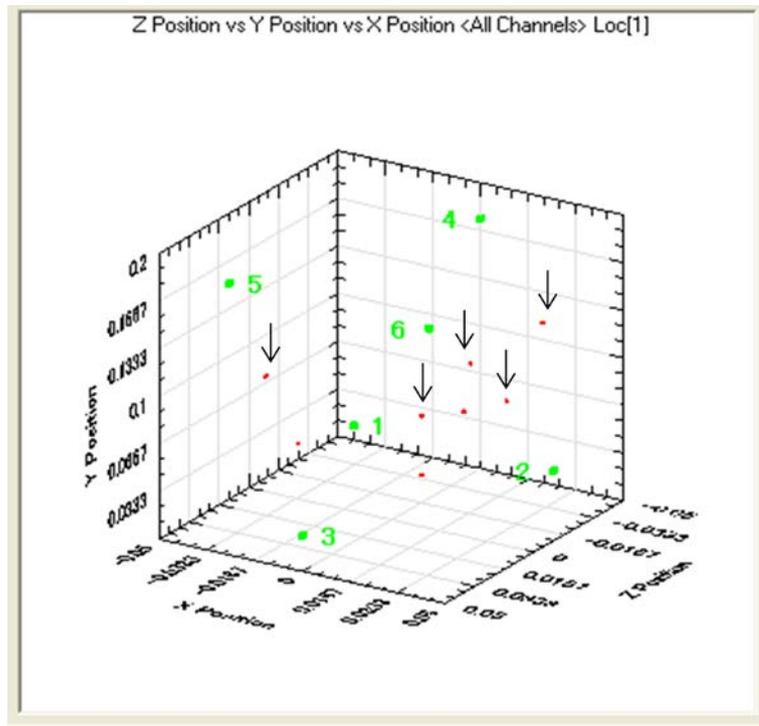


図 5.16 解析に用いた AE 源 (擬似損傷 2 個)

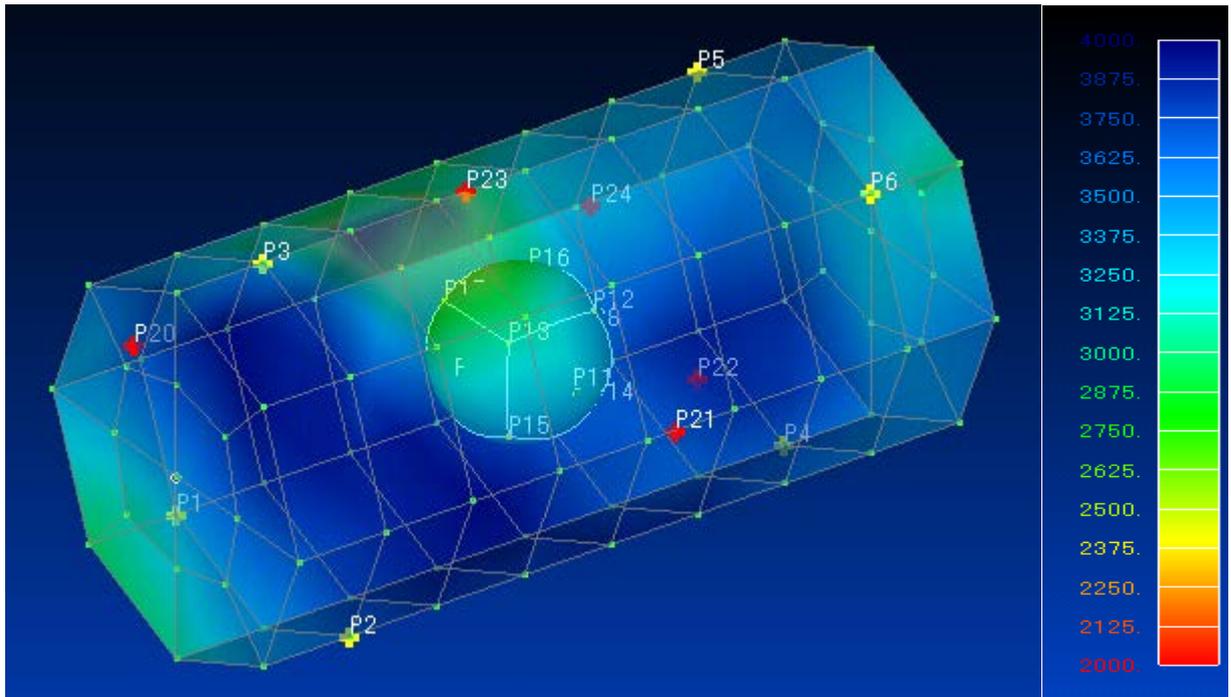


図 5.17 発生した AE を用いた解析結果（擬似損傷 1 個）

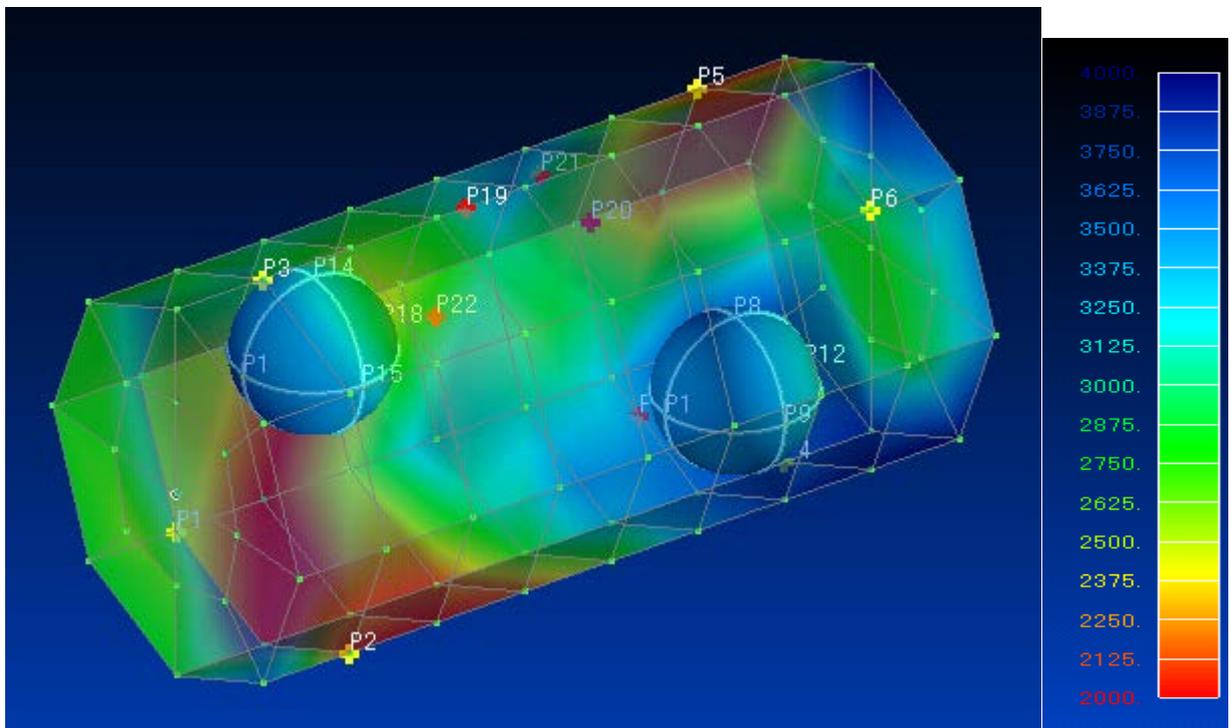


図 5.18 発生した AE を用いた解析結果（擬似損傷 2 個）

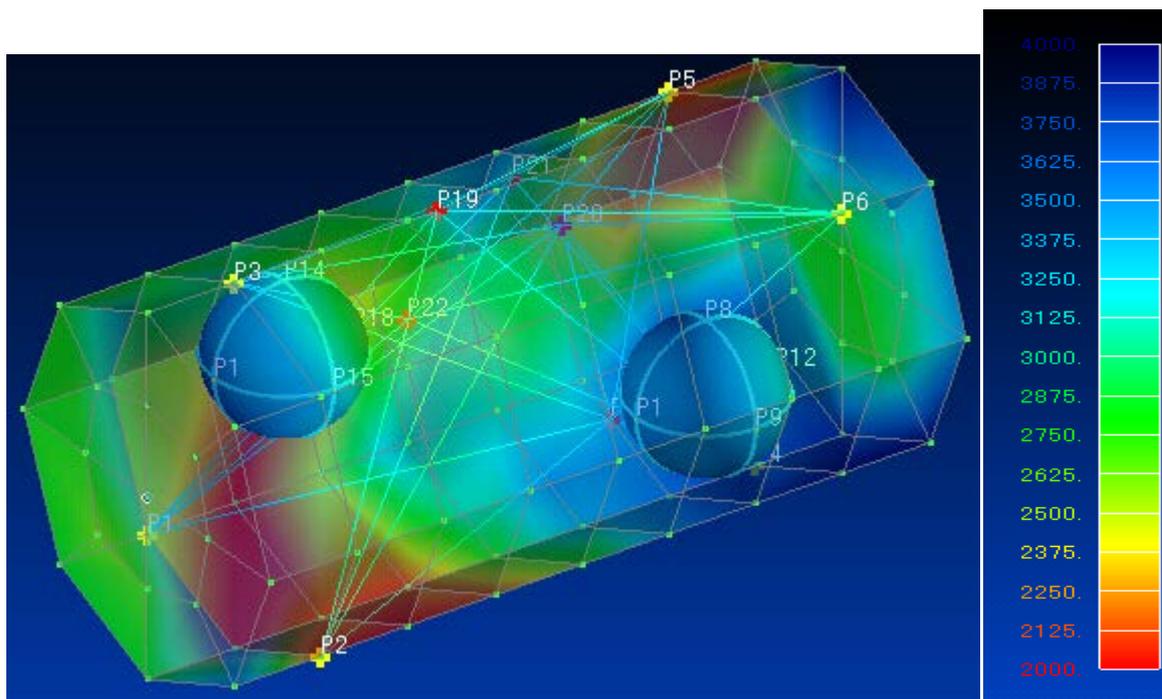


図 5.19 位置標定点から各センサへの波線（擬似損傷 2 個）