

強力空中超音波を利用した  
コンクリートの火害計測技術に関する研究

平成 25 年 9 月

大 隅 歩



# 目 次

|   |           |
|---|-----------|
| 目次.....                                     | i         |
| <b>第 1 章 緒言.....</b>                        | <b>1</b>  |
| 1.1 研究の背景と目的.....                           | 1         |
| 1.2 火害診断の現状と動向.....                         | 3         |
| 1.3 本論文の構成.....                             | 7         |
| <br>  |           |
| <b>第 2 章 計測原理と非線形空中超音波の発生.....</b>          | <b>8</b>  |
| 2.1 空中超音波を利用した非接触・非破壊方式のコンクリート火害計測の原理.....  | 8         |
| 2.2 非線形空中超音波の発生とその特性.....                   | 13        |
| 2.2.1 非線形音波の発生.....                         | 13        |
| 2.2.2 強力空中超音波発生のための音源と駆動.....               | 15        |
| 2.2.3 各種周波数の点集束音源の作成と照射音波特性.....            | 17        |
| 2.3 まとめ.....                                | 23        |
| <br>  |           |
| <b>第 3 章 非線形空中超音波による固体物の非接触励振と振動特性.....</b> | <b>24</b> |
| 3.1 実験装置の構成.....                            | 24        |
| 3.2 音波照射による非接触励振の検討.....                    | 26        |
| 3.2.1 試料を音波集束点に置いた場合の検討.....                | 26        |
| 3.2.2 試料の位置を変化させた場合の検討.....                 | 30        |
| 3.3 まとめ.....                                | 35        |
| <br>  |           |
| <b>第 4 章 コンクリートの火害計測の実験.....</b>            | <b>36</b> |
| 4.1 模擬試料の作成.....                            | 36        |
| 4.2 模擬試料の振動特性.....                          | 41        |
| 4.3 ひずみ率特性による検討.....                        | 44        |
| 4.4 まとめ.....                                | 46        |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>第5章 火害計測システムの構築</b> .....    | <b>47</b> |
| 5.1 開発した計測システムの概要.....          | 47        |
| 5.1.1 音源の改良.....                | 47        |
| 5.1.2 計測システムの構成.....            | 50        |
| 5.2 計測プログラムの構築と動作確認.....        | 53        |
| 5.3 まとめ.....                    | 56        |
| <b>第6章 模擬火災現場における検証実験</b> ..... | <b>57</b> |
| 6.1 模擬火災現場の概要.....              | 57        |
| 6.2 測定壁面と火災の詳細.....             | 58        |
| 6.3 測定壁面における温度履歴.....           | 60        |
| 6.4 コンクリート壁の温度履歴と検証結果.....      | 64        |
| 6.5 まとめ.....                    | 66        |
| <b>第7章 結言</b> .....             | <b>67</b> |
| 7.1 本研究で得られた成果.....             | 67        |
| 7.2 今後の課題.....                  | 69        |
| <b>謝辞</b> .....                 | <b>70</b> |
| <b>参考文献</b> .....               | <b>71</b> |

# 第1章 緒言

## 1.1 研究の背景と目的

強力空中超音波の最大の特徴は、音波エネルギーを非接触で対象物に作用できることである。また、強力音波には凝集させる・分散させる・力を作用させる・揺さぶる・浮かせる・保持する・移動させる・剥離させる・飛散させる・閉じ込める・吸着させる・遮断するなどの特有の効果があることから、これらを利用した応用技術の開発<sup>[1-11]</sup>が活発に行われている。

近年では強力空中音波を利用した物体内の非接触センシング技術<sup>[12-17]</sup>も研究されており、多方面から注目を集めている。ここで使用されている音波の周波数は数 kHz から数百 kHz である。代表的な技術として、一つは音圧レベル約 120 dB の数 kHz の音波を建築物に照射して非接触で励振させ、物体表面の振動を光学機器で非接触計測、解析することで建築物内部の欠陥を検出する方法である。この技術の最大の問題は照射音波が騒音になってしまうことである。長時間暴露した場合には難聴になりうる音波強度であり、しかもヒトの聴感にとって最も感度のよい周波数であるため防音が難しく、使用する場所と時間に制限があるなど実用の点で問題を抱えている。他の一つは、百 kHz 以上の強力超音波を用いて材料内部の欠陥を検出する技術である。高い周波数を使用するので分解能に優れているが、強力音波の発生が困難なため被測定物と音源の位置関係の設定を極めて厳密に行う必要があり、検査対象物と検査場所が限定されてしまう。

著者は、強力空中超音波を利用した非接触センシング<sup>[18-23]</sup>の開発に取り組んでいる。本研究で提案する方法の最大の特徴は、音圧レベル 160 dB 以上の極めて強力な空中超音波を使

用していることである。音波が強力であるため固体物を容易に非接触で励振することが可能であり、被測定物と音源の位置関係に自由度がある。また、点状に集束する音波を用いているので分解能の点からも有利である。音波の周波数は 20 kHz～50 kHz であり、人間の可聴範囲外であるからほぼ無騒音の状態で実用することができ、使用する場所や時間に制限がないことも大きな特徴になっている。また、音波照射によって発生する物体表面の振動は、レーザドップラ振動計で計測しており、これにより完全非接触のセンシングが可能となる。なお、レーザドップラ振動計に使用するレーザ光のスポット径は極めて小さく、高分解能の計測を行うことができる。

本研究で提案する計測手法は広く利用できる可能性がある。その一つが火災にあった耐火建築資材の火害の計測である。建築物の火害の状況を把握することは、出火原因の特定や建物の再使用の可否、またそれに伴う補修規模を決める上で極めて重要である。計測の主な対象はコンクリート壁であり、その方法は多岐に渡るが、精度の高い検査法は破壊検査に限定されている。しかし、この検査方法ではコンクリート壁の一部を破壊して行うため、実施には制限が伴う上に、多大な時間と労力がかかることが問題点となっている。そのため、簡便かつ非破壊による精度の高い検査法が望まれている。

本研究の目的は、コンクリートの火害を簡便かつ非接触・非破壊にて計測するシステムを構築することにある。そのための新たな手法として、強い非線形性を有する強力空中集束超音波とレーザドップラ振動計を用いた計測技術を考案し、実際の火災現場で実用可能となる新たな非接触非破壊方式の火害計測システムの実現を目指している。

## 1.2 火害診断の現状と動向

現在使用されている耐火建築物の火害に関する調査方法としては、鉄筋コンクリート造の建物の再使用を判断するために使用される熱・火害による劣化の診断<sup>[24,25]</sup>がある。これまでに、種々の物理的、化学的診断法が開発・研究されており、それらは日本建築学会の火害診断補修小委員会にて表 1-1 に示すように各種体系化されている。また、その他の手段として接触式の超音波探触子を用いて超音波伝搬速度を測定することで、コンクリートの強度およびヤング率を推定する方法やコンクリートの焼成温度と粉末 X 線解析(XRD)による結晶構造・構成物質の分析結果を基にコンクリートの受熱温度を推定する方法もある。

さらに、図 1-1 に示すように火害調査診断の手順も定められている。火害調査における予備調査は主に情報収集である。一次調査の方針を決めるための建物概要として竣工後の諸履歴および適用された関連法規などの収集、構造概要の調査、発生した火災に関する情報として新聞や消防署および建物関係者から出火原因・出火位置・可燃物の量と種類・消火の状況・出火時刻・鎮火時刻などの火災状況の収集を行う。

次の一次調査では、二次調査の要否を確定することを目的に、部材の表面状況による火災の進展状況の把握、調査範囲の決定、表面受熱温度の推定を主に目視観察にて行い、部材および建物の火害の程度を判断する。さらに二次調査では、火害の程度を詳細に把握するために力学的試験や材料分析を行う。

以上のように、火害診断に関してはすでに体系化がなされているが、精度良く火害を計測できるのはいずれも破壊検査である。しかし、この検査を行うにはコンクリート壁の一部を

破壊する必要があるため、その実施に制限が伴ってしまう。また、表 1.1 からわかるように非破壊検査のみで火害を精度よく計測する指標も整っていないのが現状であり、新たな非破壊検査方法の出現が望まれている。



表 1-1 コンクリートの火害調査法一覧<sup>[24]</sup>

|                  | 調査手段・方法                     | 調査対象の性能              | 長所                                   | 短所  |
|------------------|-----------------------------|----------------------|--------------------------------------|---|
| 一<br>次<br>調<br>査 | ①リバウンドハンマーによる反発硬度           | 表面の反発硬度              | 現場部材の損傷なし                            | 表面の硬度しか測定できない・圧縮強度推定は難しい                                |
|                  | ②はつりによる中性化深さの測定             | 中性深さ(耐久性の劣化度合)       | 現場で調査可能である<br>コア抜きが難しい部材でも対応可能である    | 500℃以上かどうかの判定しかできない・経年変化との判別が困難な場合がある                   |
|                  | ③モース硬度計による引っかき硬さ試験          | 表面硬さ                 | 現場部材の損傷なし・簡易である                      | 表面の硬度しか測定できない・圧縮強度推定は難しい                                |
| 二<br>次<br>調<br>査 | ④コンクリートコアの抜き取り試験(圧縮・ヤング係数)  | 圧縮強度・ヤング係数           | コンクリート強度、ヤング係数を確実に測定できる              | 部材の断面損傷が大きい・深さ方向の強度、ヤング係数の分布は測定できない                     |
|                  | ⑤コンクリートコアによる抜き取り試験(中性化深さ試験) | 中性深さ(耐久性の劣化度合)       | 中性化を確実に測定できる                         | 部材の断面損傷が大きい・500℃以上かどうかの判定しかできない・経年変化との判別が困難な場合がある       |
|                  | ⑥小径コアの抜き取り試験                | 圧縮強度・中性化深さ(耐久性の劣化度合) | 部材の断面積損傷が小さい                         | 圧縮強度推定のためには、強度推定式を作成する必要がある                             |
|                  | ⑦鉄筋の引張試験                    | 引張強度                 | 残存強度が把握できる                           | 部材の損傷がある  |
|                  | ⑧ UV スペクトル試験(GBRC法)         | 受熱温度                 | 深さ方向の受熱温度が推定できる                      | コア抜きのため断面損傷が大きい・調査手順が複雑・コンクリートに使用された混和剤によっては推定できない場合もある |
|                  | ⑨過マンガンカリウムによる酸素消費量の定義分析     | 受熱温度                 | 深さ方向の受熱温度が推定できる・対応可能な混和剤の種類が多い       | コア抜きのため断面損傷が大きい・調査手順が⑧よりも複雑である                          |
|                  | ⑩振動試験                       | 床梁の剛性                | 床梁の構造体としての健全性を調べられる                  | 大変形時の性状や耐力を調べることはできない                                   |
| ⑪載荷試験            | 床梁の強度(耐力)                   | 床梁の構造体としての健全性を調べられる  | 調査が大掛りである・ジャッキを使用する場合は最上階のはりへの適用は難しい |   |

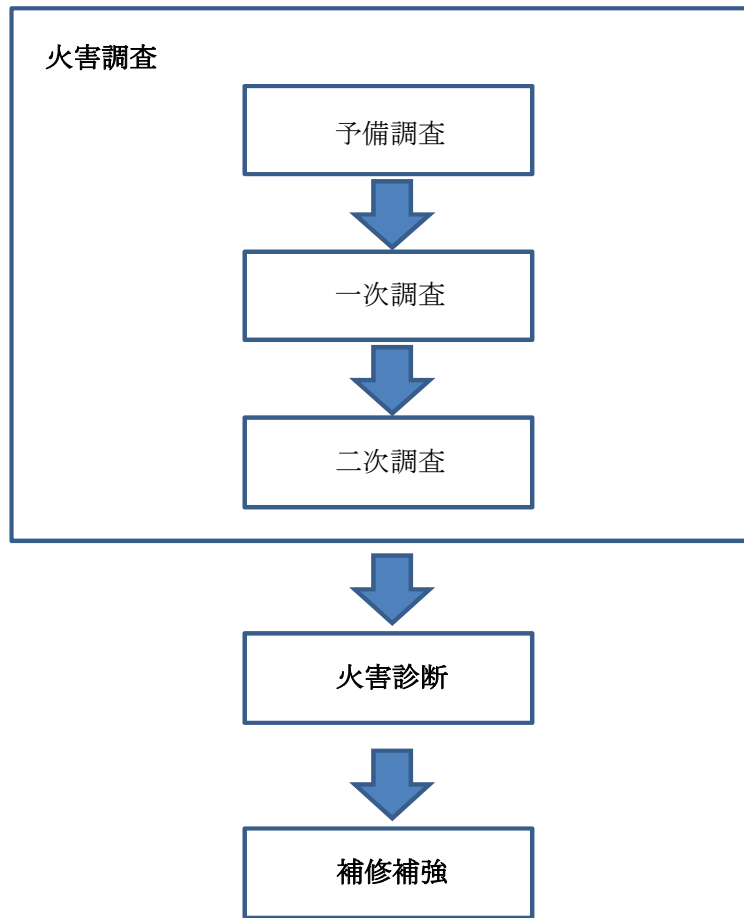


図 1-1 火害調査・火害診断のフロー

### 1.3 本論文の構成

本論文では、まず、提案した計測原理に基づいて実験装置を組み立て、装置に用いる超音波音源から発生する強力空中超音波の非線形特性を明らかにし、この超音波照射による固体物の非接触励振の可能性について検討を行っている。次に、火災にあったコンクリート壁を模した試料を作成し、本手法による火害計測のための基礎実験を行っている。また、実使用に向けた計測システムを開発し、これを構築した。さらに、実地検証として実際の集合住宅の一区画に火災を発生させ、そのときのコンクリート壁面の温度履歴と本計測システムで得た火害計測結果との比較検討を行い、本手法の有効性を明らかにしている。

本論文は、以下の構成になっている。

第2章では、計測原理と非線形空中超音波の発生について述べる。

第3章では、計測原理に基づいた強力空中超音波による固体物の非接触励振の検討とその振動特性について述べる。

第4章では、火災現場でのコンクリートを模した試料を作成し、コンクリートの火害計測の基礎実験について述べる。

第5章では、計測システムの構築について述べる。

第6章では、模擬火災現場の実証実験について述べる。

第7章では、結言を述べる。

## 第2章 計測原理と非線形空中超音波の発生

本章では、本研究の計測原理、強力空中超音波を発生させる点集束型超音波音源および実験装置について述べる。

### 2.1 空中超音波を利用した非接触・非破壊方式のコンクリート火害計測の原理

コンクリートは、図 2-1 に示すように骨材とセメント硬化体で主に構成されるが、火災などで高温に曝されると、構成される個々の材料の劣化により力学的特性<sup>[26-28]</sup>が変化する。

セメント硬化体は構造的に見ると、①セメント水和物、②吸着水と水和物で構成される細孔内に存在する毛管水、③毛管よりも大きな空隙に存在する自由水からなる多孔体<sup>[29]</sup>で構成される。高温度に曝された場合には、これらがそれぞれ脱水され、それに伴い微細構造の変化により劣化することになる。また、セメント硬化体を成分から見るとケイ酸カルシウム(C-S-H)系水和物、水酸化カルシウム(ポルトランドイト、エトリンガイト、モノサルフェイト)などの主要水和物で構成されており、温度による影響もそれぞれ異なる。特に、主要生成物の水酸化カルシウム( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )は約 500 °C で脱水し、 $\text{CaO}$  と  $\text{H}_2\text{O}$  になる。このため、コンクリートに膨張性のひび割れを生じさせ、コンクリートの力学的特性を著しく劣化<sup>[30-32]</sup>させる。また、水酸化カルシウムの脱水により中性化が進み、耐久性も低下する。

一方、高温度に曝された骨材は、岩質や生成過程により異なるが、例えば珪岩質骨材に多く含まれる石英は 570 °C で結晶構造が変化し、石灰岩は 600 °C ~ 900 °C で主成分である炭酸カルシウムの脱炭酸反応が生じ崩壊する。

また、高温になるとセメント部は収縮し、骨材は岩質にもよるが基本的に膨張する。したがって、この相反する挙動により両者間には微細な剥離が発生する。その結果、圧縮強度やヤング率等の機械的な性質が常温時に比べ大きく低下する。特に、受熱温度が 500 °C を越えるとヤング率は 1/10 以下になるとの報告<sup>[32]</sup>もある。

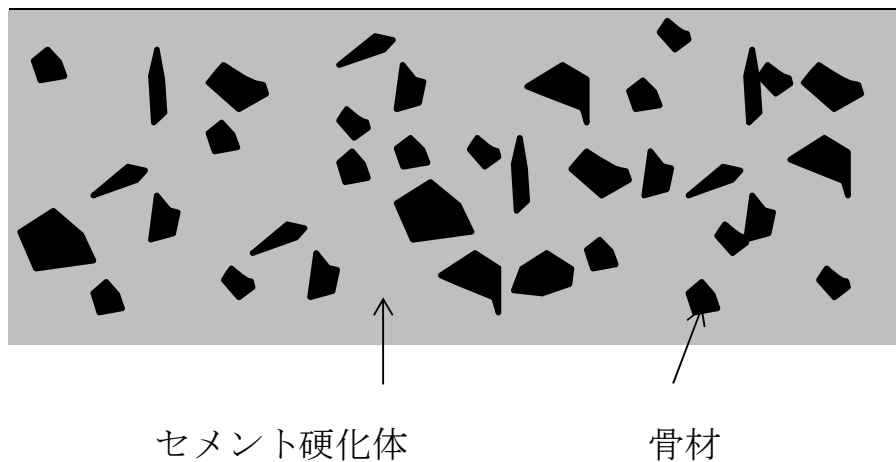


図 2-1 コンクリートの概要

いま、図 2-2 のように物体に加える力を  $F$  から  $\Delta F$  だけ変化させた時、 $F$  の力がかかった物体の長さが  $L$  から  $\Delta L$  だけ変化したとする。このときの物質のヤング率  $E$  は(2.1)式で与えられる。

$$E = \frac{\frac{\Delta F}{S}}{\frac{\Delta L}{L}} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} \quad (2.1)$$

ここで、 $S$  は物体の断面積、 $\sigma$  は応力、 $\varepsilon$  は歪み（元の長さと変化した長さの比）である。  
すなわち、高温によってコンクリートのヤング率  $E$  が減少した場合には、一定の応力変化  $\Delta\sigma$  に対してひずみの変化分  $\Delta\varepsilon$  は増加することになる。

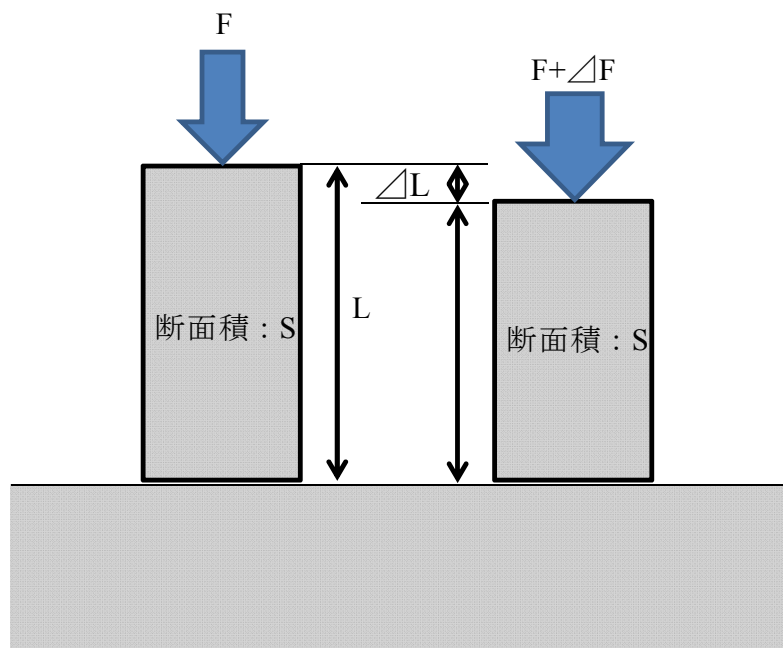


図 2-2 測定原理の概念図(1)

従って、図 2-3 のように一部分だけが高温に曝されたコンクリート壁に交番的な応力を加えた場合には、熱の影響を受けた部分のヤング率は低下するため、熱の影響を受けない部分に比べてより大きな振動が引き起こされることになる。また、交番応力の周波数が変化した場合は、発生する振動の波長も変化するため、熱の影響を受けた骨材、セメント硬化体および発生した微細な剥離が振動に影響を及ぼすことが予想される。すなわち、周波数によって加える応力と発生する振動特性の関係にも違いが生じることが十分考えられる。本研究では、

これらの特性に着目し、複数の周波数によりコンクリートを励振させ、そのときに発生する振動速度特性の違いを評価することによって火害の程度を評価することを考えた。

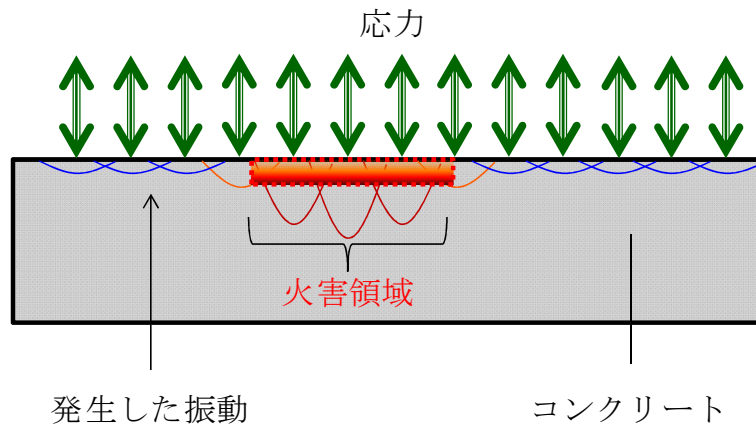


図 2-3 測定原理の概念図(2)

ところで、コンクリートを励振して、その振動特性を計測する方法としては、接触式と非接触式がある。火災にあったコンクリート壁表面の性状が良好でないことを考えると、非接触式であることが望ましい。そこで本研究では、コンクリート壁面の局部に交番的な応力を非接触で与える方法として、強力空中集束超音波を用いる。その理由として、①対象へのダメージがほとんどない、②すでに開発されている点集束型空中超音波音源により極めて強力な音波が得られる、③音波を局所的に照射できるため位置分解能が高められる、④音波が強い非線形性を有しているため、一つの駆動源で複数周波数の音波を発生できる、などが挙げられる。

次に強力空中超音波を利用して非接触で計測を行う原理を以下に示す。

いま、図 2-4 に示すように固体壁に対して空中から音波を照射するとき、固体壁面では固体と空気の媒質で定まる反射率に従って音波エネルギーの反射と透過が行われるため、音波のほとんどは反射され、透過分は僅かである。この透過分が固体媒質を振動させるので、固体表面の振動振幅は極めて小さい。しかし、音波が強力であれば固体壁の一部を非接触励振によって音波と同じ周波数の振動をある程度の振幅で発生させることができる。しかも、強力な音波は非線形の性質を持ち、音源の駆動周波数(基本周波数)に加えて整数次の高調波成分も含むため、これらと同じ周波数の振動が同時に発生する<sup>[33]</sup>。これらの振動を光学機器で非接触計測し、周波数解析を行うことで、完全な非接触状態でコンクリート壁における複数周波数の超音波振動の発生とその振動の計測が可能となる。しかも、複数周波数の振動情報を同時に取得できるため、より詳細な解析を行うことができる。

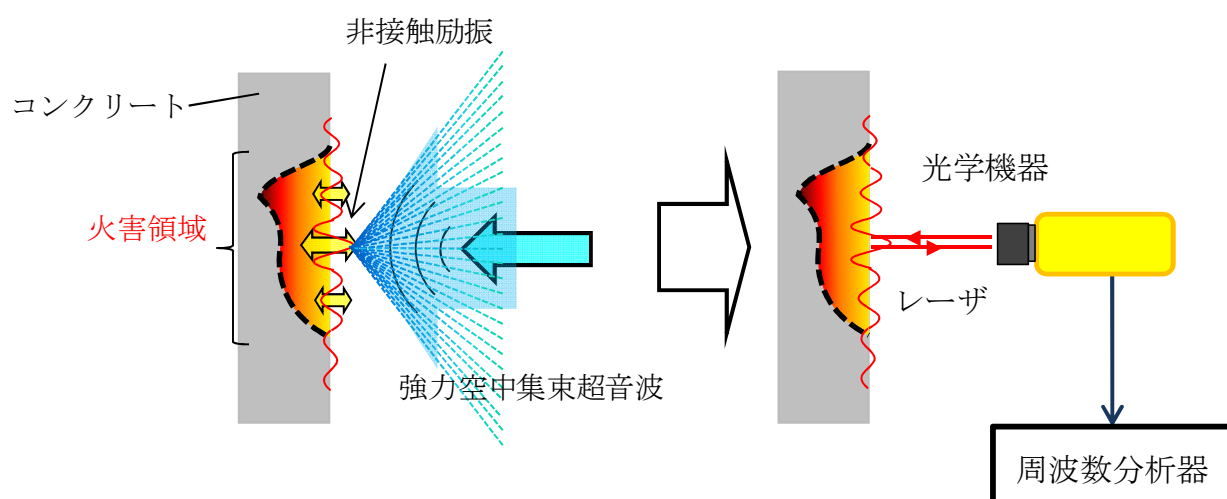


図 2-4 測定原理の概念図(3)



## 2.2 非線形空中超音波の発生とその特性

### 2.2.1 非線形音波の発生

強力音波の特徴の一つに非線形性<sup>[34]</sup>がある。音波は通常人間の可聴限界である音圧レベル 120 dB 以下の場合、無限小振幅の音波とされ、単純な正弦波と考えて差し支えない。これに対して、120 dB を超えるような強力音波は、そのふるまいから有限振幅の音波として考える必要がある。

音波の伝搬速度は、媒質の密度と圧力の関係で決まり、通常の媒質では非線形な関係を持つ。その一方で密度変化が微小と近似できる場合、すなわち音波の振幅が無視できるほど小さい場合は、媒質の密度と圧力は線形近似が可能となる。したがって、両者の間には比例関係が成立するので、音波の伝搬速度は一定と見なせる。一方、音波の振幅が無視できないほど大きい場合は有限振幅音波<sup>[35-37]</sup>と呼ばれ、音速は振幅に依存するようになる。そのため、音波伝搬とともに波形歪み<sup>[38-40]</sup>が起きる。図 2-5 にその概要を示す。図は、振幅が無視できないほど大きいと仮定した音波の伝搬過程での波形変化の様子を示している。図(a)は音源近傍の音波波形であり、正弦波である。しかし、伝搬距離が長くなるにつれて波形が歪む。これは、音圧が高い部分では音速がやや速く、低い部分では音速がやや遅いためであり、そのため伝搬するに従い音波波形がより歪む。したがって、強力な音波であるほど波形が歪みやすく、非線形の性質が強く現れる。この非線形音波は、音源の駆動周波数である基本周波数に加えてその整数倍の高調波の音波を発生する<sup>[41]</sup>。

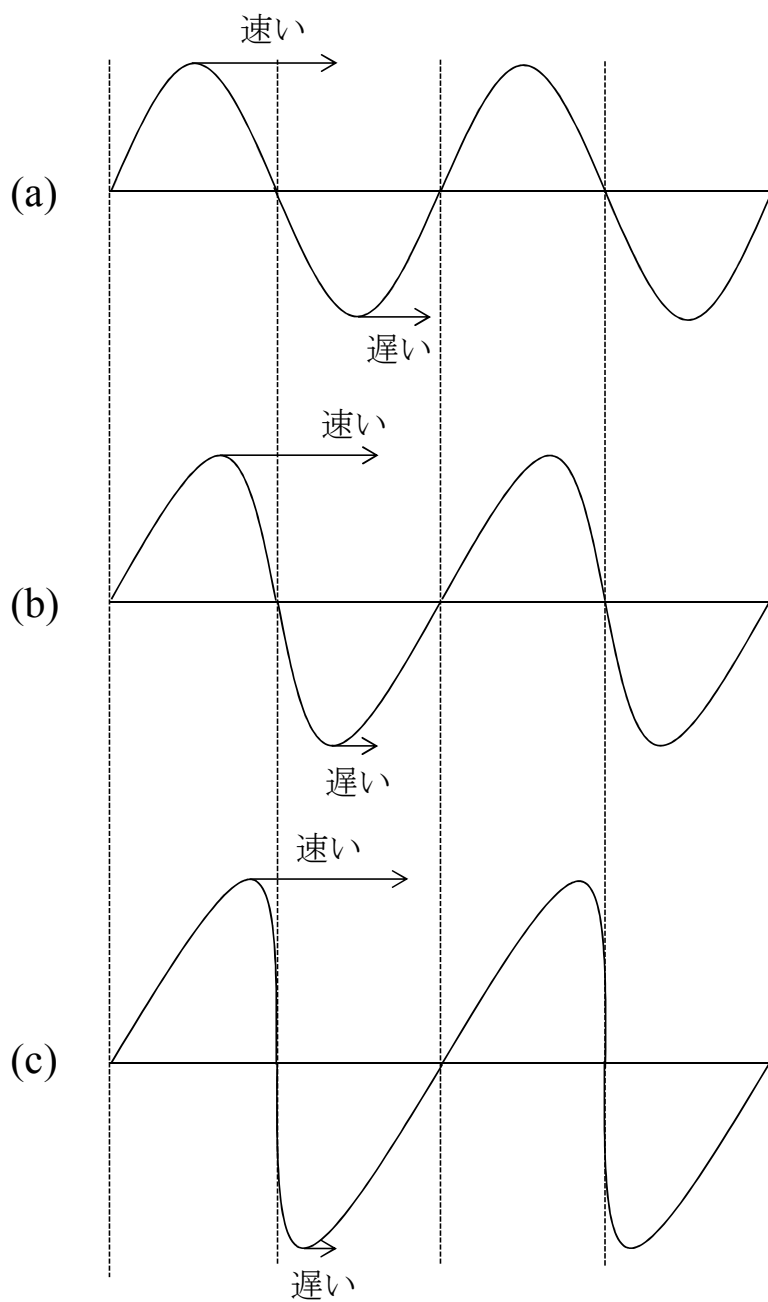


図 2-5 伝搬に伴う音波波形の変化の様子

## 2.2.2 強力空中超音波発生のための音源と駆動

空中に強力音波を発生するためには、音源を大振幅で駆動する、あるいは空中に放射された音波を何らかの方法で集束させて音圧を高める方法が考えられる。一般的には、医療超音波や超音波探傷等に代表されるように、強力音波の発生が比較的容易で分解能に優れた集束方式が用いられることが多い。

本研究においても音波を集束させる方法を採用している。図 2-6 に強力空中超音波を発生させるための点集束型超音波音源<sup>[42-44]</sup>の概略を示す。この音源の超音波縦振動系は、ボルト締めランジュバン型振動子に超音波振動の振幅を拡大させるためのエキスポネンシャルホーンを結合し、その先端に半波長共振伝送棒を接続した構成になっている。さらに、その先端に音波を放射する矩形の縞モードたわみ振動板が取り付けられている。なお、エキスポネンシャルホーン、半波長共振伝送棒、矩形たわみ振動板はいずれも疲労強度、振動の伝達効率に優れた金属(一般にはアルミ合金やチタン合金)が用いられ、それぞれは金属ネジで結合されている。

この縦振動系により発生させた超音波振動で矩形縞モードたわみ振動板<sup>[45]</sup>の中央部を板面に垂直に励振させると、振動板は振動の節線が等間隔で平行に現れる縞状モードで振動することになる。この時、振動板から自由空間に放射される音波は、振動板の中心法線に対して左右対称の単純な放射となる。そこで、縞モード振動板の表裏に放射方向変換器を配置する。放射方向変換器は、縞モード振動板の節線数と同数の隔離板と、各隔離板間に設置する放物面反射板で構成されている。これら放物面反射板の焦点距離および振動板との距離関係

を調節することにより、振動板の表裏から放射される音波が一点に集束するようになっている。なお、音源の駆動は図に示すように音源の共振周波数に等しい高周波電力を振動子に供給して行う。本研究で作成した音源のホーン、振動伝送棒、振動板はいずれもジュラミン製 (JISA2017) である。また、放射方向変換器の隔離板および放物面反射板はアクリル板を使用している

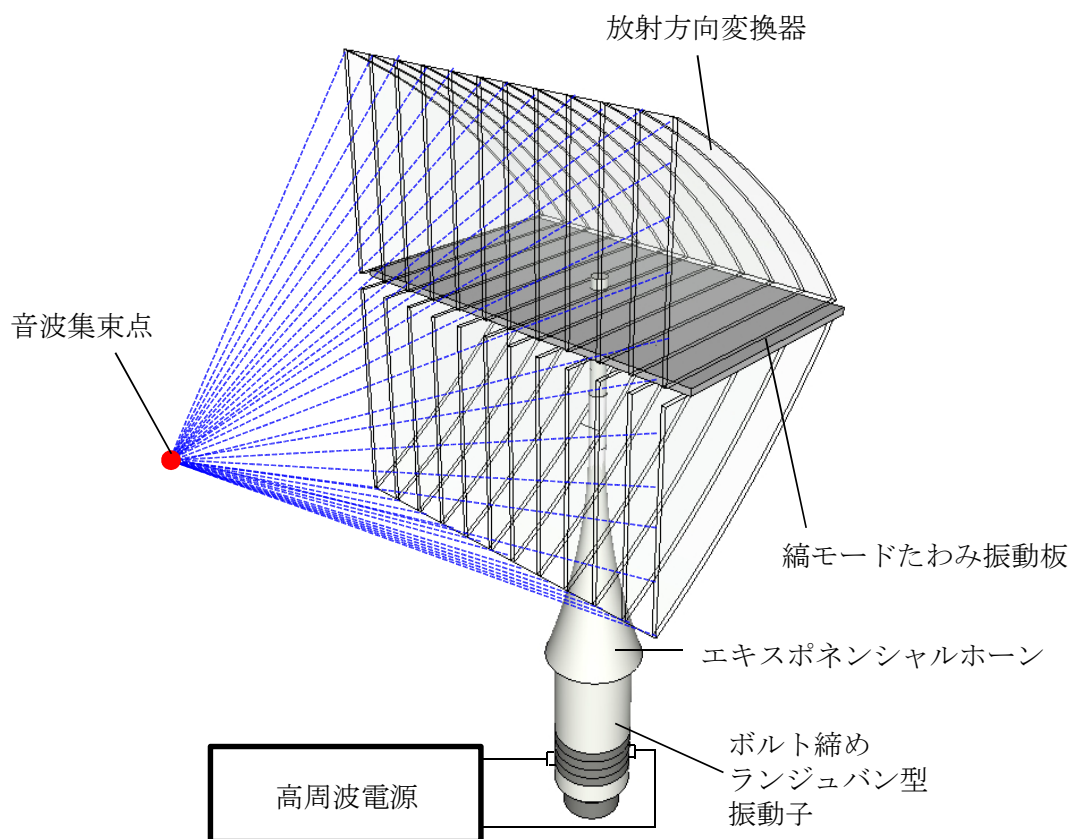


図 2-6 点集束型超音波音源の概略図

### 2.2.3 各種周波数の点集束音源の作成と照射音波特性

音源を駆動する振動子の定格周波数を基に、20 kHz～50 kHz の範囲の点集束音源を作成した。使用した振動子の共振周波数は 19.5 kHz、28.2 kHz および 50.0 kHz であり、これらの振動子を用いて作成した音源の詳細を表 2-1 に示す。なお、集束距離とは音源の開口面から音波集束点までの距離を表わす。

表 2-1 作成した音源

| 駆動周波数[kHz] | 音源の寸法<br>(縦×横×奥行き)[cm] | 振動板寸法<br>(縦×横×奥行き)[mm] | 集束距離[mm] |
|------------|------------------------|------------------------|----------|
| 19.6       | 60×30×30               | 324×170×5              | 140      |
| 26.8       | 45×30×30               | 249×145×3              | 140      |
| 50.8       | 30×20×12               | 168×87×2               | 90       |

図 2-7 に、照射音波特性を測定する装置の概要を示す。振動子への高周波電力の供給は、図に示すように信号発生器(NF ELECTRONIC INSTRUMENTS 製 1920A) と広帯域電力増幅器 (ENI 製 1140LA) により行っている。さらに、音圧の測定および周波数解析は 1/8 インチコンデンサマイクロホン(GRAS 製 40DP、測定限界音圧：178dB、周波数帯域：6.5

Hz~160 kHz)、計測増幅器(ACO 製 6030)および FFT アナライザ(小野測器製 CF-5220、周波数帯域 : 10 mHz~100 kHz)で行う。マイクロホンは 3 軸デジタルステージ(シグマ光機製 SGSP26-150、分解能 : 10  $\mu$ m)に取り付けられ、パーソナルコンピュータに接続されたパルスコントローラ(シグマ光機製 SHOT-204MS)によって 3 軸(x,y および z 軸) 方向に制御できるようにしてある。また、測定した音圧データは連動するコンピュータに取り込むようになっている。

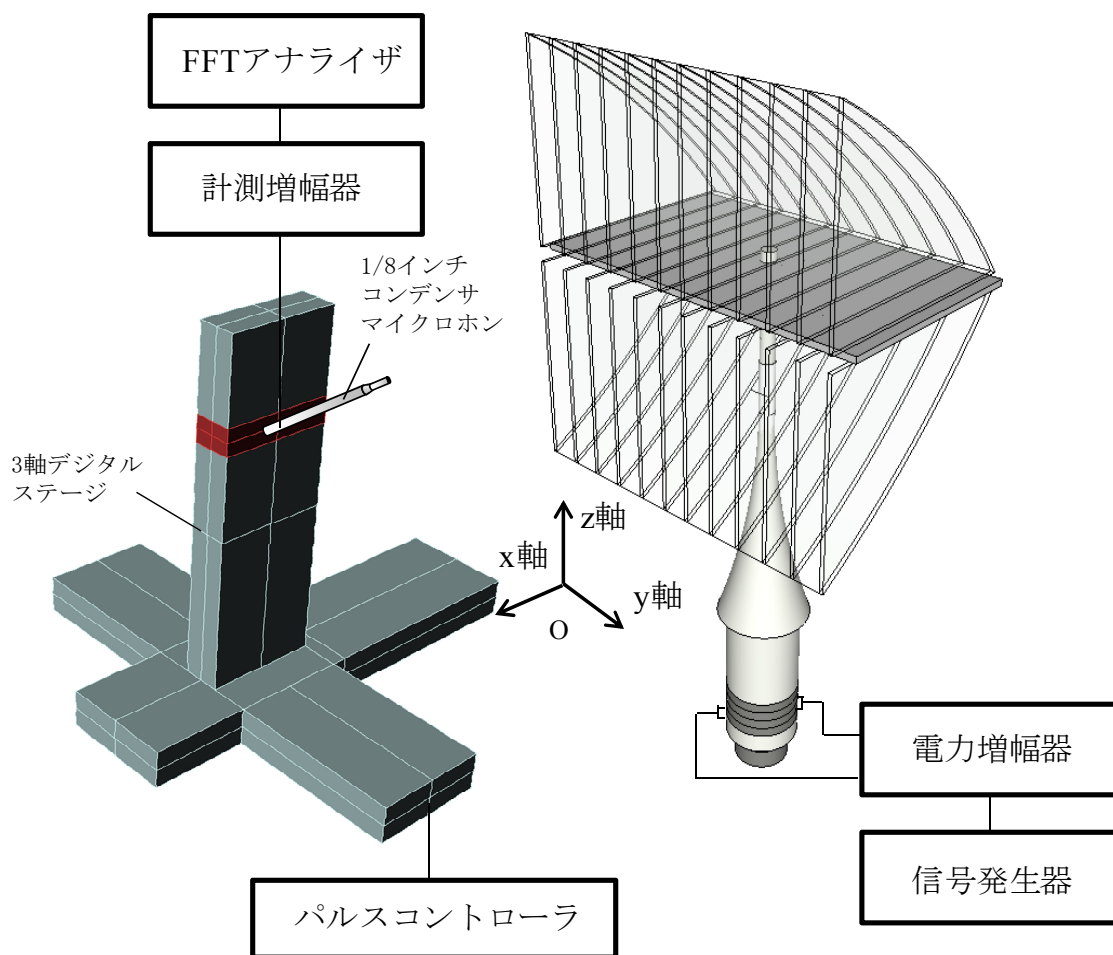
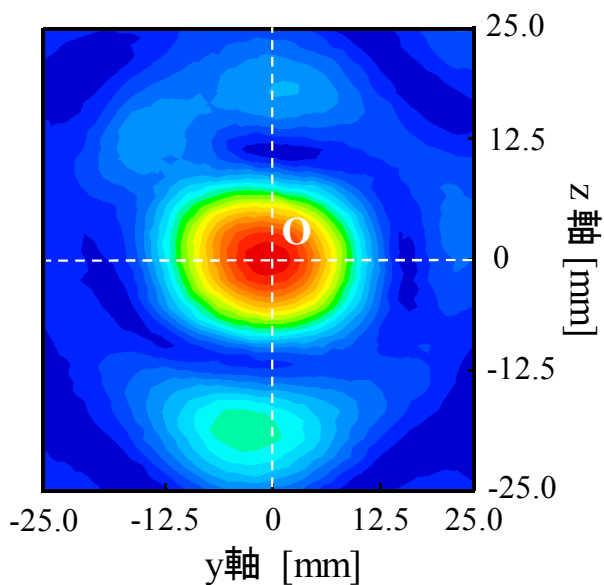
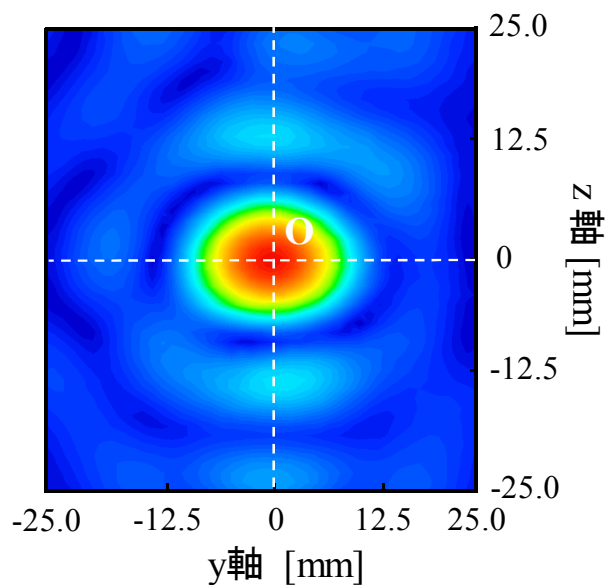


図 2-7 照射音波計測のための装置の概略図

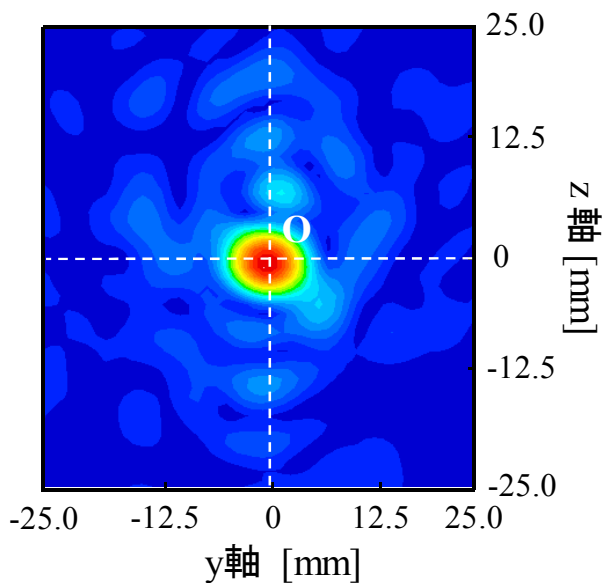
図 2-8(a)~(c)は、各音源の音波集束点付近の集束特性であり、音波集束点  $O$  を含む  $y$ - $z$  平面の音圧分布を示す。図より、いずれの音源も音波はほぼ円形状に集束しており、駆動周波数が高い音源ほど音波の集束範囲が狭くなっている。駆動周波数 19.6 kHz の音源では、音波の集束範囲は直径約 16 mm であり、26.8 kHz の音源では直径約 10 mm、50.8 kHz の音源では直径約 7 mm になっている。



(a) 駆動周波数 19.6 kHz の音源



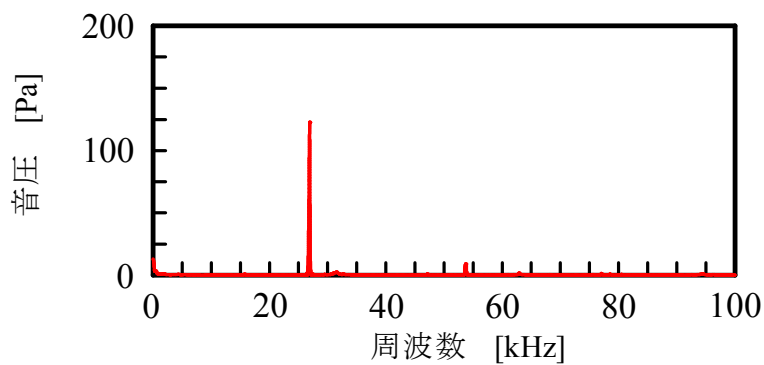
(b) 駆動周波数 26.8 kHz の音源



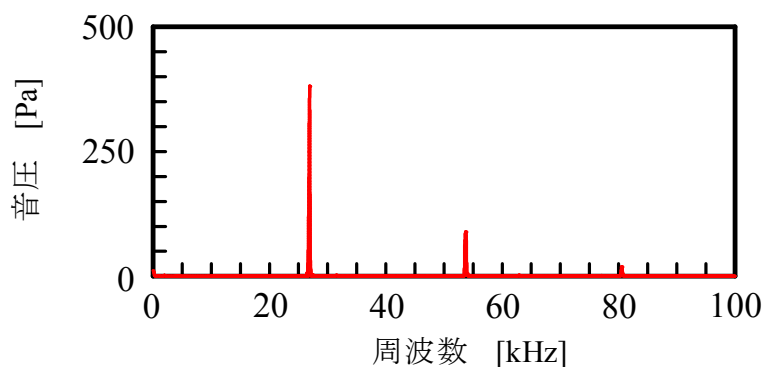
(c) 駆動周波数 50.8 kHz の音源

図 2-8 音波集束特性

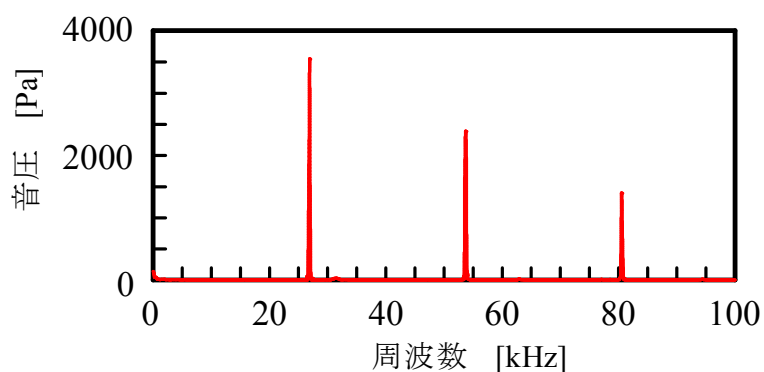
図 2-9 は、集束点における音波の音圧波形を FFT アナライザで周波数解析したパワースペクトルである。図(a)~(c)は、駆動周波数 26.8 kHz の音源の供給電力がそれぞれ 0.1 W、1 W、10 W の時の結果を示している。図より、供給電力の増加とともに基本周波数に加えてその整数倍の周波数の音波が発生しているのがわかる。



(a) 供給電力 0.1W



(b) 供給電力 1W

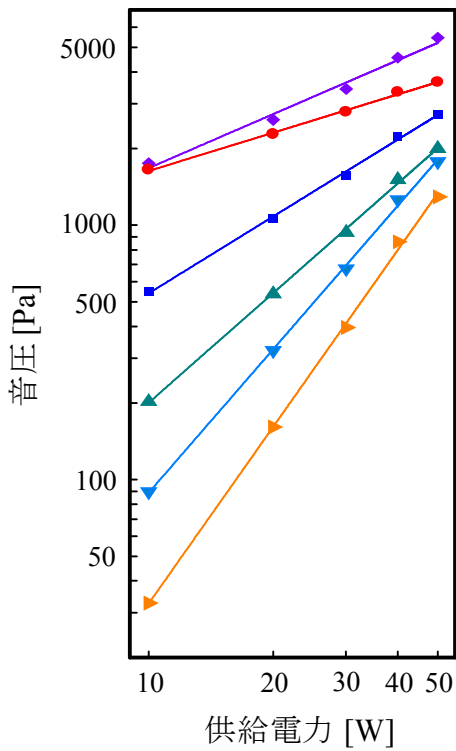


(c) 供給電力 10W

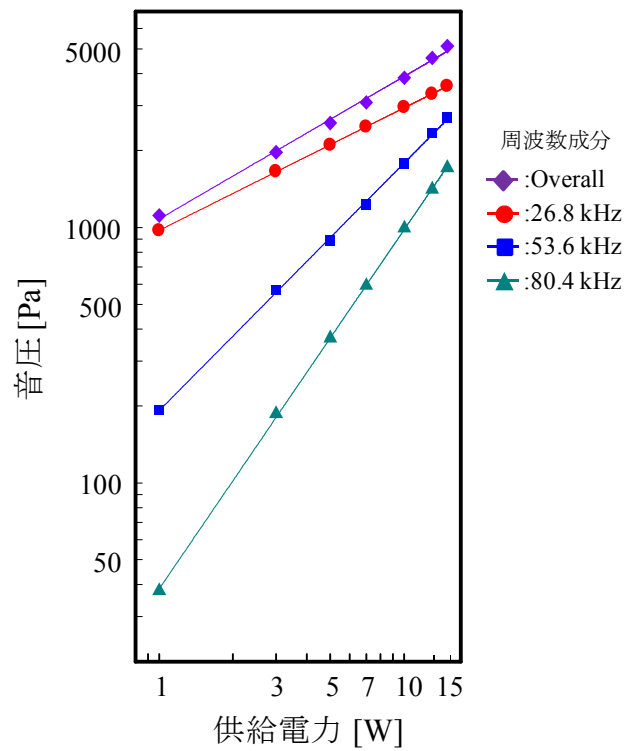
図 2-9 集束点における音圧の周波数解析結果



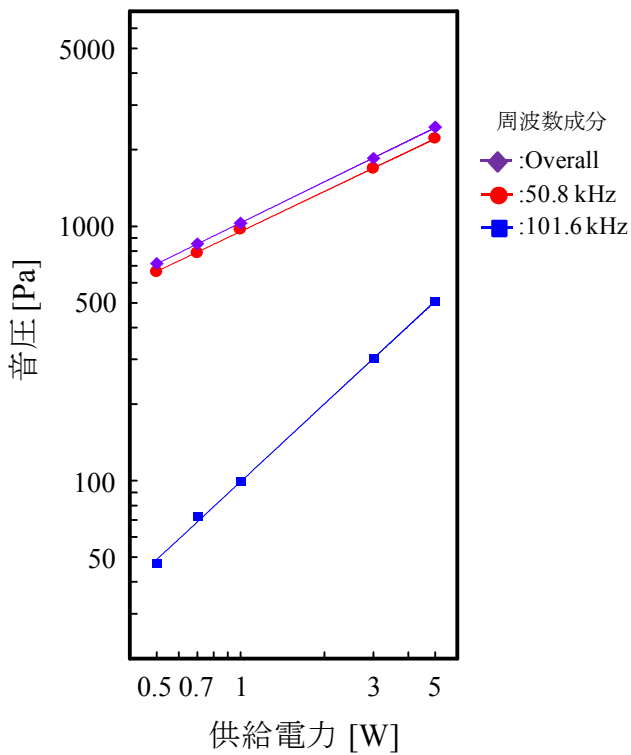
また、各音源の音波集束点における音波強度特性を図 2-10(a)~(c)に示す。



(a) 駆動周波数 19.6 kHz の音源



(b) 駆動周波数 26.8 kHz の音源



(c) 駆動周波数 50.8 kHz の音源

図 2-10 集束点における音波強度特性

図より、いずれの結果においても音圧が高くなるにつれて整数次の高調波成分が大きく現れている。駆動周波数 19.6 kHz の音源では約 50 W の電力が入力可能であり、最大で音圧 5800 Pa(約 169 dB)の極めて強力な音波を発生している。また、駆動周波数 26.8 kHz の音源では供給電力 15 W で音圧 5300 Pa (約 168 dB)、駆動周波数 50.8 kHz の音源では供給電力 5 W で音圧 2500 Pa(約 162 dB)の強力音波を得ている。なお、高調波成分は高次になるほど特性曲線の傾きが大きく、例えば駆動周波数 19.6 kHz の音源の音圧-供給電力特性における 1 次～5 次までの特性の傾きは、音源への供給電力に対してそれぞれ約 0.5 乗、1 乗、1.5 乗、2.0 乗、2.5 乗の関係になっている。このことは、音源への供給電力が大きいほど、すなわち音波の強度が増すほど高調波成分の割合が大きくなることを示している。

以上より明らかなように、駆動周波数 19.6 kHz の音源が音波集束点において最も高い音圧を得ている。これは、駆動周波数が低い音源の場合にはより大きな電力を音源に供給できること、また音波伝搬に伴う音波エネルギーの減衰が少ないことがあげられる。一方、本音源で採用している超音波振動系の場合、音源の構造上その寸法は駆動周波数と反比例の関係にあり、周波数が低い音源ほどその寸法は大きくなってしまふ。特に、19.6 kHz の音源の場合、寸法は 60 cm(縦)×35 cm(横)×30 cm(奥行き)になり、計測装置を構成した場合には現場での機動性と操作性に影響がでることが十分予想される。また、50.8 kHz 音源は寸法の点で問題はないが、発生音波の音圧は他の音源に比べて半分以下であり、実用上計測値の SN 比に懸念が残る。そこで、音源の寸法および照射音波強度ともに満足できる 26.8 kHz 音源を採用することとし、以降はこの音源を用いて各種の検討を行う。

## 2.3 まとめ

本章をまとめると以下ようになる。

- (1) 強力空中超音波を用いたコンクリートの火害の判定を非接触かつ非破壊で行う新たな手法を提案し、その計測原理を示した。
- (2) 強力空中超音波の特徴の一つである非線形音波の発生とその利用について提案し、強力音波を発生させる音源の構成について示した。
- (3) 駆動周波数 19.6 kHz、26.8 kHz および 50.8 kHz の縞モード振動板式点集束音源を作成し、その照射音波特性について比較検討した。その結果、照射音波強度および装置の機動性、操作性を考慮し、駆動周波数 26.8 kHz の音源が実用面から適当であることを示した。

## 第3章 非線形空中超音波による固体物の非接触励振と振動特性

本章では、点集束型空中超音波音源により発生した強力集束音波を、固体物に照射したときの振動特性について基礎検討を行っている。

### 3.1 実験装置の構成

強力空中超音波照射による固体物の非接触励振<sup>[46-48]</sup>のための実験装置を図 3-1 に示す。装置は、駆動周波数 26.8 kHz の縞モード振動板式点集束型超音波音源、固体物表面に発生した振動を光学式で計測するレーザドップラ振動計（小野測器製 LV-1720、振動速度：0.3  $\mu\text{m/s}$ ~10 m/s、周波数帯域：1 Hz~1.5 MHz、レーザスポット径：20  $\mu\text{m}$ ~400  $\mu\text{m}$ 、以後 LDV と記述する）、および LDV の出力信号を周波数解析する FFT アナライザ（小野測器製 CF-5220、周波数帯域：10 mHz~100 kHz）で構成している。

縞モード振動板から放射された音波は、放射方向変換器を経由し、図のように x 軸上の点 O に集束する。この音波集束点付近に、測定面が x 軸に垂直となるように試料を設置し、音波照射により非接触励振させる。また、試料表面に生じた点 O における振動を、音源の背後に配置した LDV で計測する。さらに、LDV 出力電圧信号を FFT アナライザで周波数解析し、振動速度の基本周波数および第 2 次、第 3 次高調波成分を求める。

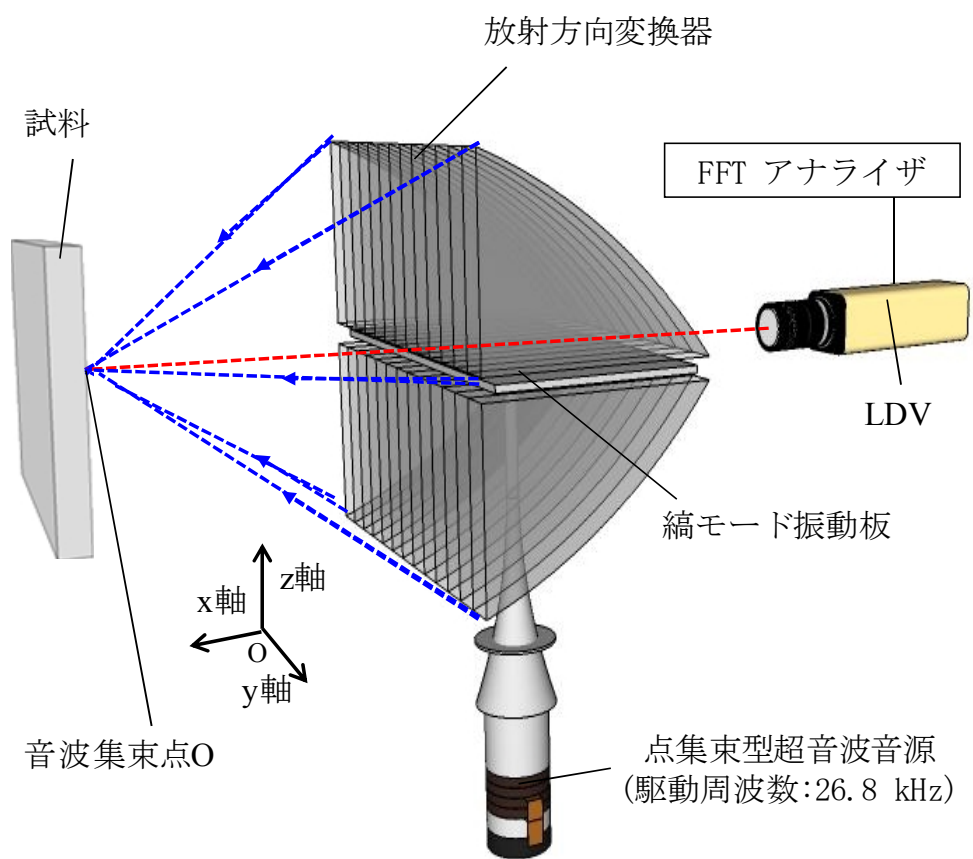


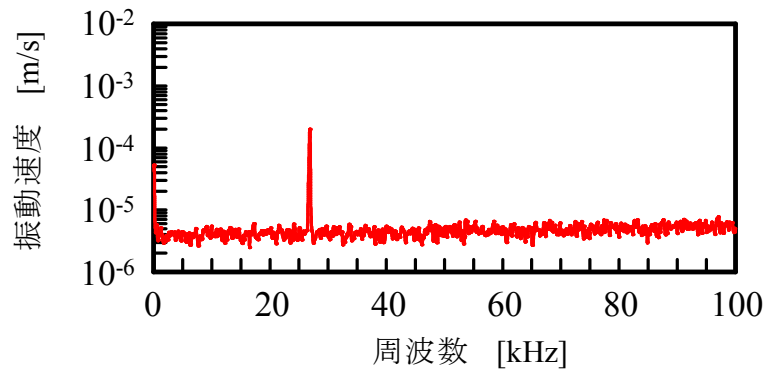
図 3-1 実験装置の概要

## 3.2 音波照射による非接触励振の検討

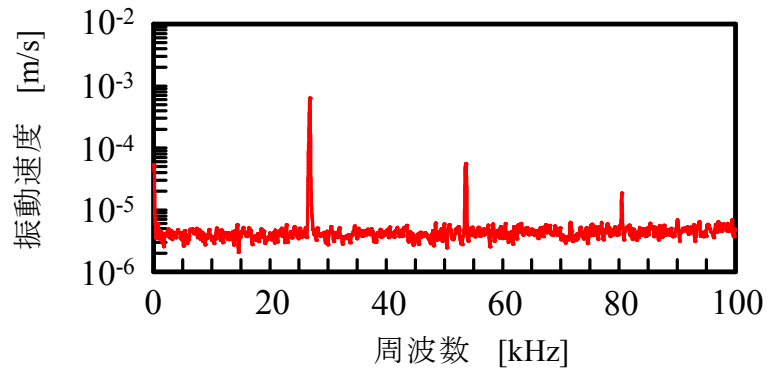
上記の強力空中超音波を使って、固体物の非接触励振を試みた。ここでは、試料として媒質の密度が一様で、ある程度の強度を持つアクリル材（三菱レーヨン製、密度： $1190 \text{ kg/m}^3$ 、ヤング率（ずれ弾性率）： $3 \text{ GPa}$ ）を用いた。寸法は  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  である。なお、アクリル材の表面にはレーザ光を反射させるための銀色塗料を塗布してある。

### 3.2.1 試料を音波集束点に置いた場合の検討

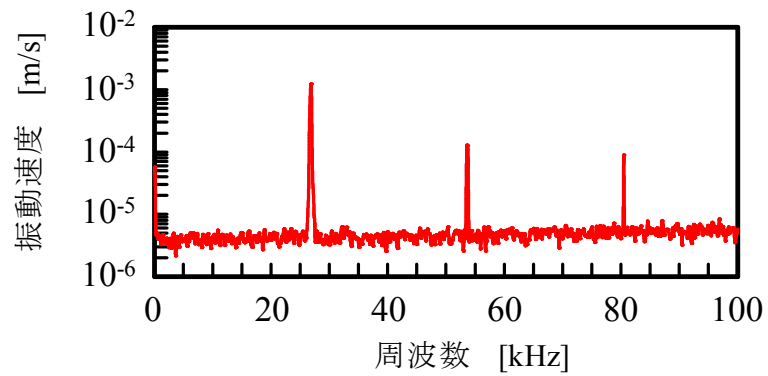
試料を音波集束点 O の位置に設置し、強力空中超音波を照射した時の試料表面点 O における振動特性を測定した。図 3-2 に、計測した振動速度を FFT アナライザで解析した結果を示す。図(a)～(c)は、音源の供給電力がそれぞれ  $0.1 \text{ W}$ 、 $1 \text{ W}$ 、 $10 \text{ W}$  の時の結果を示している。図より、供給電力の増加とともに照射音波と同じ基本周波数および整数倍の高調波周波数の振動が発生しているのがわかる。図(c)のように音源への供給電力が十分大きく、音波が強力である場合には、第 3 次高調波においても十分な SN 比が確保できている。



(a) 供給電力 0.1 W



(b) 供給電力 1 W



(c) 供給電力 10 W

図 3-2 振動速度の周波数解析結果

図 3-3 は供給電力に対する振動速度の特性であり、横軸に供給電力、縦軸に振動速度を取っている。結果より、各周波数における振動速度特性の傾きは、図 2-9(b)に示す音圧特性とほぼ同じになっている。図 3-4 は、上記の結果を照射音波音圧と振動速度の関係でまとめたものである。図より、いずれの周波数成分においても照射音圧と振動速度は 1 乗に比例した関係になっている。

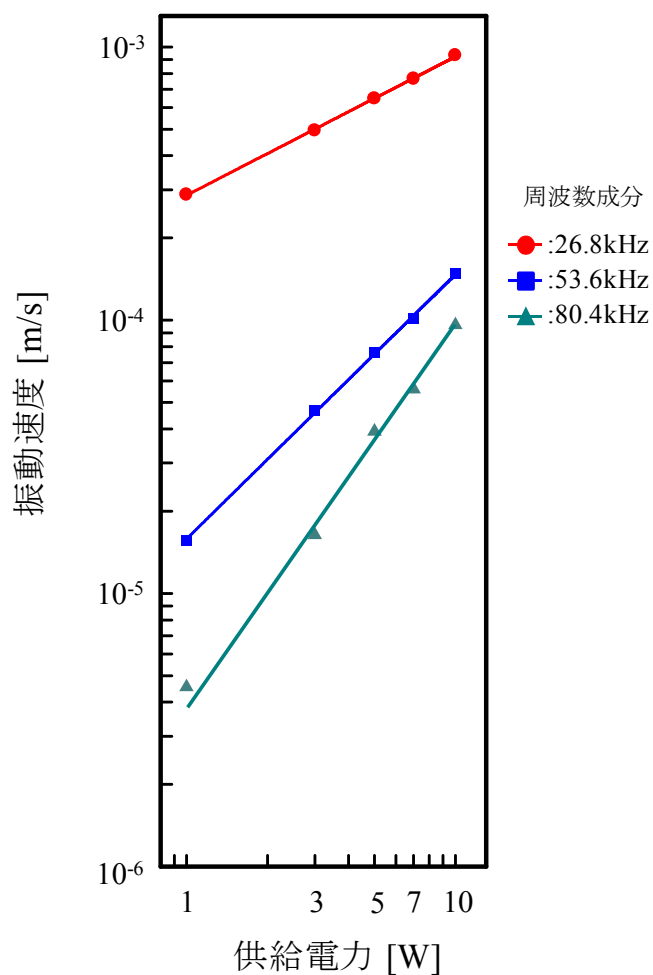


図 3-3 試料の振動特性



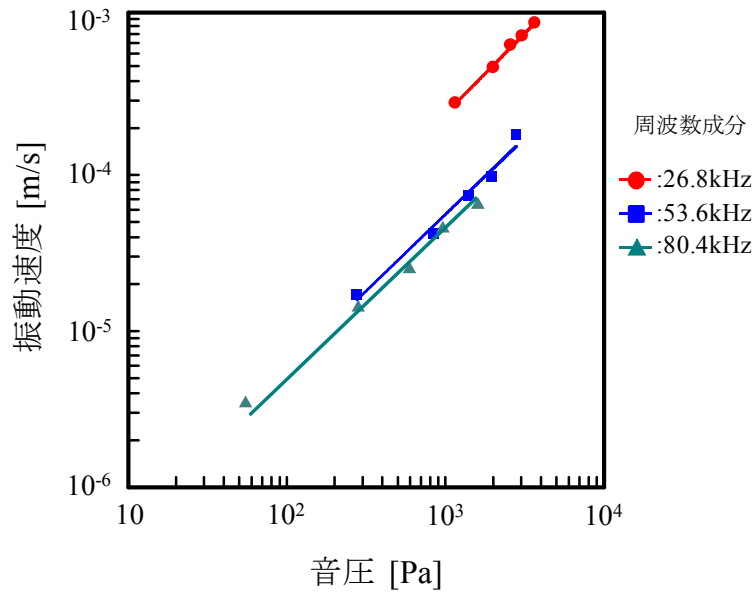


図 3-4 照射音波音圧-振動速度特性

以上より、強力空中超音波の照射によって固体物を非接触で励振することが可能であり、しかも非線形音波による基本周波数および高調波成分の振動が同時に発生し、その特性は照射音波の音圧特性にはほぼ対応していることを確認した。また、照射音波音圧と振動速度は1乗に比例する関係にあることがわかった。

### 3.2.2 試料の位置を変化させた場合の検討

ここでは、試料の設置位置を音源に対して変化させた場合の、試料表面の振動特性について検討している。測定は、図 3-5 に示すように音波集束点  $O$  を中心に試料を  $x$  軸に沿って  $\pm 10$  mm の範囲で移動させて行った。また、試料表面の音圧を直径 1 mm のプローブマイクロホンを用いて同時に測定した。計測は、音源への供給電力 10 W 一定で行った。

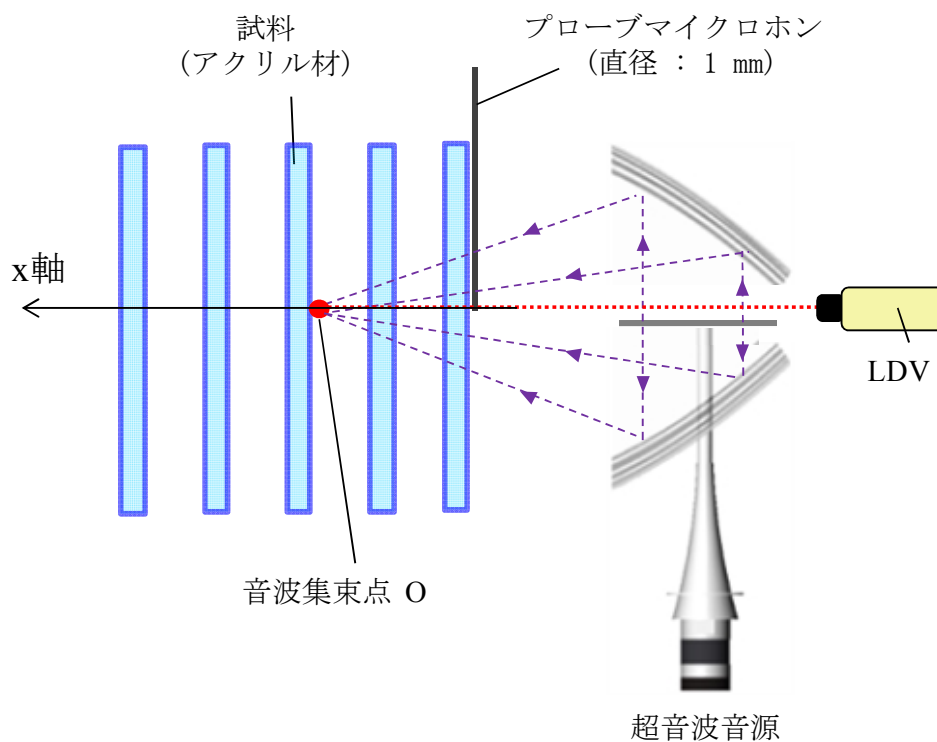


図 3-5 試料表面の音圧と振動速度の測定概略図

図 3-6 は測定結果であり、横軸に音源から試料表面までの距離、縦軸に試料表面の振動速度および音圧を示している。図より、まず試料表面の音圧は設置位置に対してその大きさが僅かに周期的に変化している。これは試料と振動板の間の空間に生じる音響共振によるものである。また、振動速度も音圧の極大・極小に対応して周期的に変化している。しかし、そ

の大きさは必ずしも音圧の大きさとは対応していない。これは、計測用レーザ光が強力音場から何らかの影響を受けたことが原因と考えられる。

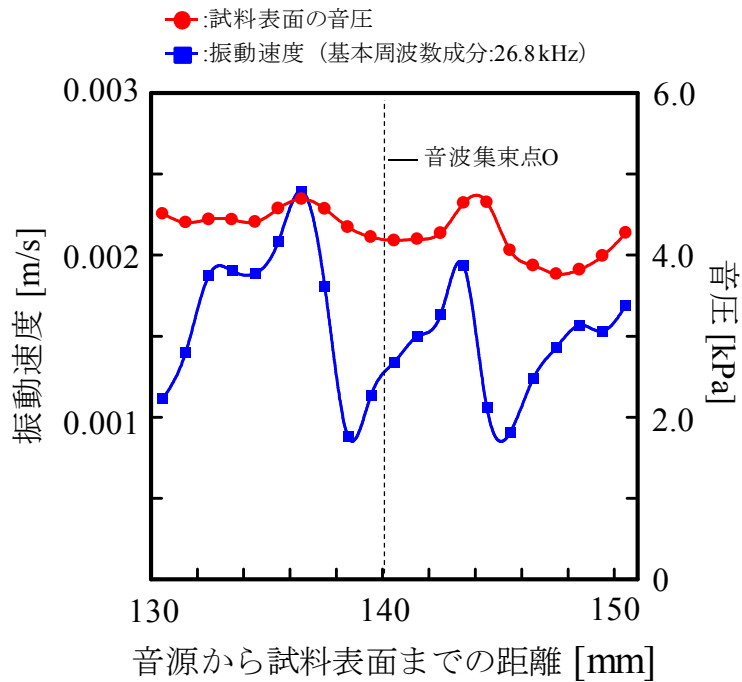


図 3-6 試料表面の音圧と振動速度

そこで、この確認を行うための実験を行った。図 3-7 は実験装置の概略である。なお、この実験では図中のアクリルパイプを設置していない。実験は、厚さ 1.5 mm のアクリル板を図のように強力空中超音波で励振し、音波照射面とその反対側のアクリル板裏面の振動を 2 台の LDV を用いて同時に測定する。また、併せてプローブマイクロホンで試料表面の音圧を測定する。実験ではより詳細な検討を行うために、アクリル板の設置位置を音波集束点 O を中心に広い範囲で変化させた。

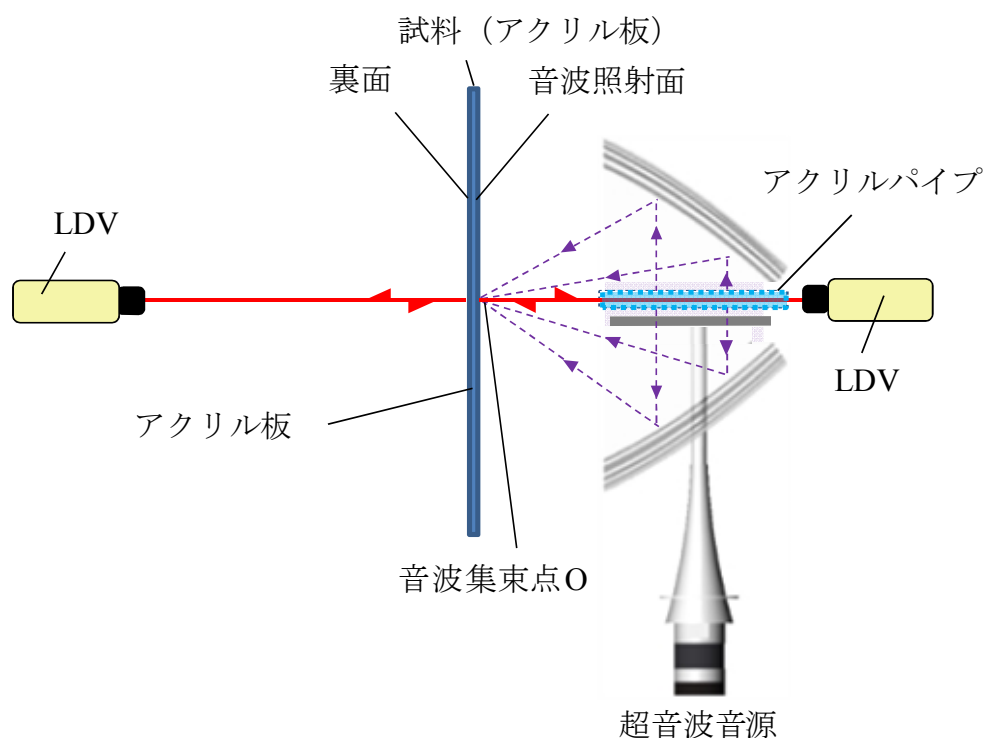


図 3-7 薄板試料の表裏における振動速度の測定概略図

結果を図 3-8 に示す。図より、音波の影響のない試料裏面の振動は、試料表面(音波照射面)の音圧にほぼ対応して変化しているのがわかる。これに対し、音波照射面の振動速度は周期的に大きく変化し、しかも音圧の変化に対応していない。これは、計測用レーザー光が強力音場を通過中に音場から影響を受けているためである。LDV を用いて音場を計測する研究グループの報告<sup>[49-51]</sup>によると、LDV のレーザー光は音場の音圧が高いほど屈折率変調を強く受け、計測値に影響を与えているとしている。レーザー光が通過する音場がすべて同位相である場合には、その通過領域の音場の音圧は積算した値として計測される。一方、位相が周期的に変化する音場を通過した場合には、LDV の計測値は音場の影響をほとんど受けない。こ

のことより、本装置の構造上レーザ光が音場より最も影響を受けるのは、縞モード振動板の直上の範囲<sup>[52,53]</sup>である。

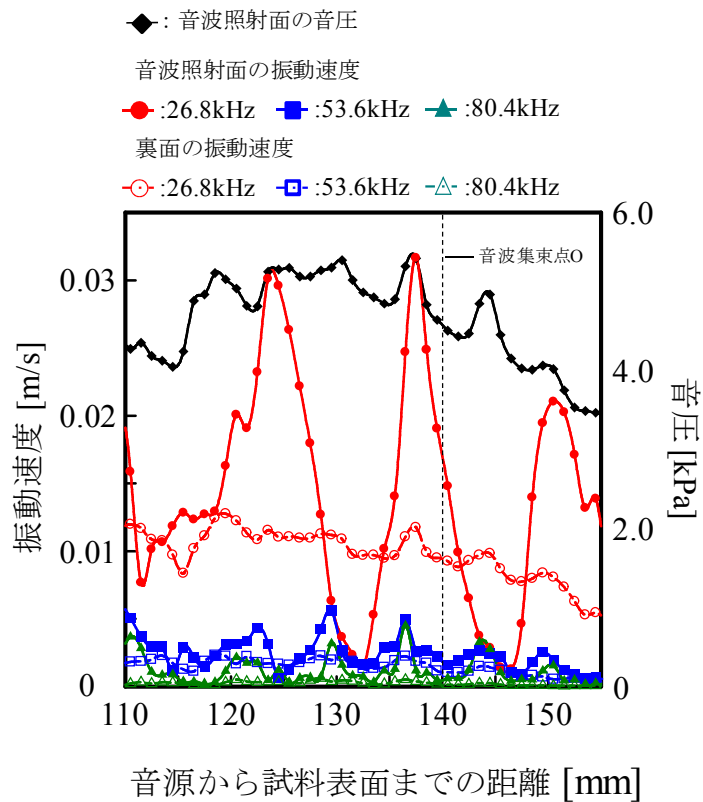


図 3-8 試料表裏の振動速度と音圧

そこで、この部分にレーザ光を音場から保護するためのアクリルパイプ（直径 13 mm、長さ 170 mm、厚さ 2 mm）を図 3-7 のように設置し、上記と同様の計測を行った。測定結果を図 3-9 に示す。結果より、試料の音波放射面と裏面の振動速度特性は同傾向の分布となり、音圧ともほぼ対応しており、高次の周波数の振動速度特性も同様の結果を示している。

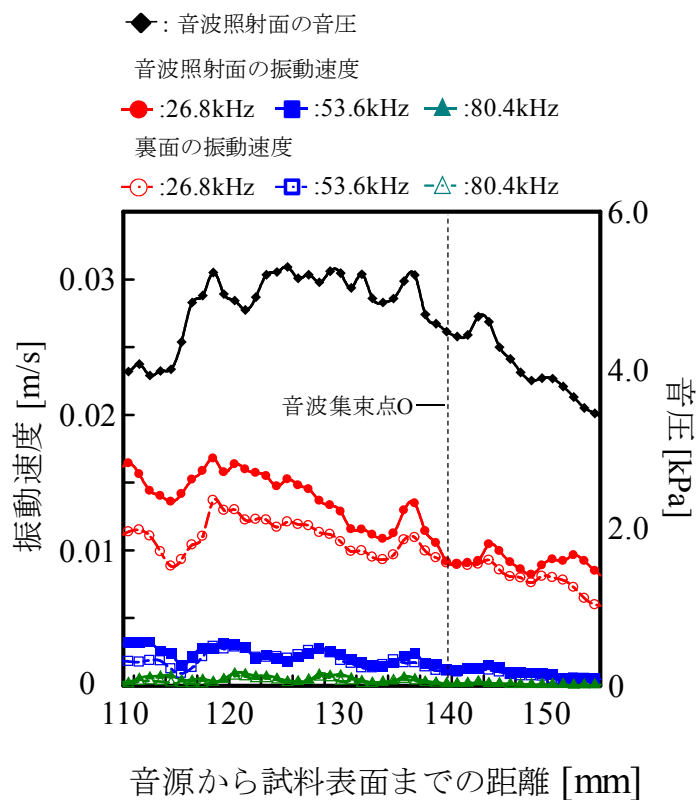


図 3-9 改良した装置を用いた試料表裏の振動速度と音圧

以上のことより、計測用レーザー光を上記の方法により音場から保護することで、音波照射した試料面の振動を音場の影響を受けることなく計測できることがわかった。

### 3.3 まとめ

本章をまとめると以下のようなになる。

- (1) 駆動周波数 26.8 kHz の点集束型音源により発生した強力空中集束音波を固体試料(アクリル材)に照射することにより、試料表面には非線形超音波の周波数に対応した振動が発生することを明らかにした。また、その振動速度は照射音波の音圧に対応していた。
- (2) 試料と音源の距離関係を変化させると、両者の間に形成される音響共振により、試料表面の音圧が周期的にわずかに変化した。しかし、試料表面の振動速度の測定結果は音圧特性とは対応しておらず、LDV の計測用レーザ光が音場から影響を受けていることを明らかにした。
- (3) 計測用レーザが音場の影響を強く受けている箇所を明らかにし、その対策（アクリルパイプの設置）を行ったところ、照射音波の音圧に対応した振動速度を計測できることを明らかにした。

## 第4章 コンクリートの火害計測の実験

本章では、強力空中超音波と LDV を用いた計測手法を、火災現場を想定したコンクリート試料に適用し、火害計測のための基礎的検討<sup>[54-58]</sup>を行った。

### 4.1 模擬試料の作成

建築物に使用されるコンクリート材はその用途により様々であるが、一般的には圧縮強度 15 MPa～150 MPa とされている。本研究では入手が容易な市販のコンクリート平板 (250 mm×250 mm×50 mm) を使用することにした。このコンクリートは、一般的な材料である普通ポルトランドセメントと骨材で構成されているものであり、圧縮強度試験機による JISA1108-2006(圧縮強度試験方法)、JISA1149-2001(静弾性係数試験方法)<sup>[59]</sup>に則った単調増加載荷試験で圧縮強度とヤング率を計測したところ、圧縮強度は約 23 MPa、ヤング率は約 23 GPa であった。このコンクリート平板を 6 分割し、寸法 120 mm×80 mm、厚さ 50 mm のコンクリートブロックを試料として用いた。さらに、試料を電気炉(ISUZU 製 EPTR-13K)により高温度で加熱し、これを火災熱の影響を受けた模擬試料とした。

図 4-1 に模擬試料の外観を示す。



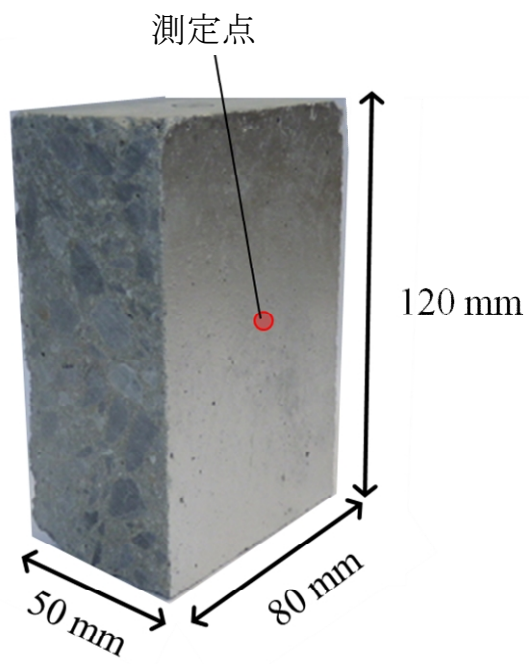


図 4-1 模擬試料の外観

コンクリート火害の程度を調べるために用いる加熱温度特性については、JISA1304-2011の建築構造部分の耐火試験方法を参考に、二種類の加熱方法を用いることにした。一つは、まず炉内を一定の高温度（例えば 800 °C）にしておき、コンクリートブロックを投入してから 35 分間加熱し、電気炉から取り出した後そのまま放置し、常温になるまで自然冷却する方法である。もう一つは、同様に加熱し電気炉から取り出した後、すぐに水中に 5 分間入れて常温近くまで急冷する方法である。この方法は、火災消火時の放水によるコンクリート表面の急速な温度低下を再現している。

一般的に、コンクリートを加熱後自然冷却した場合、内部に熱が十分に残っているため、そのまま劣化が進み続ける。一方、加熱後水で急速冷却した場合には、コンクリートの内部温度が急激に下がることで劣化はそれ以上進まない。しかも、コンクリートが水中で再養生されることになるので、その細孔構造が火害を受ける前の状態に戻ろうとし、強度等も回復<sup>[60-62]</sup>することが予想される。したがって、火災後の消火活動を考えると、水冷を用いた方が自然冷却よりも火災現場に則した試料であると考えられる。

図 4-2 および図 4-3 に、加熱時のコンクリート表面の温度履歴を示す。表面温度はコンクリートブロック表面にセラミック接着剤で取り付けた K 型熱電対プローブ(秋月電子製、P-00306、材質：クロメル-アルメル、測定可能温度：-200 °C~1250 °C)により測定した。なお、電気炉で加熱する際、コンクリートブロックは一面（表面）のみを残して他の面は耐熱材を施し、熱の影響を出来るだけ防ぐようにした。

図 4-2 は自然冷却の場合であり、電気炉から取り出した後の試料は、温度がゆっくり低下しているのが分かる。また、急速冷却の試料については、図 4-3 に示すように火災現場を模した 3 つの温度履歴をもつ試料を作成した。これらはいずれも最高到達温度を 600 °C 付近にしているが、最高温度に到達するまでの温度履歴特性に違いを持たせている。火災にあった建物のコンクリート壁は、場所によって温度履歴が大きく異なるためである。作製した模擬試料は、加熱していない試料を CS0(基準となる試料)とし、自然冷却した試料を CS1、急速冷却した試料を図のように各々 CS2、CS3、CS4 とした。なお、試料 CS4 の圧縮強度を実測したところ約 13 MPa となり、試料 CS0 に比べて約 60 % に低下していた。また、ヤング率は約 2 GPa であり、試料 CS0 に比べて約 10 % 以下まで減少していることがわかった。これは、同じ強さの音波を試料に照射して励振させた場合、加熱した試料はヤング率の低下により、熱の影響を受けていない試料よりも大きな振動が発生する可能性があることを示している。

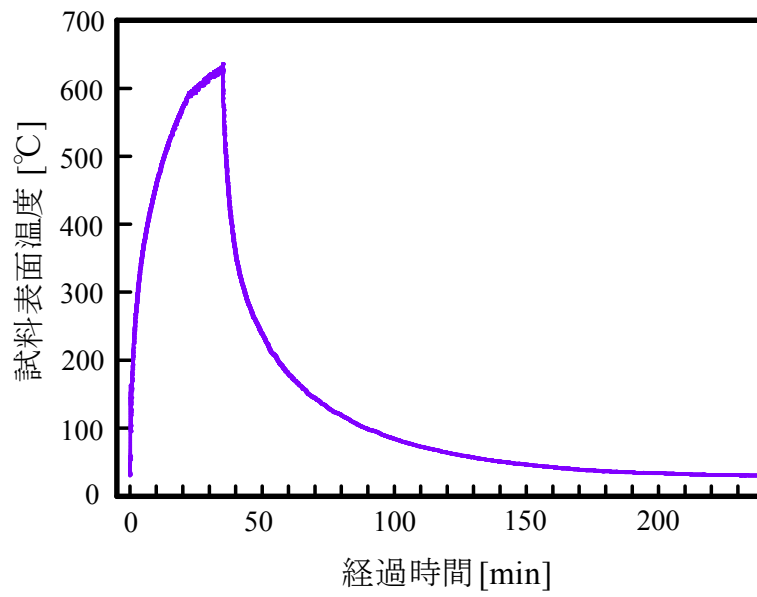


図 4-2 自然冷却の場合の加熱曲線

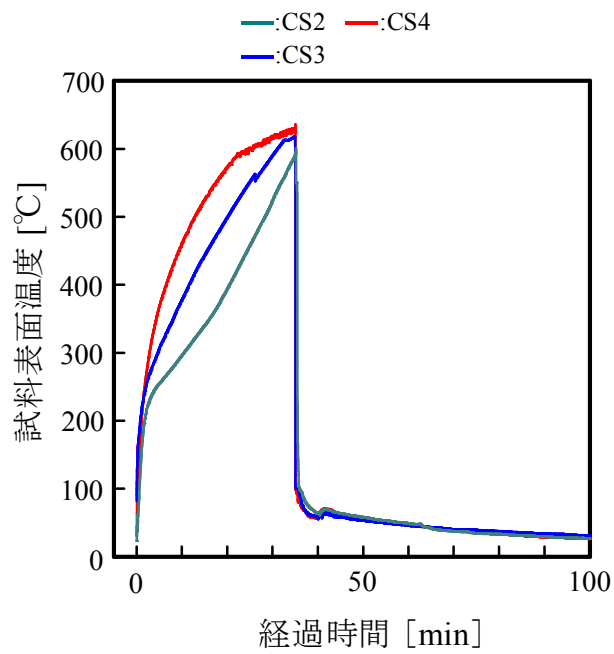


図 4-3 急速冷却の場合の加熱曲線

## 4.2 模擬試料の振動特性

図 4-4 に示す装置を用いて、強力空中超音波を照射した時の各試料の振動特性を測定した。

なお、試料は各加熱条件ごとに3つずつ作成し、測定は試料の中心付近の5点で行い、測定値は各点の平均値とした。また、試料加熱から3時間後に計測を実施した。

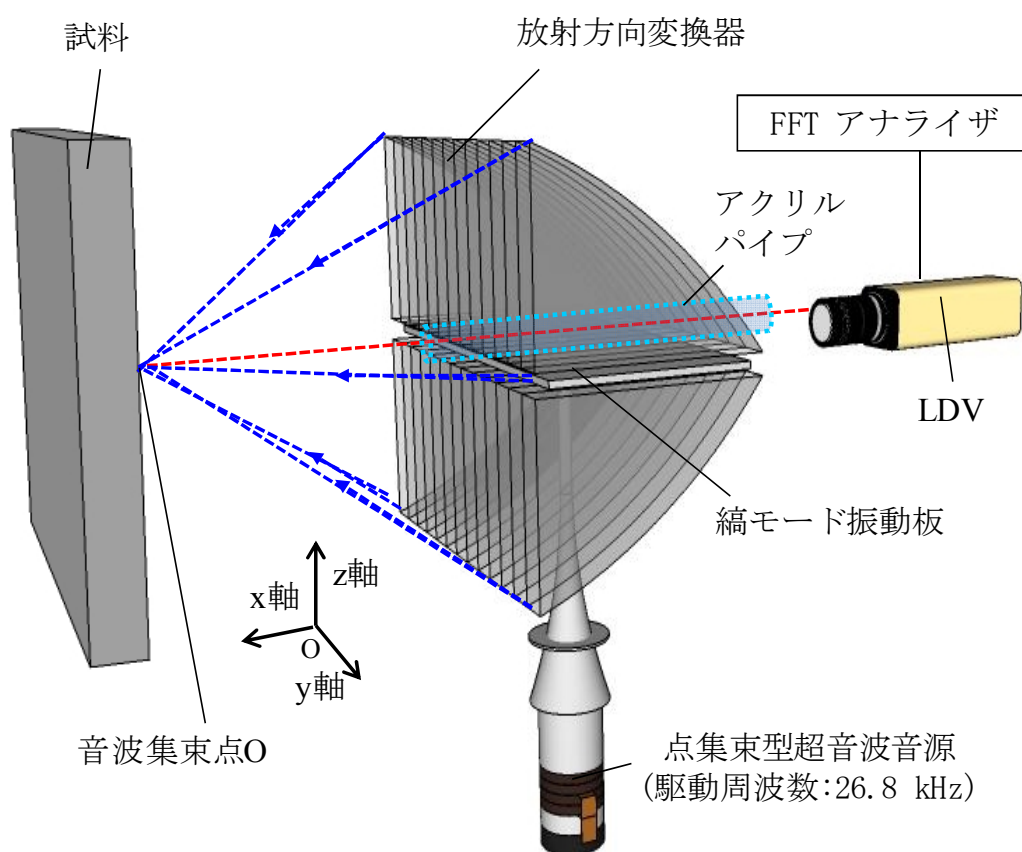


図 4-4 改良を施した実験装置

図 4-5 はその結果であり、基本周波数(26.8 kHz)、2 次高調波(53.6 kHz)、および 3 次高調波(80.4 kHz)の振動特性を示す。図より、各試料ともに音源への供給電力が増加するにつれて各周波数成分の振動速度が増加している。また、高調波成分の次数が高くなるにつれて、供給電力に対する振動速度の傾きが大きくなっている。さらに、供給電力一定(照射音波の強度が一定)の場合で比較すると、5 つの試料の振動速度に大きな違いが見られる。まず、自然冷却した試料 CS1 の振動速度が最も大きくなっている。これは、自然冷却の場合、電気炉から取り出した後もコンクリート内部に熱が残っており、これによりコンクリートの劣化が進行し続けたためと考えられる。

一方、放水を再現した急速冷却の試料 CS2~CS4 の場合、自然冷却の試料ほど大きな振動速度は得られていないものの、標準試料 CS0 に比べて明らかに大きな振動速度になっており、火害の影響を計測することが十分可能であることがわかる。また、より高温で長い時間加熱した試料ほど大きな振動速度を示しており、火害の程度を振動速度特性により計測できる可能性がある。

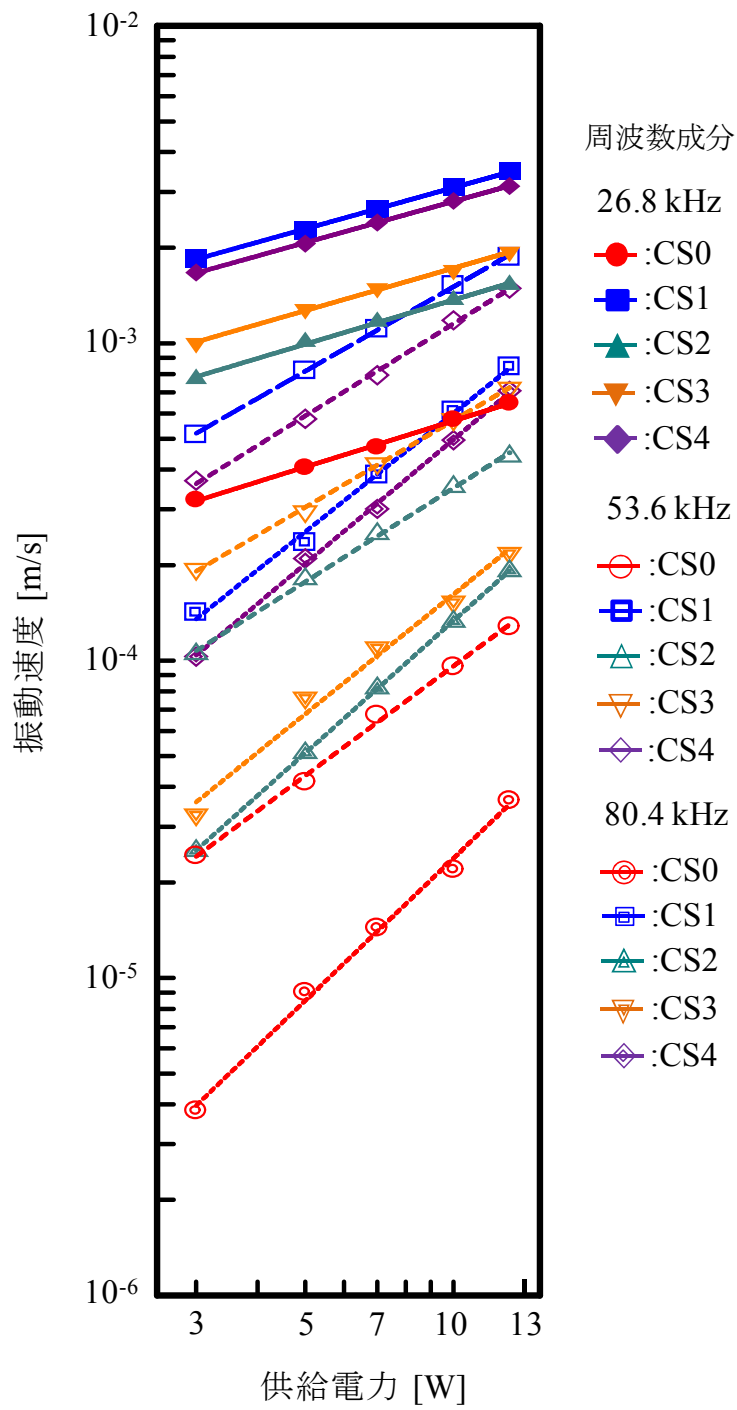


図 4-5 各種試料の振動特性

### 4.3 ひずみ率特性による検討

前述の結果から明らかなように、高温度に曝されたコンクリート試料の振動特性は、2次および3次の高調波においてその特徴がよく現れている。そこで、評価方法の一つとして、振動の基本周波数成分に対する高調波成分の割合をひずみ率の定義に従ってまとめ直してみた。なお、ひずみ率  $D$  は以下の式より算出した。

$$D = \frac{\sqrt{E_2^2 + E_3^2}}{E_1} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

ただし、 $E_1$  は振動速度の基本周波数成分、 $E_2$  は振動速度の第2次高調波成分、 $E_3$  は振動速度の第3次高調波成分である。

図4-6に結果を示す。図より、ひずみ率はいずれの試料についても音源への供給電力が増すほど、すなわち照射する音波の強度が増すほど増加している。また、増加の割合は高温度に曝された時間が長い試料ほど大きくなっているのがわかる。同じ照射音波強度(供給電力一定)で比較すると、ひずみ率の差は歴然である。例えば供給電力10Wでは、標準試料CS0と比較して各加熱試料のひずみ率は、CS2で1.6倍、CS3で1.9倍、CS4では2.6倍もの値を示しており、それぞれの試料を明確に判別できることがわかる。

また、図4-7は図4-6の結果を試料の表面温度との関係で表し直したものである。パラメータは音源への供給電力である。なお、試料の表面温度は時間とともに変化するので、ここでは図4-2および図4-3の試料表面温度特性を基に、加熱時間35分のうちの約半分の時間、試料表面がある温度以上にある場合、これを代表温度として横軸にとってある。すなわち、試料CS2は加熱時間の約半分の時間400℃以上であったので、400℃の位置にその結果を



プロットしている。同様に試料 CS3 では 500 °C、試料 CS4 は 600 °C の位置にそれぞれ結果を示した。図より、表面温度が高くなるにつれて、ひずみ率が増加しており、特に 500 °C 付近から急激に増加している。一般に、コンクリートが組成変化し始めるのは 500 °C 以上であると言われていていることを考えると、本試料の圧縮強度やヤング率がこの付近の温度で急激に低下したと考えられ、これが振動速度特性を変化させたと考えるのが妥当である。

以上の結果より、本計測手法によりコンクリート火害の計測がある程度可能であることがわかる。

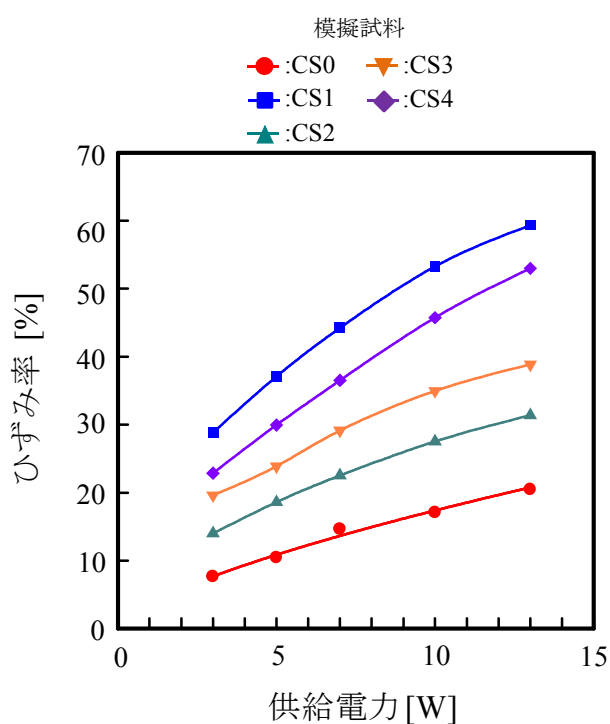


図 4-6 各種試料のひずみ率特性

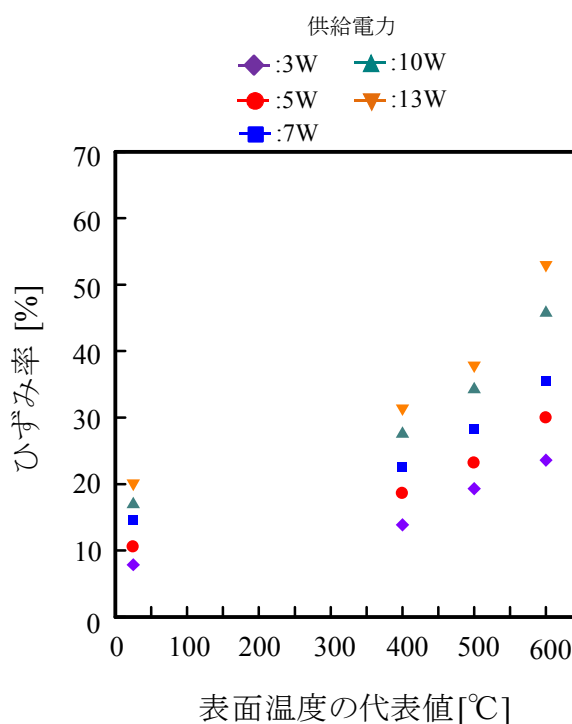


図 4-7 試料表面温度-ひずみ率特性

#### 4.4 まとめ

本章をまとめると以下のようなになる。

- (1) 提案する手法により計測した高温加熱のコンクリートの振動特性は、自然冷却を筆頭に、急速冷却、加熱なしの順に振動速度の値に、明確な差異が見られた。
- (2) 計測により得られた振動特性は、特に高調波成分において顕著な変化が見られた。そこで、評価方法の一つとして、振動速度の基本周波数成分と高調波成分の割合を表わすひずみ率を用いた評価を行ったところ、コンクリート表面温度との関係で明確な差異があることを示した。
- (3) コンクリート表面の温度履歴を変えた試料の場合も、振動特性に違いが認められたことから、同一のコンクリートであれば表面の火害状況を本手法により計測できる可能性があることを明らかにした。

## 第5章 火害計測システムの構築

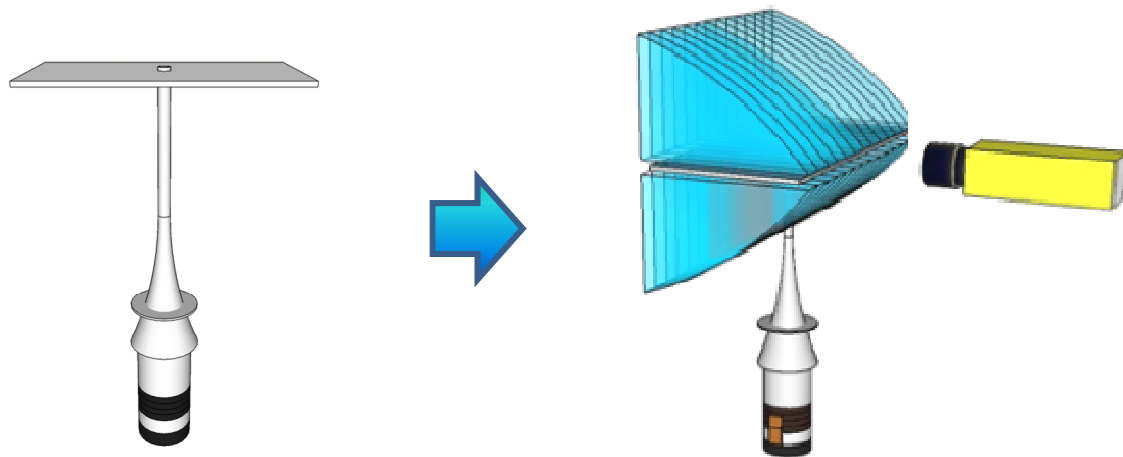
劣悪な環境下の火災現場において、本研究の計測手法を用いて高温度の熱に曝されたコンクリート壁の火害計測を行う際には、ハンドリングがよく機動性に優れた計測装置であることが要求される。そこで、本章では音源の改良をも含めた計測機材のコンパクト化、および現場での計測の簡単化、効率化を目指したシステム開発を行い、火災現場で実用可能となる計測システムの構築について述べる。

### 5.1 開発した計測システムの概要

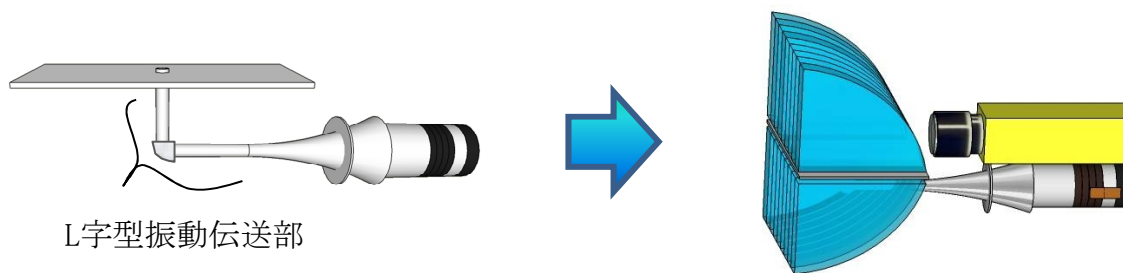
#### 5.1.1 音源の改良

火災現場における計測機材は、出来るだけコンパクトであることが望ましい。そこで、超音波音源と LDV のレーザーヘッドを一体化させたときのコンパクト化について検討した。図 5-1 に概略を示す。図(a)は従来の超音波音源とレーザーヘッドを組み合わせた装置の概略図である。図より、従来音源の場合、縦に長い構造の音源と横長のレーザーヘッドの組み合わせにより、縦方向の寸法が約 470 mm、横方向は約 550 mm とかなり大きく、これを一体化した場合には現場での機動性と操作性が著しく悪くなる。

そこで、図(b)のように超音波音源の振動伝送系に L 字型振動方向変換機構<sup>[63-64]</sup>を導入し、縦振動エネルギーの伝送方向を直角方向に変換する音源を開発した。これにより、図のように音源とレーザーヘッドの構成がコンパクトになり、縦方向の寸法が 270 mm までコンパクト化することができ、かなりの機動性が確保できたと考えている。



(a) 従来音源とレーザヘッド



L字型振動伝送部

(b) L字型振動方向変換機構を取り付けた音源とレーザヘッド

図 5-1 超音波音源とレーザヘッドの一体化の概略

図 5-2 および図 5-3 に改良した音源の照射音波特性を示す。図 5-2 より、音波集束特性は図 2-8(b)に示す従来音源の特性と比べてほぼ同様である。また、図 5-3 に示す集束点における音圧特性も、図中の破線で示す従来音源と比べて若干音圧が下がるものの、ほとんど遜色ないことがわかる。

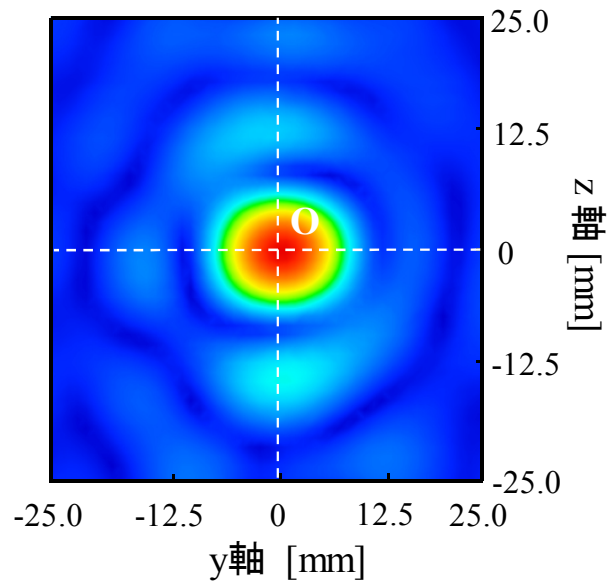


図 5-2 音波集束特性

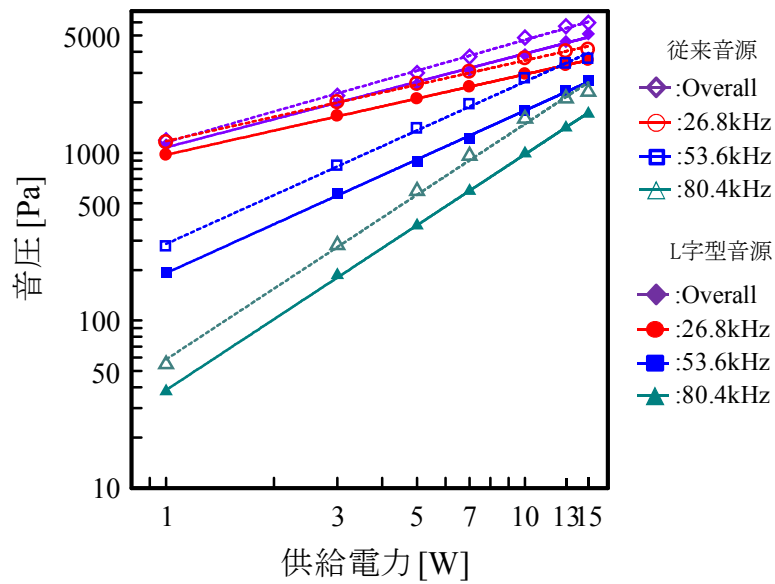


図 5-3 集束点における音波強度特性

### 5.1.2 計測システムの構成

図 5-4 は構築した本計測装置のシステム構成図である。また、図 5-5 は現場対応用に開発した計測装置の概要図である。本計測システムは、L 字型点集束音源(駆動周波数 26.8 kHz)と計測用レーザヘッドを一体化したセンサヘッド、データ収集用のデータロガー、音源駆動用コントローラ、LDV コントローラおよび音源と LDV の制御並びに計測データの処理と結果の表示を行うパーソナルコンピュータで構成される。

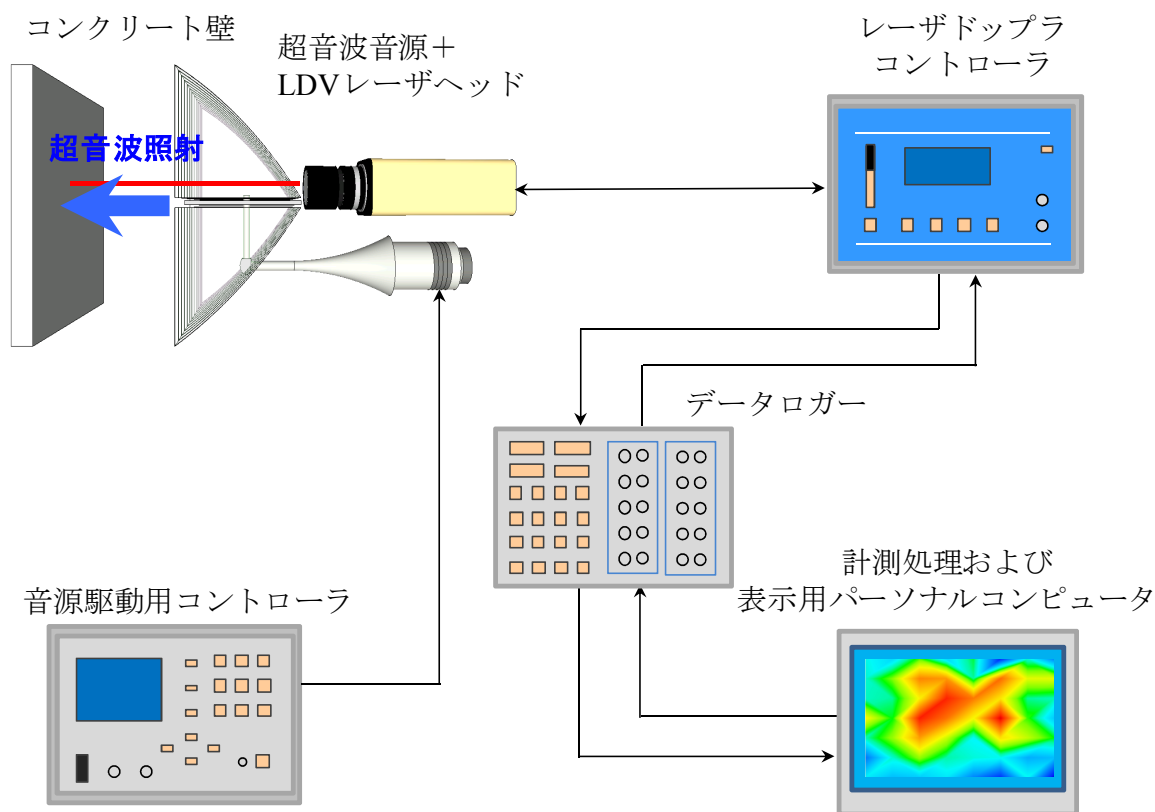


図 5-4 計測装置のシステム概要図

この計測装置で最も重要なのは、強力超音波の発生である。火災現場においては、起動スイッチ一つで常に所定の強度の音波を照射する必要がある。ここで用いる超音波音源は単一共振系であり、機械的 Q 値は 700 以上と極めて鋭い共振特性を有している。

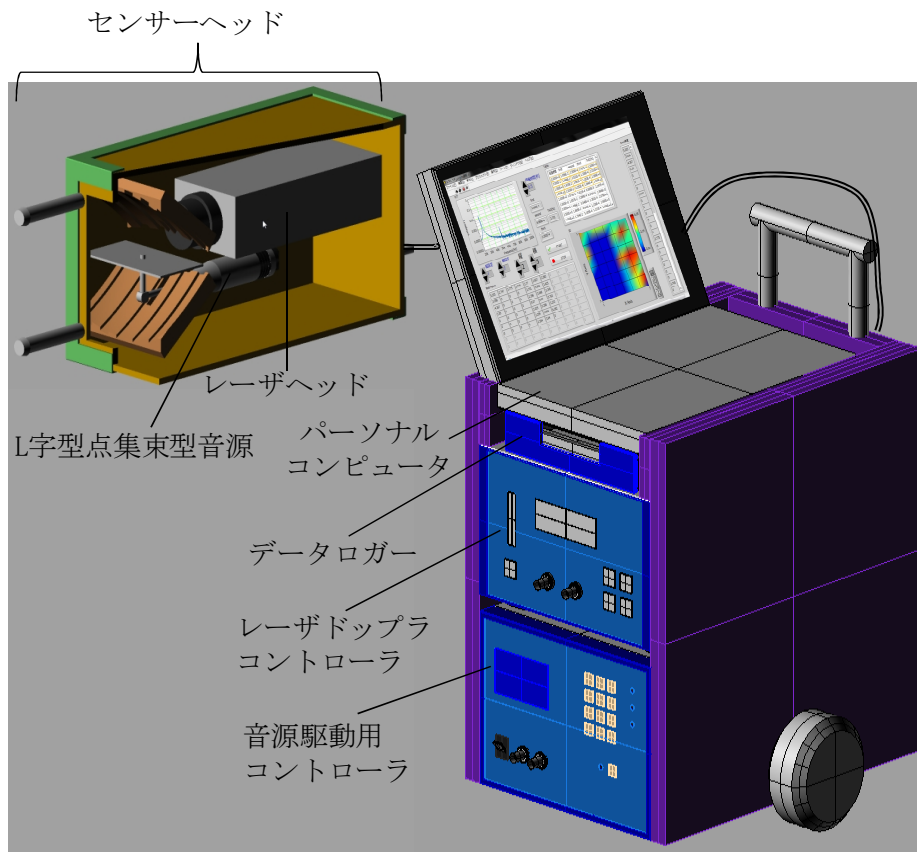


図 5-5 現場用に開発した計測装置の概略図

図 5-6 に、使用する音源の動アドミタンス特性を示す。図は、横軸にコンダクタンス、縦軸にサセプタンスをとっており、 $f_0$  は縞モード共振周波数である。また、縞モード振動時の音源の  $Q$  値は、 $f_0$ 、 $f_1$  及び  $f_2$  より算出したところ 770 であった。この種の音源は雰囲気温度に強く影響を受けるため、火災現場においては音源の周波数が大きく変化することが考えられる。従って、音源を常に共振状態で駆動するためには、自動追尾機構を持つ高周波電源を必要とする。しかし、使用音源は  $Q$  値が高く、しかも図に示すように縞モード共振周波数のすぐ近くに他の振動モードの共振があるため、従来のアナログ方式では自動追尾が不可能であった。そこで、新たに専用の音源駆動用コントローラをメーカーと共同開発した。この高

周波電源は音源の共振周波数をデジタル方式で 0.1 Hz ステップで追尾することが可能であり、外乱の影響を受けることなく、常に一定出力の駆動を行うことができる。

計測の手順は次の通りである。まず測定対象となる壁面に対して集束音波を照射し、同時にその点での壁面の振動速度を LDV で計測する。計測した信号は、データロガーを介してパーソナルコンピュータに入力される。この信号をパーソナルコンピュータ内で周波数解析し、基本周波数および高調波成分よりひずみ率を算出する。この結果は、測定点に対応したマトリクス上に表示される。なお、不具合のデータ箇所のみを再度計測し、その結果を上書き出来るようになっている。さらに、コンクリート壁の各点で得られたデータはマッピング処理され、図 5-5 に示すようにパーソナルコンピュータ画面上に画像化される。これにより、一目でコンクリート壁の火害状況を判断することができる。

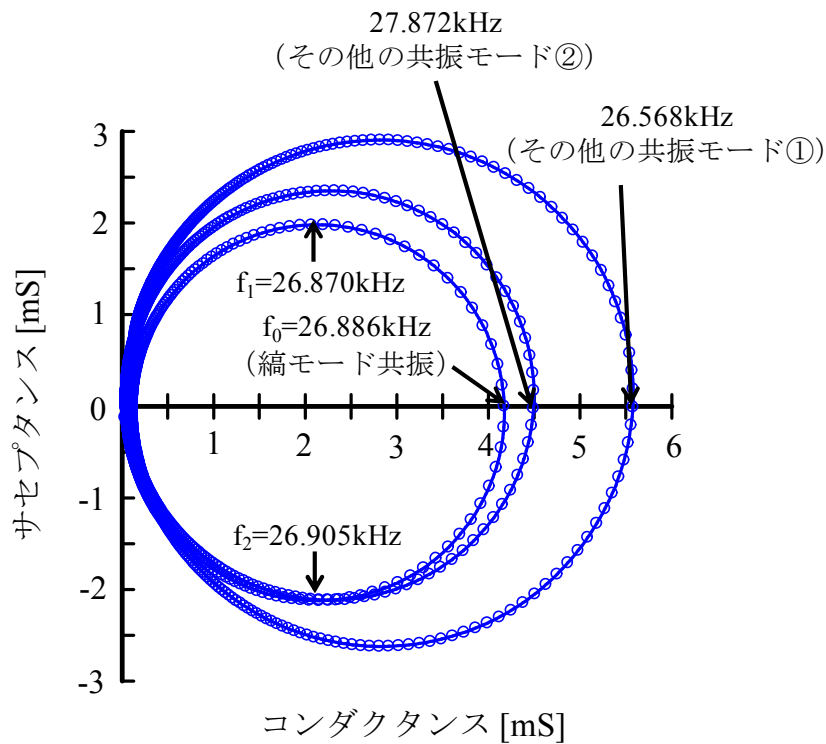


図 5-6 使用音源の動アドミタンス特性



## 5.2 計測プログラムの構築と動作確認

火災現場の調査では、計測した結果を直ちに知る必要がある。しかも、マニュアルに従って計測装置を操作するだけで所望のデータが取得できなければならない。また、その結果が画像情報として提供されれば、より調査を容易に行うことができる。そこで、これを実現するための計測プログラムを開発した。プログラムの作成には、グラフィックプログラミング言語の一つである Labview (ナショナルインスツルメンツ製) を使用し、構築した。

図 5-7 に、パーソナルコンピュータに表示する計測画面を示す。

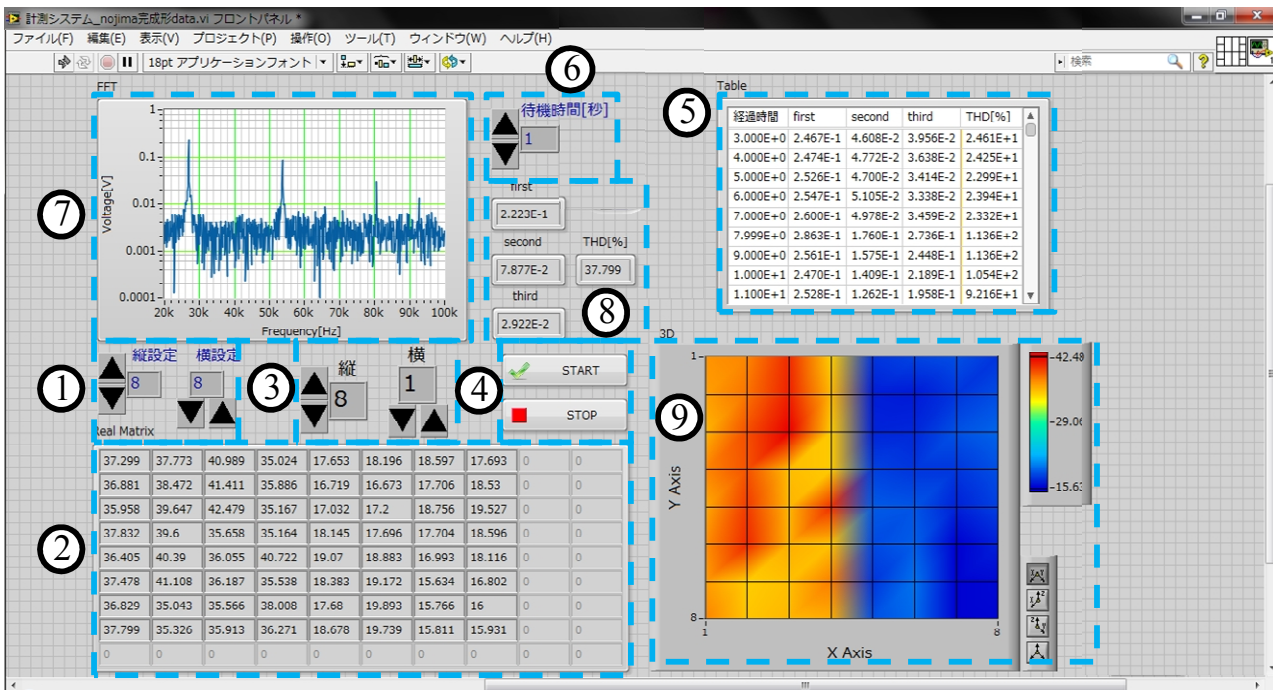


図 5-7 計測プログラムの動作画面

以下に操作の手順を示す。

はじめに、測定壁面をいくつかの行と列のマトリクスで計測するかを決める。図の①の部分はカーソルをクリックすることで、マトリクスの行と列を自由に決めることができる。図は

一例として8×8としているが、例えば5×7や6×3といった使用も可能である。①に入力が完了すると、その下の②の部分が認識される。②の部分はマトリクス上の各座標と対応しており、ここに計測値が格納される。なお、計測値は振動速度の基本波および第2次、第3次高調波成分より算出したひずみ率である。測定したい座標は③のカーソルより指定する。図にあるように、縦8、横1ならば8行目1列の位置に計測値が格納される。

上記の設定を終え、図の④にある【START】のアイコンをクリックすると、測定が開始される。データは⑤に示す表に、⑥で設定した待機時間ごとにデータが格納される。なお、待機時間は任意に設定できる。⑦に示す波形は測定したLDV出力信号を周波数解析した結果であり、リアルタイムで表示される。測定値にノイズ等が発生した場合も、この波形で異常を確認することが出来る。⑧には、⑤の表に格納された計測値の中で最新のものが表示されるので、常におおよその計測値を把握することが出来る。④の【STOP】のアイコンをクリックすると、計測は終了し、計測結果が③で指定した座標に格納される。上記の計測を繰り返し連動していくと、⑨の結果画面は自動的に順次更新され、直ちに結果を確認できる。なお、計測結果は振動速度の値も含めてエクスポートが可能であるため、測定完了後に各種解析処理を行うことが出来る。以上のように、過酷な火災現場でも簡便に操作が行えるように構成されている。

次に、作成したプログラムで簡単な実証試験を行った。試験は、加熱したコンクリート試料と加熱していないコンクリート試料を左右に並べて配置し、これを火災時の模擬試料として本システムにより計測を行った。

図 5-8 に計測結果を示す。計測画面より、左側に配置した加熱コンクリートは振動速度のひずみ率は 35～40 % 前後であり、全体的に赤く表示される。一方、右側に配置した加熱なしのコンクリートはひずみ率が 15～20 % 未満であり、青く表示された。すなわち、加熱の影響がひと目で直感的に判断できるように表示されており、計測プログラムが良好に動作していることがわかる。

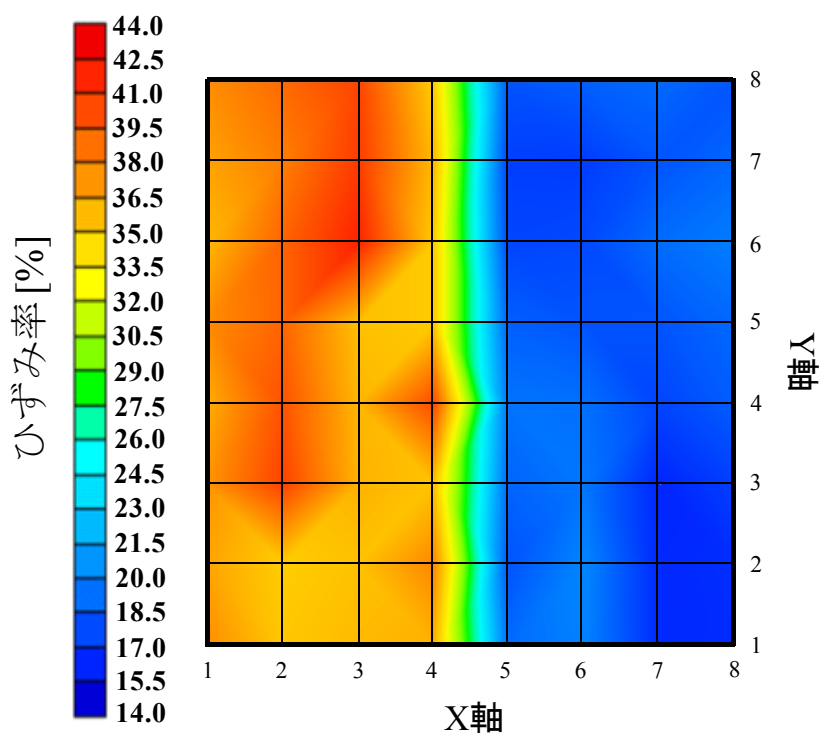


図 5-8 計測プログラムの実証結果

### 5.3 まとめ

本章をまとめると以下のようなになる。

- (1) 火災現場での機動性を高めるには、ハンドリング可能なサイズの装置の小型化が必要不可欠であり、従来の超音波音源を L 字方向振動伝送方式に改良することにより、音源とレーザヘッドで構成するセンサヘッドのコンパクト化を行った。また、計測装置全体についても、現場で実用できる音源駆動用電源と LDV コントローラを中心とする機動性に優れた計測システムを構築した。
- (2) 現場における計測作業の操作性および計測結果の処理と判定を直ちに行えるよう、専用のプログラムを作成した。また、これの実証試験を行い、火災現場で適用できる見通しを得た。

## 第6章 模擬火災現場における検証実験

本章では、実際の集合住宅の室内にて火災を発生させ、そのときのコンクリート壁面の温度履歴と本計測手法により求めた火害計測結果との比較検討を行い、本計測手法の有効性について明らかにしている。

### 6.1 模擬火災現場の概要

5階建て集合住宅の5階の一区画(2DK)で火災を発生させ、火害を被ったコンクリート壁に対して本手法による計測を行った。部屋の間取り図を図6-1に示す。青く示す部分は窓であり、赤く示す部分は計測を行った対象コンクリート壁面である。

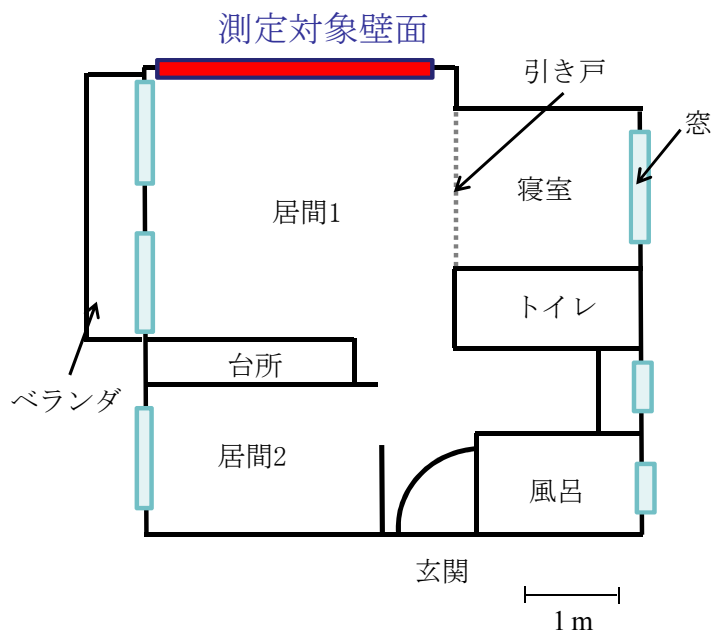


図 6-1 模擬火災現場の間取り

## 6.2 測定壁面と火災の詳細

図 6-2(a)に火災を発生させた室内のコンクリート壁の概要を示す。コンクリート壁は高さ 2.3 m、幅 3.5 m で、厚さは 10 cm 以上である。図中の◎印は火災時の壁面温度を計測するための熱電対 16 個の設置位置を示している。なお、火災実験を始める前に壁紙等はすべて剥がした。赤●印は火災後、本手法により測定を行った箇所であり、縦ラインを A~G、横ラインを 1~8 とする計 56 点である。縦ラインの測定間隔は約 30 cm、横ライン方向は約 40 cm 間隔である。また、火源として図 6-2(b)に示す位置にクリブを配置した。クリブは壁面から前方 90 cm の位置にあり、90 cm×3 cm×3 cm の角材を組み合わせた構造で、高さは 90 cm とした。図 6-3(a)に火源となるクリブを、図 6-3(b)には火災初期の火源が燃え上がった直後の様子を示す。

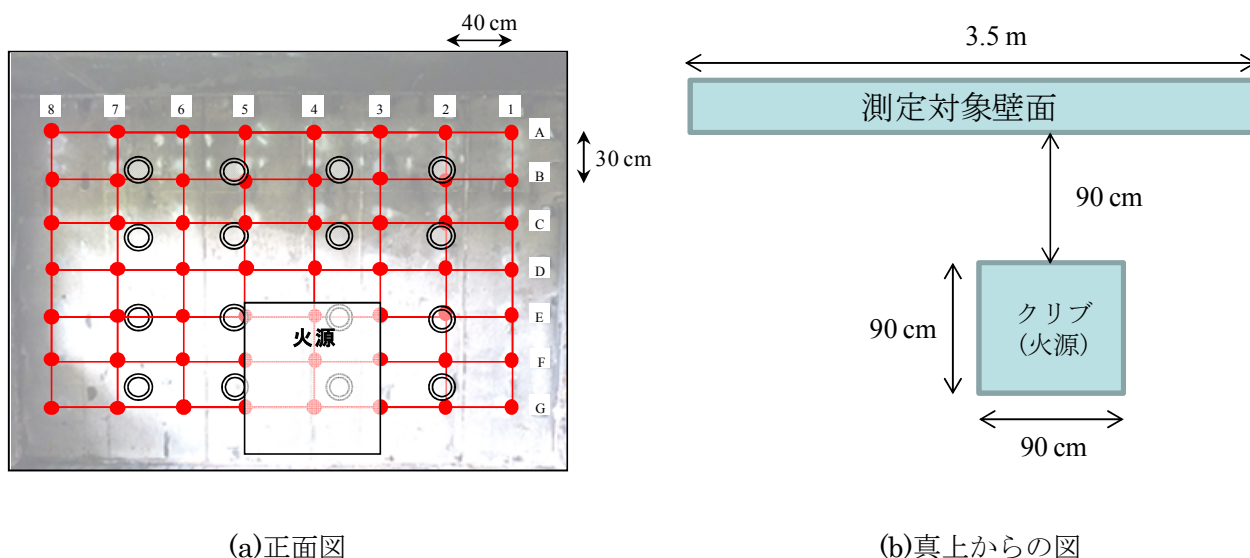


図 6-2 計測するコンクリート壁と火源



(a) コンクリート壁面と火源用クリブ



(b) 火源が燃え上がった直後の様子

図 6-3 コンクリート壁面と火源の様子

### 6.3 測定壁面における温度履歴

図 6-4 は、コンクリート壁面に設置した 16 個の熱電対により計測した各位置での温度履歴であり、点火から消火までの約 300 秒間について示してある。図は、横軸に点火からの経過時間を取り、縦軸には熱電対により計測した温度をとっている。また、図中の番号は温度履歴曲線が同傾向のものをそれぞれグループとしてまとめ、高温度に長時間曝されているグループから順に①～⑤で示している。図 6-5 に壁面上の熱電対の位置と①～⑤の温度履歴グループとの関係を示す。

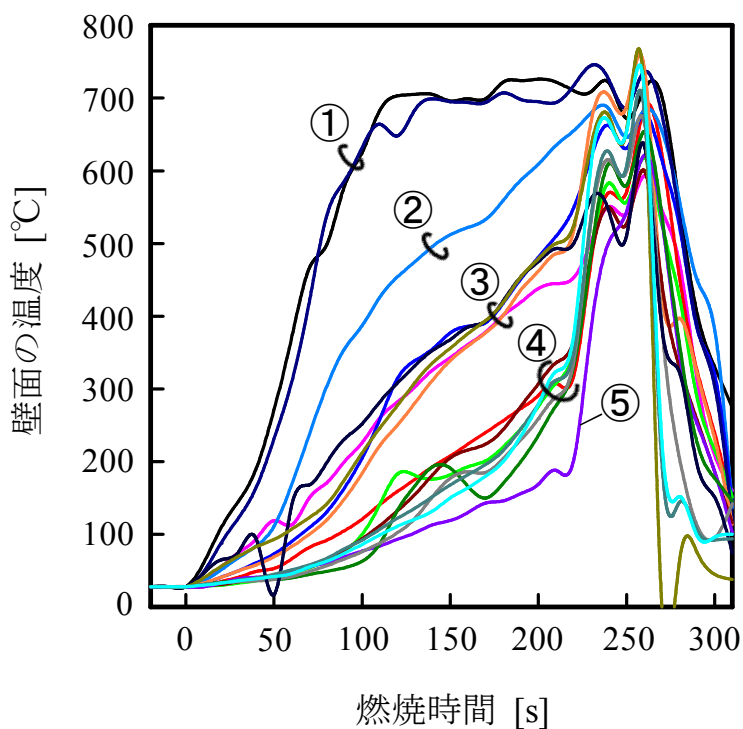


図 6-4 壁面の温度履歴特性



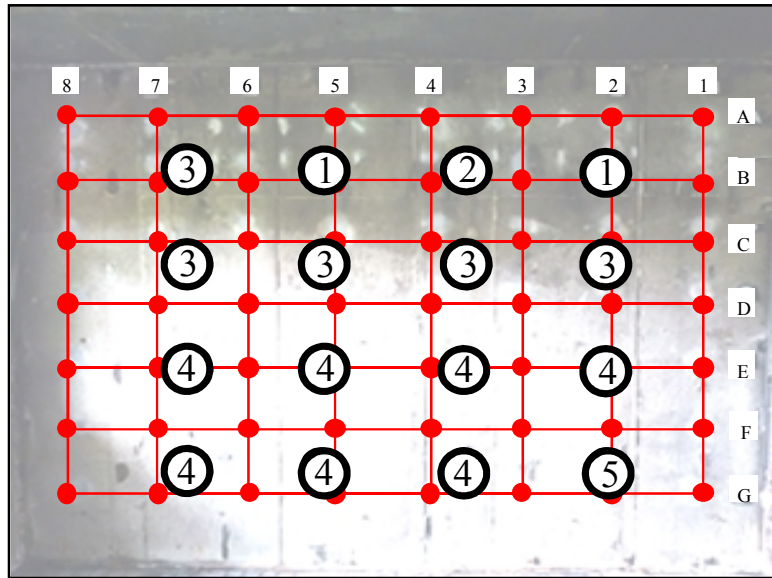


図 6-5 壁面の熱電対位置と温度履歴グループの関係

図 6-6 は、図 6-4 および図 6-5 を基に作成した各時間帯におけるコンクリート壁の温度分布を、特徴ある時間帯で抽出して時系列に示したものである。

図より、発火から 200 秒までを 50 秒ごとに見ると、壁面の上部は早い時間から高温になっており、200 秒後には上部の半分が 300 °C 以上になっている。200 秒を過ぎると壁の左下方まで高温領域が伸びており、230 秒の時点でほぼ全体が 450 °C 以上の高温になり、260 秒には壁全面が 600 °C 以上の高温状態になっているのが分かる。270 秒から消火活動が開始され、壁の左側の温度が急激に低下している。しかし、この時点でも壁の右側は 450 °C 以上の高温状態になっているのがわかる。

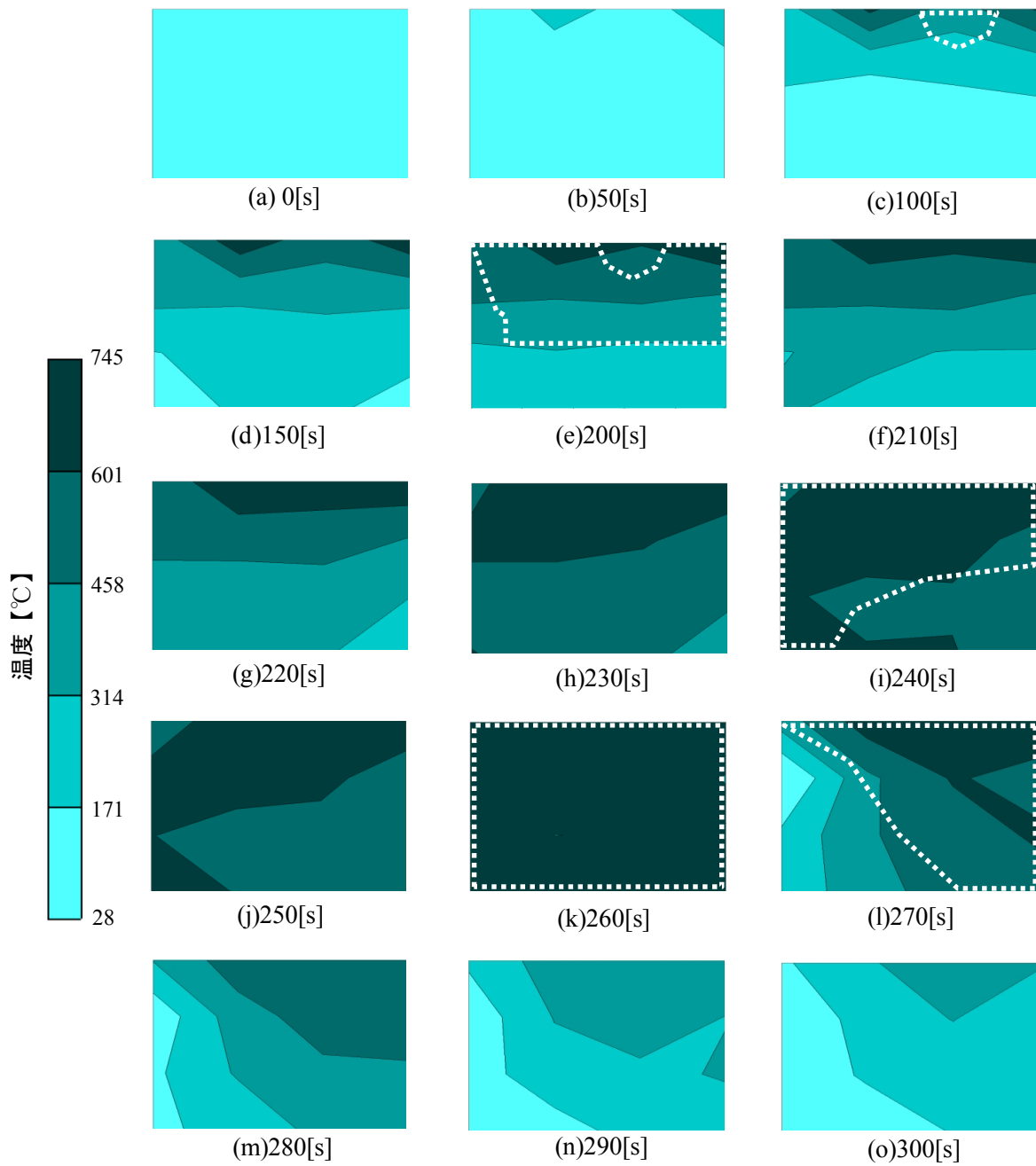


図 6-6 壁面の時間ごとの温度分布

図 6-7 は、図 6-6 の結果を直感的に理解できるように、高温度に曝された壁の範囲と暴露時間の結果を基に、図 6-6 の図中の点線で示す 5 つのパターン（エリア[A]～[E]）で表し、これを重ね合わせた図である。なお、エリア B は壁の上部にあってもエリア A に比べて温度の上昇がやや緩やかで、遅い時間に高温になったエリアであることから、エリア A とは区別して示してある。図より、多くのエリアが重なった部分ほど濃くなっており、長い時間にわたって高温度に曝されているのがわかる。すなわち、この部分が熱の影響をより強く受けていたと推測出来る。

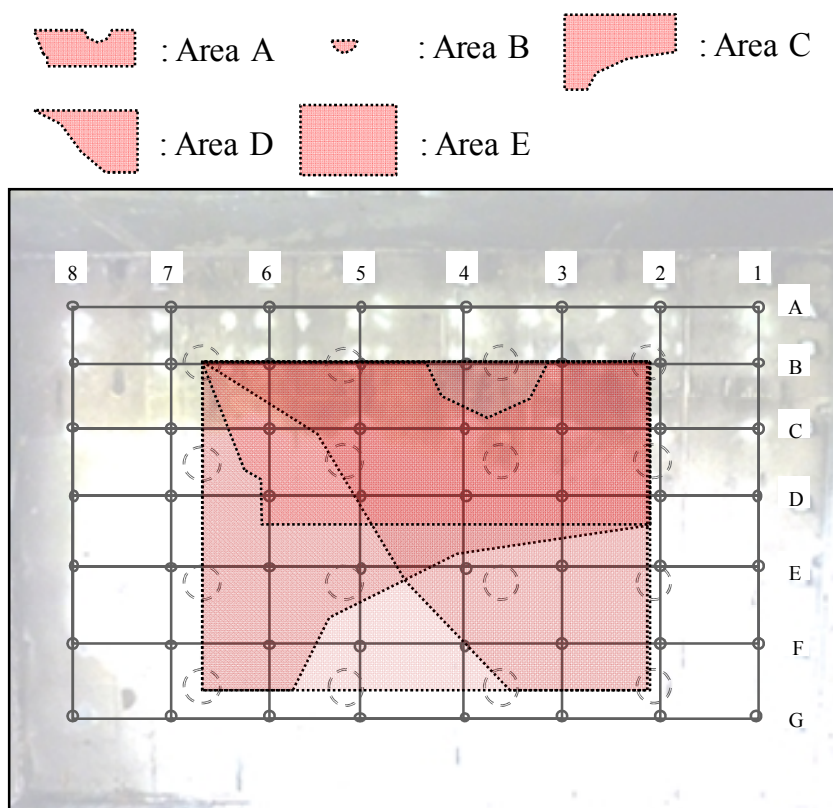


図 6-7 壁面の高温度履歴パターン

## 6.4 コンクリート壁の温度履歴と検証結果

図 6-8 は、図 6-2(a)に示す計測点を本手法で計測した結果であり、基本周波数および高調波成分の各振動速度特性から算出したひずみ率で示してある。また、図の点線内は温度履歴を測定した範囲である。なお、隣り合う測定点の間のひずみ率については、両計測点でのひずみ率を用いて補完して処理してある。図ではひずみ率が高いほど、すなわち受熱の影響が大きいとされる部分ほど濃い色で、ひずみ率が低いほど薄い色で表示してある。

結果より、コンクリート壁の横ライン E より上の領域で、比較的ひずみ率が高くなっている。また、火源の頂点に相当する点 D4 から、左右および上下方向に歪み率の高い領域が広がっている。この結果と図 6-7 に示す結果を比較すると、両者のパターンは似ており、歪み率分布が壁面の火害の分布をよく表しているのが分かる。

以上の結果より、コンクリート壁面が火災によって受けた高温の影響とひずみ率分布がよく対応していることから、本手法が火害を計測するのに有効であることが明らかになった。

なお、これまでに複数回にわたり実際の火災現場での調査に立ち会い、コンクリート壁に対して本手法による計測を行ってきた。その結果、本計測手法により得た火害の分布と、火災調査の専門家の見解がおおよそ一致することを確認している。

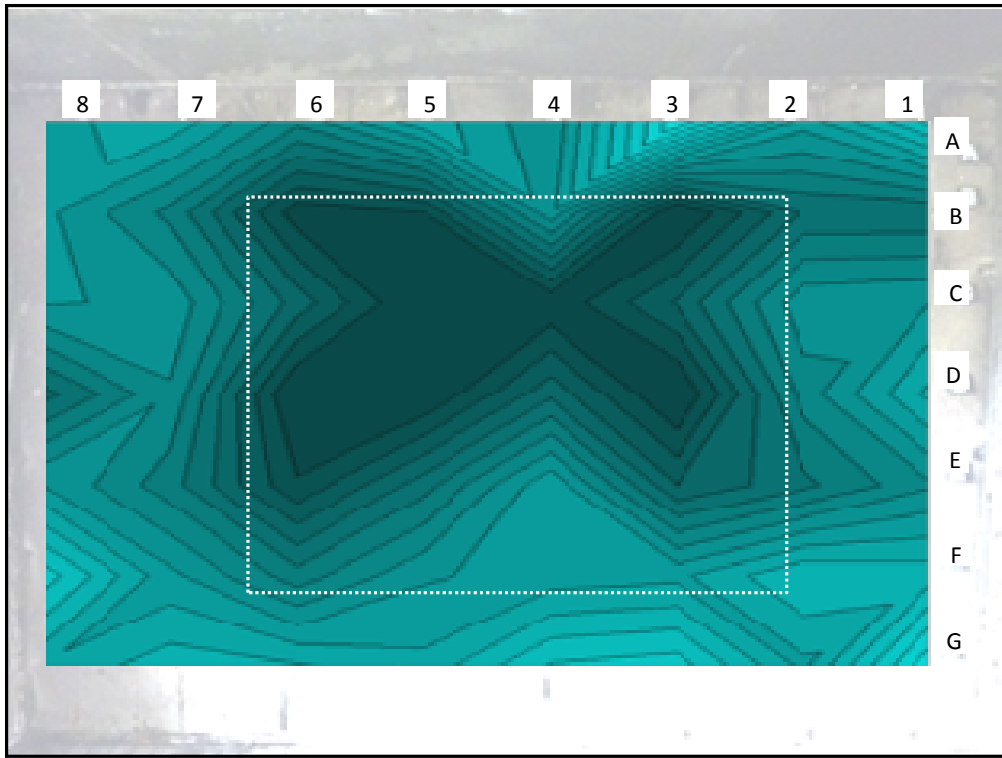


図 6-8 壁面の振動速度のひずみ率分布

## 6.5 まとめ

本章をまとめると以下ようになる。

- (1) 模擬火災現場の劣悪な環境下においても、本計測システムは問題なく動作することが確認できた。
- (2) 模擬火災現場における燃焼実験より、火災にあったコンクリート壁面の温度履歴は各部位によってその特性が大きく異なることを明らかにした。
- (3) 火災実験におけるコンクリート壁の温度履歴と本手法の計測結果には相関関係があった。すなわち、高温に長時間曝されていた部位ほど振動速度の歪み率が大きくなることを確認した。

以上の結果より、本手法がコンクリートの火害を計測するのに有効であることを示した。

## 第7章 結言

### 7.1 本研究で得られた成果

本研究の主な成果は以下のとおりである。

第2章では、強力空中超音波とレーザドップラ振動計を用いて火災にあったコンクリートの火害の計測を非接触かつ非破壊で行う計測手法を提案し、その計測原理を示した。

次に、強力空中超音波の特徴の一つである非線形音波の発生とその利用について提案し、強力音波発生用の音源の構成について示した。また、駆動周波数 19.6 kHz、26.8 kHz および 50.8 kHz の点集束音源を作成し、その照射音波特性について比較検討した。

その結果、照射音波強度および装置の機動性・操作性を考慮し、駆動周波数 26.8 kHz の音源が実用上適当であることを示した。

第3章では、実用の点集束型音源(26.8 kHz)により発生した強力集束音波を固体試料(アクリル)に照射することにより、試料表面には非線形超音波の周波数と音圧に対応した振動が発生することを明らかにした。また、試料と音源の距離関係を変化させた場合、試料表面での音圧と振動速度が対応しないことを見出し、その原因が計測用レーザ光が音場から受ける影響であることを明らかにし、それを改善する方法を示した。

第4章では、高温度で加熱したコンクリート試料に対して本手法を適用したところ、加熱

温度の違いによって試料の振動特性に明確な差異が現れることを明らかにした。

また、振動速度の基本周波数成分と高調波成分の割合を表わすひずみ率を用いた評価方法を提案し、コンクリート火害の計測に有効であることを明らかにした。

第5章では、火災現場での計測の機動性を高めるため、使用する超音波音源を改良し、音源とレーザヘッドで構成するセンサヘッドのコンパクト化を行った。さらに、計測装置全体についても、現場での実用に耐えうる音源駆動用電源とLDVコントローラを中心とする機動性に優れた計測システムを構築した。さらに、現場における計測作業の操作性および計測結果の処理と判定を直ちに行えるよう、専用のプログラムを作成した。また、これの実証試験を行い、火災現場で運用できる見通しを示した。

第6章では、実際の集合住宅を使った模擬火災実験より、火災にあったコンクリート壁面の温度履歴は、各部位によってその特性が大きく異なることを確認した。また、本計測手法により得たひずみ率特性とコンクリート壁の温度履歴特性に相関関係が見られることから、本手法が火害の計測に十分有効であることを示した。

以上、本研究では強力空中超音波と光学機器を組み合わせた、これまでに例を見ない全く新たなコンクリート火害を計測するための手法を提案し、その有効性を明らかにした。また、実際の火災現場で本手法を実用するための計測システムを構築した。



現在、コンクリートの火害調査を精度よく行う方法が破壊検査のみである状況において、非接触・非破壊で検査できる本手法は極めて有用であり、社会への貢献も大であると考えます。今後、火災現場の調査においてその機能が大いに発揮されることを期待します。

## 7.2 今後の課題

今後の課題は以下のとおりです。

- (1) コンクリートは、骨材の寸法および水の配合率で強度およびヤング率が変化することから、種々のコンクリート壁に対して本手法による計測を試み、適用限界を明らかにする。
- (2) コンクリートの火害診断の重要な役目として、火災にあったコンクリートの再使用可否の判断がある。本手法によるコンクリートの深さ方向の火害特性を判定する方法について検討を行う。
- (3) 本研究で提案した計測手法は、例えば物体内部の欠陥検出にも有効であると考えられる。

今後、強力空中超音波センシング技術としての他の応用についても、精力的に研究を進めていきたい。

## 謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始懇切なるご指導を賜りました日本大学大学院理工学研究科電気工学専攻伊藤洋一教授に深甚なる謝意を表します。

本論文をまとめるにあたり、計測工学の立場から御指導を頂いた電気工学専攻小野隆教授、音響工学の立場から御指導頂いた電気工学専攻三浦光教授、コンクリート工学の立場から御指導頂いた土木工学専攻梅村靖弘教授に謹んで謝意を表します。

また、日頃教育研究活動を通して公私にわたり御指導御鞭撻頂いている電気工学科の諸先生方に厚く御礼申し上げます。

土木工学科佐藤正己先生には本研究におけるコンクリート試料の力学的特性試験に関しての御指導を頂きました。心より御礼申し上げます。

また、長期間にわたり火災の専門家としての御助言ならびに貴重な火災現場での実験の機会を幾度も御与え下さった、東京消防庁予防部調査課の皆様にご心よりお礼申し上げます。

最後に、本研究を進めるにあたり惜しみない協力を頂いた音波応用・環境工学伊藤研究室の研究生ならびに卒業生の皆様に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 三浦 光：音波乾燥による恒率乾燥機構の考察，日本音響学会誌，Vol. 41(2)，pp. 108-113，1985.
- [2] 川村 雅恭：音波による煙霧質の凝集に関する実験，日本音響学会誌，Vol. 17(2)，pp. 123-133，1961.
- [3] 広瀬 達三，木本 日出夫：超音波による液体微粒化，日本音響学会誌，Vol. 28(7)，pp. 335-345，1972.
- [4] Y.Ito：Study of Atomization of a Water Jet by High-Intensity Aerial Ultrasonic Waves，Japanese Journal of Applied Physics，Vol. 40，pp. 3792-3796，2001.
- [5] 伊藤 洋一：強力空中超音波による表面残留微粒子の剥離の基礎実験，電子情報通信学会技術研究報告，US，超音波，98(469)，pp. 39-44，1998.
- [6] Y. Ito, S. Nakayama, R. Miwa：Measurement of Residual Particles by High-Intensity Aerial Ultrasonic Waves，Japanese Journal of Applied Physics，Vol. 38，pp. 3312-3315，1999.
- [7] 小塚 晃透，辻内 亨，三留 秀人：超音波を用いた微粒子の選択的マニピュレーション，電子情報通信学会技術研究報告，EA，応用音響，Vol. 94(463)，pp. 33-40，1995.
- [8] 小塚 晃透，辻内 亨，三留 秀人：集束超音波による定在波を用いた微粒子の次元操作，電子情報通信学会技術研究報告，EA，応用音響，Vol. 95(481)，pp. 9-16，1996.
- [9] 竹田 嘉明，伊藤 洋一：強力空中超音波による液体除去の実験的検討，1999年春季日本音響学会講演論文集，pp. 873-874，1999.
- [10] Y.Ito, M. Kotani：Removal of Liquid Leaked into Narrow Channel Using High-Intensity Aerial Ultrasonic Waves，Japanese Journal of Applied Physics，Vol. 43，pp. 2840-2846，2004.
- [11] Y.Ito, E. Takamura：Removal of Liquid in a Long Pore Opened at Both Ends Using High-Intensity Aerial Ultrasonic Waves，Japanese Journal of Applied Physics，Vol. 49，pp. 07HE22-1-6，2010.
- [12] T.Abe, T.Sugimoto：Extremely Shallow Underground Imaging Using Scanning Laser Doppler Vibrometer，Japanese Journal of Applied Physics，Vol. 48，pp. 07GC07-1-3，2009.
- [13] T.Abe, T.Sugimoto：Distinguishing Buried Objects in Extremely Shallow Underground by Frequency Response Using Scanning Laser Doppler Vibrometer，Japanese Journal of Applied Physics，Vol. 49，pp. 07HC15-1-4，2010.

- [14] T.Sugimoto, T.Abe : Buried Object Detection Method Using Optimum Frequency Range in Extremely Shallow Underground, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 50, pp. 07HC18-1-7, 2011.
- [15] 赤松 亮, 杉本 恒美, 歌川 紀之, 辻野 修一 : SLDV と空中放射音波を用いたコンクリート表層部の欠陥映像化に関する研究, 電子情報通信学会技術研究報告, US, 超音波, Vol.111(443), pp.1-5, 2012.
- [16] 高橋 雅和, 馬場比路志, 小倉 幸夫 : 矩形バースト波・チャープ波複合装置の開発とその応用, 超音波テクノ, Vol. 21(4), pp. 33-37, 2009.
- [17] 高橋 雅和, 野地 正明, 桐生 啓二, 小倉 幸夫, 川嶋 紘一郎 : 非接触空中超音波検査法の開発とその応用, 自動車技術協会春季学術講演会, pp. 1-4, 2010.
- [18] 大隅 歩, 土井 一樹, 伊藤 洋一 : 強力空中超音波を用いた建築資材の剥離検出の基礎検討, 電子情報通信学会技術研究報告, US, 超音波, Vol. 110(234), pp. 7-12, 2010.
- [19] 土井 一樹, 大隅 歩, 伊藤 洋一 : 強力空中超音波を用いた建築資材の剥離検出, 2010 年秋季日本音響学会講演論文集, pp. 1245-1246, 2010.
- [20] 小林 寛政, 大隅 歩, 伊藤 洋一 : 強力空中超音波を用いた固体材料の内部欠陥検出-アクリル材料を用いての基礎検討, 2012 年春季日本音響学会講演論文集, pp. 1321-1322, 2012.
- [21] 小林 寛政, 大隅 歩, 伊藤 洋一 : 強力空中超音波を用いた固体材料の内部欠陥検出(II), 2012 年秋季日本音響学会講演論文集, pp. 1393-1394, 2012
- [22] A.Osumi, K.Doi, Y.Ito : Fundamental Study of Detecting Internal Defect in Building Materials Using High-Intensity Aerial Ultrasonic Waves with Finite Amplitude, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 50, pp. 07HE30-1-5, 2011.
- [23] A.Osumi, H.Kobayashi, Y.Ito : Basic Study of Detecting Defects in Solid Materials Using High-Intensity Aerial Ultrasonic Waves, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 51, pp. 07GE04-1-6, 2012.
- [24] 日本建築学会 : 建物の火害診断および補修・補強方法指針(案)・同解説, 丸善, 2010
- [25] 日本非破壊検査協会 : 新コンクリートの非破壊試験, 技法堂出版, 2010

- [26] 原田 有：コンクリートおよび部材の火災特性について，コンクリートジャーナル，Vol. 11(8)，pp. 37-65, 1973.
- [27] 長尾 覚博，中根 淳：高温履歴を受けるコンクリートの物性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，No. 457，pp. 1-10, 1994
- [28] 一瀬 健一，川口 徹，長尾 覚博：高温加熱を受けた高強度コンクリートにおける粗骨材の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24(1)，pp. 285-290, 2002
- [29] 田澤 榮一，佐伯 昇：コンクリート工学－微視構造と材料特性－，技法堂出版，1998.
- [30] 川上 洵他：コンクリート構造物の力学－解析から維持管理まで－，技法堂出版，2008.
- [31] 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術’04-基礎編，日本コンクリート工学協会，2001.
- [32] 日本コンクリート工学会：コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書，pp. 101-116, 2012.
- [33] Y.Ito, A.Oosumi, N.Asakura : Examination of Noncontact Excitation of Acrylic Board Using High-Intensity Aerial Ultrasonic Waves Having Finite Amplitudes, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 47, pp. 4292-4295, 2008.
- [34] 鎌倉 友男：非線形音響学の基礎，愛知出版，1996.
- [35] 能本 乙彦：有限振幅の音波の伝搬(I)，日本音響学会誌，Vol. 20(1)，pp. 29-39, 1964.
- [36] 能本 乙彦：有限振幅の音波の伝搬(II)，日本音響学会誌，Vol. 20(2)，pp. 84-106, 1964.
- [37] 能本 乙彦：有限振幅の音波の伝搬(III)，日本音響学会誌，Vol. 20(3)，pp. 175-195, 1964.
- [38] 中村 昭：有限振幅音波研究の展望と非線形効果-非線形音響(1)-，日本音響学会誌，Vol. 37(12)，pp. 634-640, 1981.
- [39] 熊本 芳朗：連続鋸歯状波と N 波の伝搬に関する基礎理論-非線形音響(2)-，日本音響学会誌，Vol. 38(1)，pp. 55-60, 1982.
- [40] 鎌倉 友男，熊本 芳朗：非線形音響の基礎理論，日本音響学会誌，Vol. 44(9)，pp. 684-688, 1988.
- [41] 斎藤 繁実：集束音波の非線形伝搬，日本音響学会誌，Vol. 44(9)，pp. 706-710, 1988.
- [42] 伊藤 洋一：反射板の利用による縞モード振動板空中超音波音源の容量の増強，日本音響学会誌，Vol. 41(3)，pp. 144-148, 1985.

- [43] 伊藤 洋一：縞モード振動板を用いた放射方向変換型空中超音波音源と強力音場の形成，日本音響学会誌，Vol. 42(8)，pp. 621-629，1986.
- [44] 伊藤 洋一：集束点可変型縞モード振動板式空中超音波音源，日本音響学会誌，Vol. 44(6)，pp. 432-439，1988.
- [45] 山根 宏之，伊藤 洋一，川村 雅恭：縞モード振動板からの音波の放射，日本音響学会誌，Vol. 39(6)，pp. 380-387，1983.
- [46] 大隅 歩，伊藤 洋一：強力空中超音波による物体の非接触励振の検討，2007 年春季日本音響学会講演論文集，pp. 1165-1166，2007.
- [47] 大隅 歩，伊藤 洋一：強力空中超音波による物体の非接触励振の検討（2），2007 年秋季日本音響学会講演論文集，pp. 1275-1276，2007.
- [48] 朝倉 直人，大隅 歩，伊藤 洋一：強力空中超音波による物体の非接触励振の検討（3），2008 年春季日本音響学会講演論文集，pp. 1365-1366，2008.
- [49] 園田 義人：レーザ光による音波・超音波検出と光マイクロホンの基礎研究，1995 年秋季日本音響学会講演論文集，pp. 599-600，1995.
- [50] 中村 健太郎：空気の屈折率変調を検出する空中強力音場の測定，電子情報通信学会技術研究報告，US，超音波，Vol. 101(42)，pp. 15-20，2001.
- [51] 池田 雄介，後藤 亮，岡本 直毅，滝澤 俊和，及川 靖広，山崎 芳男：レーザ CT を用いた再生音場の測定，日本音響学会誌，Vol. 62(7)，pp. 491-499，2006.
- [52] 大隅 歩，小林 寛政，野嶋 泰宏：強力空中超音波を用いた非接触非破壊検査技術の基礎検討～強力音場が光学計測に与える影響について～，電子情報通信学会技術研究報告，US，超音波，Vol. 112(366)，pp. 39-44，2012.
- [53] 大隅 歩，伊藤 洋一：強力空中超音波音場が光学振動計測に与える影響の実験的考察，電子情報通信学会技術研究報告，US，超音波，Vol. 113(13)，pp. 33-38，2013.
- [54] A.Osumi, Y. Ito : Basic examination of nondestructive and noncontact measurement system for fire damage level of concrete wall by using high-intensity aerial ultrasonic waves, Proc. 5th International Congress on ultrasonics, pp. 396-399, 2012.

- [55] 大隅 歩, 伊藤 洋一, 石塚 仁, 星野 嘉彦, 大江 康夫 : 強力空中超音波を用いたコンクリートの火害度推定の基礎検討, 平成 24 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 206-207, 2012.
- [56] 大隅 歩, 野嶋 泰宏, 伊藤 洋一 : 強力空中超音波を用いたコンクリートの火害度推定の検討-音波照射方法の検討, 2012 年秋季日本音響学会講演論文集, pp. 1313-1314, 2012.
- [57] A.Osumi, Y. Nojima, Y.Ito : Basic Study of Measurement for Fire Damage level of Concrete Using High-Intensity Aerial Ultrasonic Waves, Proc. 33st Symposium on Ultrasonic Electronics, pp. 91-92, 2012.
- [58] 大隅 歩, 伊藤 洋一, 石塚 仁, 星野 嘉彦, 大江 康夫 : 強力空中超音波を利用したコンクリート火害の非接触非破壊推定技術, 日本火災学会論文集, Vol. 63(3), pp. 57-65, 2013.
- [59] 土木学会 : 土木材料実験指導書 2007 年度改訂版, 土木学会, 2007.
- [60] Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M., Wong, Y.L., : Strength and durability recovery of fire-damage concrete after post-fire-curing, Cement and Concrete Research 31. pp. 1307-1318, 2001.
- [61] 河辺 信二, 一瀬 賢一, 川口 徹 : 高温加熱を受けたコンクリートの養生方法と力学的性質, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26(1), pp. 687-692, 2004.
- [62] 鈴木 将充, ヘンリー マイケル, 加藤 佳孝, 勝木 太 : 高温加熱を受けたモルタルの耐久性に及ぼす再養生条件の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30(1), pp. 711-716, 2008.
- [63] 栗山 朋之, 伊藤 洋一 : 縦振動 L 字変換を利用した点集束型空中超音波音源の小型化, 2011 年春季日本音響学会講演論文集, pp. 1481-1482, 2011.
- [64] Y.Ito : A Vibration Plate Type Aerial Ultrasonic Sound Source Utilizing Directional Change and Division of Longitudinal Vibrations, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 39, pp. 2986-2989, 2000.