

高振動数で起振可能なアクチュエータの作成と 損傷に伴う鋼板の振動特性の変化に関する実験的検討

Development of an actuator for high-frequency excitation and
experimental investigation of damage-induced changes in vibration properties of a metal plate

古川 愛子*, 小野 達也**, 大塚 久哲***

Aiko FURUKAWA, Tatsuya ONO and Hisanori OTSUKA

*博(工) 京都大学大学院工学研究科 助教 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

**九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士課程 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

***工博 九州大学大学院工学研究院 教授 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744)

In this study, an actuator which can excite structures at high frequencies is developed for the purpose of detecting structural damage based on the fact that the vibration properties at high frequencies are sensitive to small damage. Through experiments using a metal plate, it is found that the Fourier amplitude at the excitation frequency varies due to damage and that the small damage of 10mm length can be detected if an appropriate excitation frequency is chosen. The Fourier phase difference is less sensitive to damage and have larger variations than the Fourier amplitude, so the Fourier amplitude is found to be a better damage index. Moreover, an impulse force is generated by breaking a lead of a mechanical pencil, and the responses are measured. The Fourier amplitude generated by the actuator is found to be more sensitive to smaller damage than the responses by the pencil and the effectiveness of the actuator is verified.

Key Words: actuator, high-frequency excitation, vibration property, damage,

キーワード: アクチュエータ, 高振動数起振, 振動特性, 損傷

1. はじめに

大地震が発生した際、防災上の中核となる病院、消防署、交通施設等のインフラの被災度を即座に評価し、適切な補修、補強を行うことは、2次被害の防止や救急活動において非常に重要である。大地震後の構造物の被災度判定は、現状では専門家の目視によって行われているが、被災箇所や時間帯によっては目視の出来ない場合もある。目視によらず、損傷の有無を簡便に判定する手法の開発は極めて重要であり、これまでも数々の研究が行われている¹⁾²⁾。

損傷によって構造物の振動特性が変化することは古くから知られており、振動特性の変化を利用した損傷検出手法に関する研究は数多い³⁾。筆者らもこれまで、マイクロ起振器と名づけた可搬型の起振器を用いた損傷検出手法に関する研究を行ってきた⁴⁾⁵⁾。開発したマイクロ起振器は、偏心荷重をモーターで回転させることによって生じる遠心力を利用して、構造物に数ヘルツの調和外力を与えるものであった。具体的には、地震前と地震後に構造物を起振して応答加速度を計測し、地震前後の計測結果を比較することによって各部材の剛性低下率を同定し、剛性の低下した部材が損傷部材で、剛性低下率が損傷度であると見なして損傷の評価を行うものであった。手法の有効性検証の

ため、実橋梁（鋼トラス橋）の撤去工事の際に、斜材に傷を入れて損傷状態を作成し、振動実験を実施したところ⁴⁾、斜材の剛性が10%～30%低下するような大きな損傷の検出には成功したが、亀裂の入った部材を検出することはできなかった。マイクロ起振器を用いて亀裂レベルの小さな損傷を検出することができない理由としては、モデル化誤差や計測ノイズ、計測点数の不足による空間的な解像度の低さなども挙げられるが、根本的な問題は、小さな損傷に対する感度の低い低振動数領域の振動特性を利用している点にあると考えられる。

振動特性の変化を利用した損傷検出手法を、着目する振動数の高さで分類すると、マイクロ起振器を用いた振動実験や微動計測⁶⁾のような主に数～数十ヘルツの低い振動数を扱う手法から、超音波探傷検査⁷⁾のようなメガヘルツレベルの非常に高い振動数を扱う手法まで存在する。数～数十ヘルツの低い振動数を利用した手法は、構造物全体を揺らすので、構造物全体の損傷を一度に検知できると期待されてきた。しかし、前述の根本的な問題点があるため、亀裂レベルの小さな損傷の検出には利用できない。余程大きな損傷でない限り、損傷による振動特性の変化は、計測ノイズや環境の変化による振動特性の変化に埋れてしまうからである。一方、超音波探傷検査は、微小損傷に対して

感度の高いメガヘルツレベルの振動特性を扱うため、微小な損傷を検出できるが、一度に診断できるエリアがクラック近傍などの非常に狭い領域であるので、構造物全体の健全度を即座に診断することは難しい。

以上を踏まえ、本研究では、超音波ほど高くはないが微動よりは高い振動数、具体的には数キロヘルツの高振動数で構造物を起振することによって、亀裂レベルの小さな損傷の検出と計測の効率化を同時に実現できないかと考え、数キロヘルツの高振動数で起振可能なアクチュエータの作成に取り組んだ。筆者らが構想している損傷検出手法の概要をまとめると以下の通りである。

- ・ 健全状態の構造物に対して計測を行い、健全時の高振動数領域の振動特性を記録しておく。地震後に計測を行い、健全時の振動特性と比較する。振動特性に有意な差が見られる場合は、損傷の可能性があると思われ、詳細な点検を行う。
- ・ 数キロヘルツの高振動数で起振することによって、構造物全体のスケールよりは狭いが亀裂のスケールよりは広い領域の局所振動を励起でき、応答を計測するエリアが限定され、計測の効率化が図れる。
- ・ マイクロコンピュータ、アクチュエータ、センサ、無線などから構成されるユニットを、経験的に損傷が発生し易いと分かっているエリアに設置しておく。地震後に、マイクロコンピュータの指令によって起振、計測し、計測結果を無線で構造物の管理室などに送信すれば、より迅速な損傷検出が可能となる。

本研究と同程度の高振動数を扱う手法には、打音検査などの衝撃力を利用するものがあるが、人力による加振であるため、常に一定の衝撃力を与えることは困難である。そのため、打音特性が変化した場合に、損傷によって変化したのか、それとも衝撃力の違いによるものなのか、余程大きな損傷でない限り明瞭に区別することは難しい。これに対し、本研究で作成したアクチュエータは、常に一定の起振力を構造物に与えることが出来るため、振動特性が変化すれば、構造特性に何らかの変化があったと解釈することが可能である。また、高振動数領域の振動特性については未解明な部分が多いため、実験によってデータを蓄積することが重要であると考えられる。さらに、検出可能な損傷のサイズは、扱う振動の波長に依存すると考えられるので、数キロヘルツの振動数で検出できる損傷のサイズを明らかにすることも重要である。そこで本研究では、作成したアクチュエータを用いて鋼板の振動実験を行い、鋼板がどのように振動するのかを調べた。また、無損傷の鋼板と、10mmと50mmの亀裂を有する鋼板の計測データを比較することによって、損傷によって高振動数領域の振動特性がどの程度変化するのか、振動特性の変化から10mmと50mmの亀裂を検出可能であるかどうか調べた。さらに、鋼板にシャープペンシルを押し付けて芯を折ることによって衝撃力を発生させ、衝撃力による振動特性の変化についても調べた。アクチュエータによる振動特性の変化との比較を行い、アクチュエータを用いることの優越性を検証した。

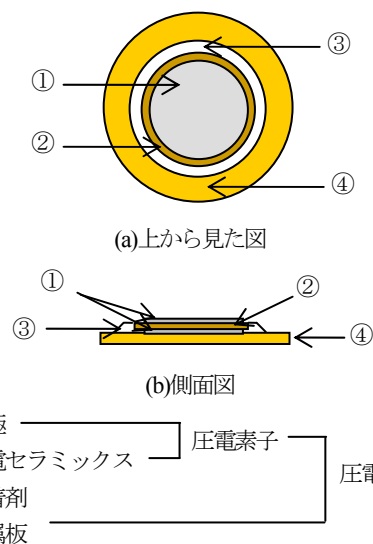


図-1 加振部（圧電振動板）の構造

2. 高振動数で起振可能なアクチュエータの作成

2.1 概要

本研究では、逆圧電効果を利用した圧電型のアクチュエータを作成した。逆圧電効果とは、電圧を付加すると圧電素子自体が変形して力を発生する現象である。アクチュエータは、構造物を起振する加振部と、加振部を駆動するコントローラ部から構成される。加振部には、安価な圧電部品である圧電振動板を用いることとした。コントローラも、安価なマイクロコンピュータを用いて作成した。具体的には、想定する振動数の起振力を与えられるように、圧電振動板に加える電圧の周期を制御した。

2.2 加振部⁸⁾⁹⁾

本研究では、圧電ブザーに利用されている圧電振動板をアクチュエータの加振部に用いた。圧電ブザーは、圧電素子と金属板を貼り合わせた圧電振動板のたわみ振動を発音源とするものであり、機器の操作確認音や時報、警報、スピーカー、電話機の送受信機などに幅広く応用されている。本研究では、このたわみ振動を振動源として用いる。図-1に圧電振動板の構造を示す。圧電セラミックスの両面に電極を形成した圧電素子と、金属板を接着した比較的単純な構造をしている。圧電振動板の直径は20mm、厚さは1mm程度である。図-2に圧電振動板の動作原理を示す。圧電素子の対向電極間に電圧を印加すると、逆圧電効果により電気的な歪を生じる。円形の圧電素子の場合、径方向に圧電素子が伸び縮みする変位となる。しかし、圧電素子に接着されている金属板は伸縮しないため、圧電素子が径方向に伸びたとき、圧電振動板は図-2(a)のように屈曲し、逆に圧電素子が縮んだとき、圧電振動板は図-2(b)のように屈曲する。したがって、電極板に交流電圧を印加すると、図-2(a)(b)が交互に繰り返されて空気を振動させるので、空气中に音波が発生し、それが音として人間の耳に届くことになる。金属板を構造物に接着すれば、同様の原理で構造物を振動させることができると考えられる。

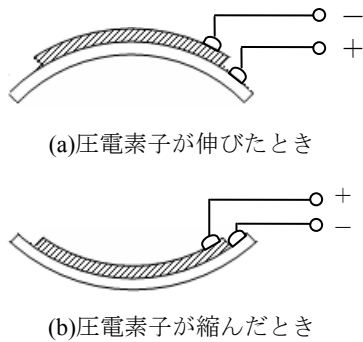


図-2 加振部（圧電振動板）の動作原理

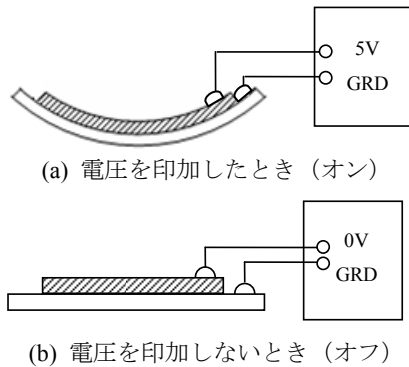


図-3 作成したアクチュエータの概念図

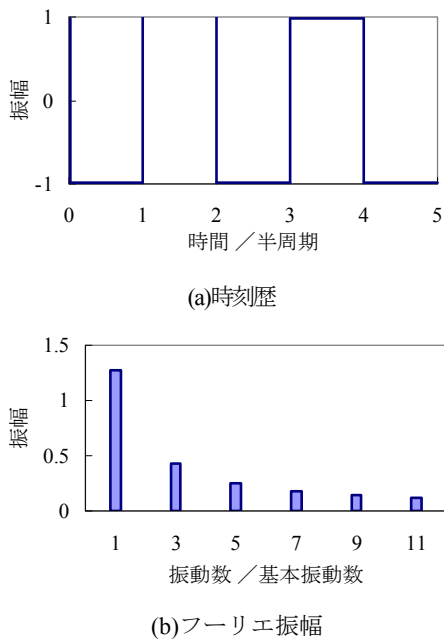


図-4 振幅1，周期T，基本振動数 $f(=1/T)$ の矩形波

2.3 コントローラ部

コントローラは、マイクロコンピュータ ATmega168 を用いて作成した。概念図を図-3に示す。まず、圧電素子のマイナス側の電極をマイコンボードのグラウンド（GRD）に設置し、プラス側の電極を5Vの出力側に設置した。そして、高速で電流のオン／オフを繰り返した。オンの状態のとき、圧電振動板は図-3(a)のように歪んでおり、オフの状態のときは図-3(b)のように平らになる。このように、一

定の時間間隔でオン／オフを繰り返すことによって、矩形波の電圧を圧電振動板に印加することができる。振動数 f （周期 $T = 1/f$ ）で構造物を起振したい場合は、オンとオフを $T/2$ 秒間ずつ交互に繰り返せばよい。一般に、大きな振動を発生させるには、大きな電圧を印加する必要があるが、圧電振動板は幾何学的形状に基づく共振振動数を有しているので、共振振動数で電圧を変化させれば小さな電圧でも大きな振動を起こすことができる。本研究では、消費電力を抑えるために、電圧は5Vの一定値にし、圧電振動板の共振振動数に近い振動数で起振した。

2.4 矩形波のフーリエ級数展開

前述のように、本研究では、正弦波ではなく矩形波の電圧を圧電振動板に与えた。ここで、図-4(a)のような周期が T で振幅が1の矩形波を想定する。この矩形波は式(1)で表される。ここに t は時間である。

$$f(t) = \begin{cases} -1 & (0 \leq t < T/2) \\ 1 & (T/2 \leq t < T) \end{cases}, \quad f(t+T) = f(t) \quad (1)$$

この矩形波のフーリエ級数展開は式(2)となる。

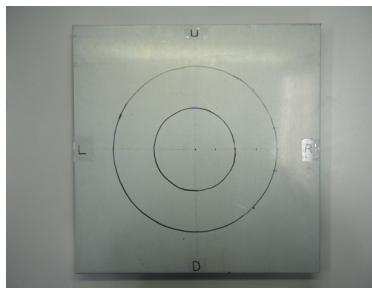
$$f(t) = \frac{4}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \sin(2k+1) \frac{2\pi}{T} t \quad (2)$$

すなわち、矩形波のフーリエ振幅は、基本振動数 $f(=1/T)$ の成分以外に、基本振動数の奇数倍の振動数成分（高調波）を有する波となる。各振動数に対するフーリエ振幅を図-4(b)に示すが、当然のことながら基本振動数に対する成分が卓越しているので、本研究では、基本振動数を起振振動数と呼ぶこととする。

2.5 励起される起振力および応答加速度の大きさと起振振動数の関係

本研究では、圧電振動板に矩形波の電圧を印加して起振力を起こす。励起される起振力の振動数特性は、矩形波の電圧のフーリエスペクトル（電圧）と圧電振動板の伝達関数（力／電圧）を掛け合わせたものである。いずれの起振振動数でも電圧は5Vと一定であるが、圧電振動板は幾何学的形状に基づく固有振動特性を有しているので、共振振動数でオン／オフを繰り返したときに最も大きな起振力が得られる。一方、構造物の応答加速度は、電圧のフーリエスペクトル（電圧）と圧電振動板の伝達関数（力／電圧）を掛け合わせ、さらに構造物の伝達関数（加速度／力）を掛け合わせたものである。よって、圧電振動板の共振振動数に近く、かつ構造物の共振振動数にも近い振動数で起振すれば、大きな応答加速度が得られることになる。

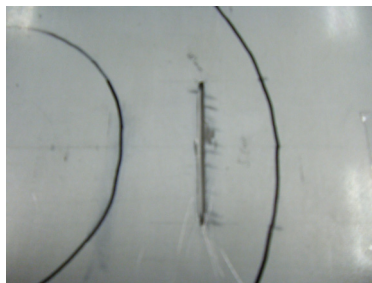
なお、圧電振動板に印加される電圧は既知であるが、圧電振動板の伝達関数（力／電圧）が未知であるため起振力の大きさも未知である。しかし、圧電振動板に印加される電圧が同じであれば、常に同じ起振力が励起されるため、地震前後の応答加速度の変化を調べれば、損傷に伴う振動特性の変化を検出できると考える。



(a) 健全モデル（全体図）



(b) 損傷モデル 1（損傷部）



(c) 損傷モデル 2（損傷部）

写真-1 供試体

表-1 亀裂のサイズ

モデル名	幅(mm)	長さ(mm)
損傷モデル 1	2	10
損傷モデル 2	2	50

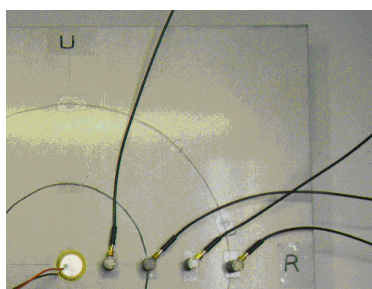


写真-2 アクチュエータ加振部と加速度センサの設置状況

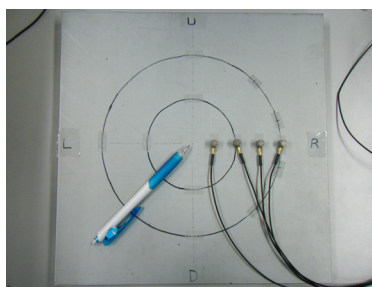


写真-3 シャープペンシルの芯圧折点と加速度センサの設置状況

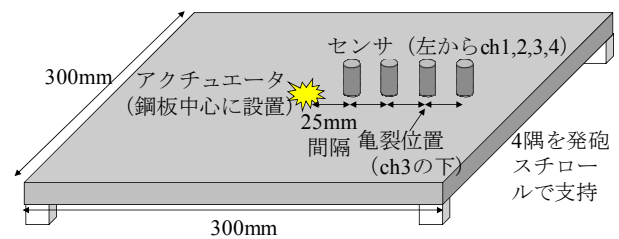


図-5 供試体，アクチュエータ，センサ，亀裂の相互関係

3. 鋼板の振動実験の概要

3.1 供試体

供試体は、縦 300mm、横 300mm、厚さ 3.2mm の鋼板である。設置方法は、鋼板を伝播する弾性波だけを対象とするような理想に近い状態にするため、四隅に発泡スチロールを敷き、その上に鋼板を置いた¹⁰⁾。鋼板は、亀裂のない健全モデルと、中央から右側に 75mm 離れた位置に長さ 10mm の亀裂を与えた損傷モデル 1 と、長さ 50mm の亀裂を与えた損傷モデル 2 の 3 通りとした。亀裂の幅はいずれも 2mm である。写真-1(a)に健全モデルの全体図、写真-1(b),(c)に損傷モデル 1, 2 の損傷部の拡大図、表-1 に亀裂のサイズを示す。鋼板に円が 2 つ描かれてあるが、内側の円の半径は 50mm、外側の円の半径は 100mm であり、円の中心は鋼板の中心に一致する。

3.2 アクチュエータの設置

写真-2 に示すように、圧電振動板の金属板に比較的強力な両面テープを付けて鋼板の中心に接着した。円形の圧電素子のたわみ振動を加振源としているため、起振力の入力方向は 1 方向ではないが、複数の方向の応答加速度を比較した結果、主たる加振方向は圧電振動板の面に直交する方向であると判断した。アクチュエータによる応答加速度との比較のため、シャープペンシルの芯圧折による応答加速度も計測した。写真-3 に示すように、鋼板の中心でシャープペンシルの芯を折り、衝撃力を発生させた。

3.3 センサの設置

計測には、時刻同期の取れた圧電型の加速度センサを 4 つ用いた。センサの共振振動数は 55kHz で、フラットな振動数特性が保証されているのは 16.5kHz までである。このセンサを強力な両面テープを用いて写真-2,3 のように供試体に接着し、鋼板の面に直交する方向の加速度を計測した。センサをチャージアンプに接続して増幅し、デジタルオシロスコープで波形を記録した。センサは、加振点（鋼板の中心）から右側に 25mm、50mm、75mm、100mm の 4 地点にライン状に設置し、それぞれのセンサを ch1, ch2, ch3, ch4 と呼ぶこととした。損傷モデルでは、亀裂（75mm 地点）の上に両面テープを貼ってセンサ（ch3）を設置した。図 5 に供試体，アクチュエータ，センサ，亀裂の相互関係を示す。アクチュエータで起振したときは、定常状態になってからの応答加速度を記録した。シャープペンシルの芯圧折のときは、初動の立ち上がりでトリガーをかけて

表-2 損傷の有無の判断に用いる振動特性

加振源	1つ目	2つ目	3つ目
アクチュエータ	起振振動数でのフーリエ振幅	起振振動数でのフーリエ位相差	—
シャープペンシル	伝播時間と伝播距離の関係	フーリエスペクトル	時間一周波数特性

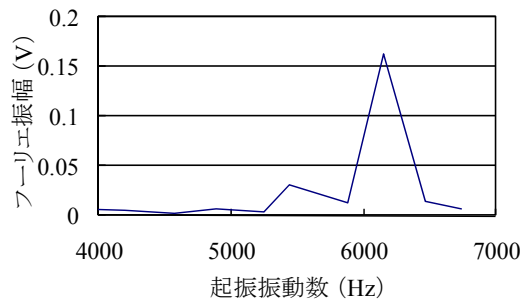


図-6 起振振動数とフーリエ振幅の関係

記録をスタートさせた。データのばらつきを調べるために、各ケース 5 回ずつ計測を行った。計測時間間隔は、アクチュエータで起振したときは 4 マイクロ秒とした。シャープペンシルの芯圧折のときは、4 マイクロ秒と 0.1 マイクロ秒の 2 通りとした。いずれも、2500 ポイントのデータ数を記録した。

3.4 損傷の有無の判断に用いる振動特性

(1) アクチュエータで起振するとき

アクチュエータで起振するときは、表-2 に示す起振振動数における応答加速度のフーリエ振幅と、フーリエ位相差の 2 つを損傷の有無を判断する指標として用いた。フーリエ位相でなくフーリエ位相差を用いた理由は、アクチュエータとセンサ間の時刻同期が取れていないためである。ch1 のフーリエ位相との差を用いた。

(2) シャープペンシルの芯圧折で衝撃力を与えるとき

シャープペンシルの芯圧折で衝撃力を与える場合は、表-2 の 3 つの指標を用いた。時間領域の振動特性は、応答加速度の各センサ間の伝播時間と伝播距離の関係を用いた。時間領域の解像度を上げるため、計測時間間隔を 0.1 マイクロ秒としたときの計測結果を用いた。振動数領域の振動特性は、応答加速度のフーリエ振幅を用いた。計測時間間隔が 4 マイクロ秒の計測結果を用いた。時間一周波数特性は、連続ウェーブレット変換により求めた。マザーウェーブレットには、ウェーブ数 6 の Morlet ウェーブレットを用いた。計測時間間隔が 4 マイクロ秒の計測結果を用いた。

3.5 起振振動数と応答加速度のフーリエ振幅の関係

大きな応答加速度が得られる起振振動数を探るため、健全モデルの鋼板を、約 4000Hz～7000Hz の様々な基本振動数を有する矩形波で起振し、加振点から右側に 50mm 離れた ch2 のセンサで定常状態の応答加速度を計測した。応答加速度のフーリエ変換を行ったところ、起振振動数において明瞭なピークが確認されたので、起振振動数におけるフーリエ振幅を読み取った。

図-6 に、起振振動数と、起振振動数におけるフーリエ振幅の関係を示す。縦軸は加速度単位でなく電圧単位で示しているが、ここではフーリエ振幅の大きさの相対関係について議論することを目的としているため、縦軸の単位は重要ではない。

図-6 は、圧電振動板に与えた電圧のフーリエスペクトル（電圧）と、圧電振動板の伝達関数（力／電圧）と、鋼板の伝達関数（加速度／電圧）を掛け合わせたものである。

約 6100Hz で最も大きなフーリエ振幅が得られているが、この振動数は圧電振動板の共振振動数に相当するものである。また、約 5500Hz におけるフーリエ振幅の方が約 5860Hz におけるフーリエ振幅よりも大きい、これは鋼板の伝達関数が 5500Hz の方が大きいためであると考えられる。約 5200Hz 以下でのフーリエ振幅は、圧電振動板の共振振動数におけるフーリエ振幅と比べて 1/25 以下と非常に小さい。よって、大きなフーリエ振幅を得るには圧電振動板の共振振動数である約 6100Hz 付近の振動数を選ぶ必要のあること明らかである。以上の検討から、本研究では起振振動数として、約 5500Hz、5860Hz、6100Hz の 3 通りの起振振動数で鋼板を起振することとした。約 5500Hz は鋼板の共振振動数の 1 つに相当し、約 6100Hz は圧電振動板の共振振動数に相当し、約 5860Hz はその間にある振動数である。

4. 損傷に伴う鋼板の振動特性の変化

(アクチュエータで起振した場合)

4.1 起振振動数におけるフーリエ振幅

(1) 健全モデルのフーリエスペクトル

まず、鋼板がどの程度の加速度で振動しているのかを明らかにするために、健全モデルを例にとり、約 5500Hz、5860Hz、6100Hz の 3 通りの起振振動数で起振したときの各センサのフーリエスペクトルを図-7 に示す。5 回計測した中の 1 回目の計測結果である。約 5500Hz と 6100Hz で起振したとき（図-7(a)(c)）は、起振振動数において明瞭なピークが見られる。一方、約 5860Hz で起振したとき（図-7(b)）は振幅が小さく、ch3 の応答は鋼板の共振振動数と見られる約 7200z と 7800Hz の振幅の値より小さい。

(2) 起振振動数におけるフーリエ振幅の変化

次に、起振振動数におけるフーリエ振幅の値を読み取り、5 回の計測結果がどの程度ばらついているのか、損傷に伴ってフーリエ振幅がどのように変化するか調べる。図-8, 9, 10 に、約 5500Hz、5860Hz、6100Hz のそれぞれの振動数で起振したときに各センサで計測されたフーリエ振幅をモデル毎に示す。凡例は 5 回計測の各回に対応している。ばらつきの定量評価のため、5 回計測の標準偏差も併せて示す。起振振動数によって形状も大きさも異なっている。断っておくが、図-8, 9, 10 に示す形状は、鋼板の各点のフーリエ振幅を 25mm 間隔で抽出して折れ線で結んだものであり、鋼板が図中の形状で振動しているわけではない。

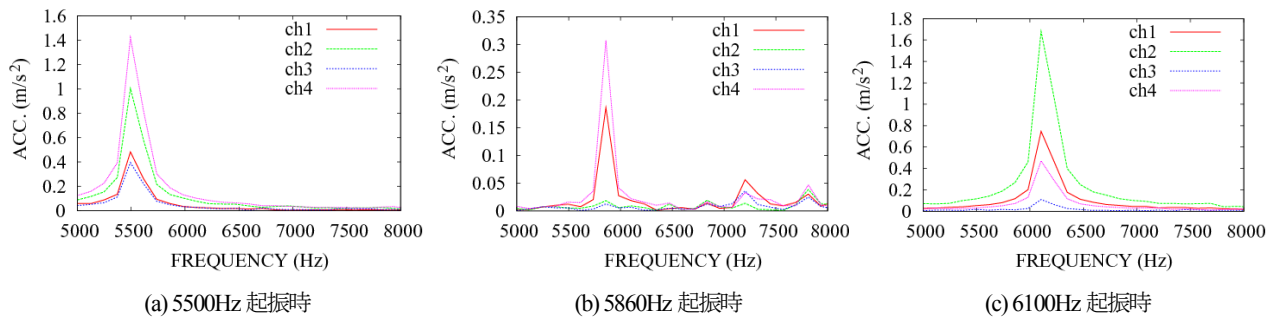


図-7 健全モデルのフーリエスペクトル (第1回目計測分)

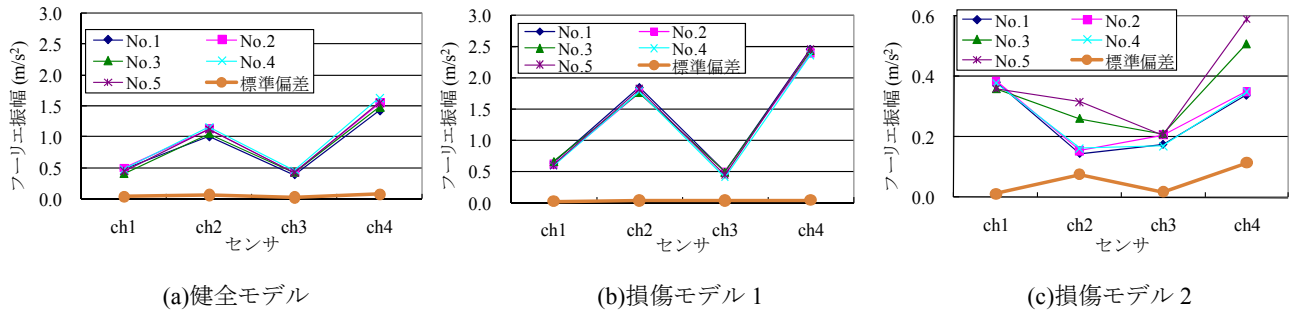


図-8 損傷に伴うフーリエ振幅の変化 (5500Hz 起振時)

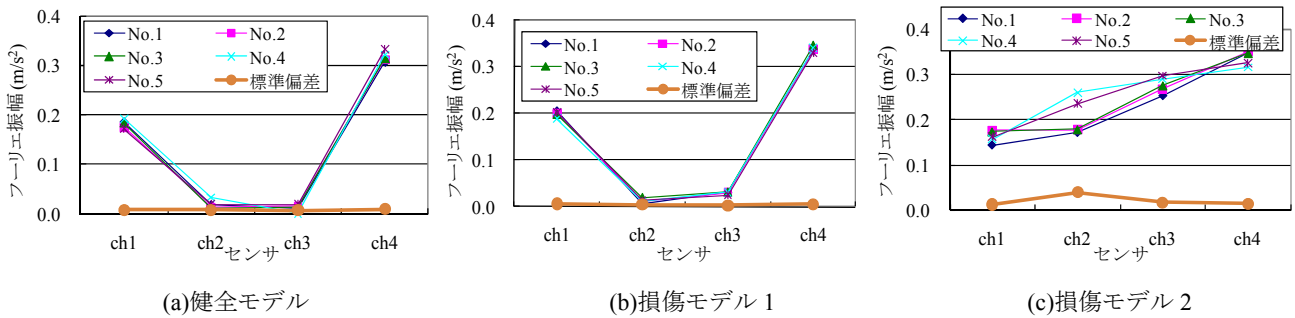


図-9 損傷に伴うフーリエ振幅の変化 (5860Hz 起振時)

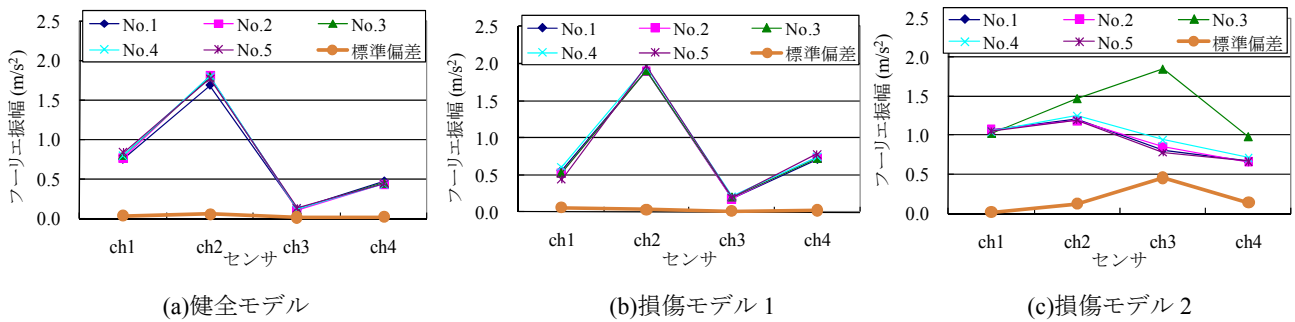


図-10 損傷に伴うフーリエ振幅の変化 (6100Hz 起振時)

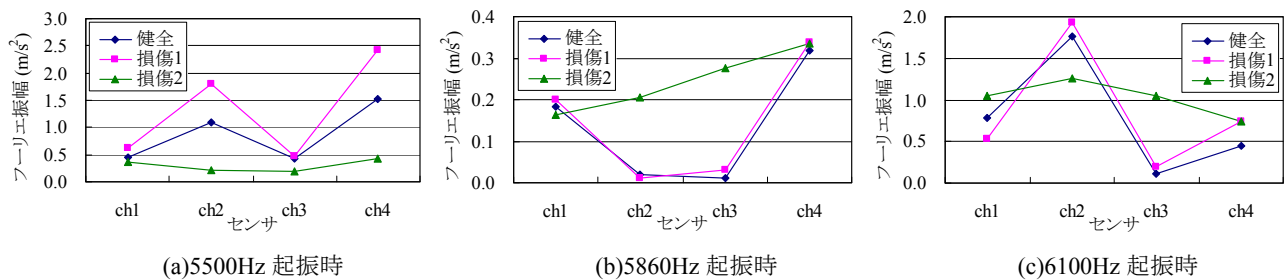


図-11 損傷に伴うフーリエ振幅の変化 (5 回計測の平均)

5回の計測結果のばらつきを表わす標準偏差を各モデルで比較すると、健全モデルと損傷モデル1の標準偏差は小さいが、損傷モデル2では両モデルよりも大きな標準偏差となった。亀裂が長い損傷モデル2では、亀裂部で波動の伝播が複雑になるため、センサや加振部の僅かな接着の差異によって計測結果にばらつきが生じたものと考えられる。

図-11に、5回の計測の平均値を健全、損傷1、損傷2の3つのモデルで比較したものを示す。約5500Hzで起振したとき（図-11(a)）、損傷モデル1は健全モデルとフーリエ振幅の形状が良く似ているが、振幅の値は損傷モデル1の方が大きく、健全モデルで振幅の大きいch2とch4の振幅が損傷によって更に大きくなっており（ch2では1.64倍、ch4で1.59倍）、損傷による有意な違いが見られる。損傷モデル2のフーリエ振幅は、健全モデルのフーリエ振幅と形状が大きく異なっており、値も小さく、損傷による有意な違いが見られる。約5860Hzで起振したとき（図-11(b)）、損傷モデル1は健全モデルとフーリエ振幅の形状も値もほとんど同じである。図-8, 9の5回計測の標準偏差よりも損傷による差の方が僅かに大きく見えて取れるが、損傷による差は他の振動数に比べて非常に小さい。損傷モデル2については、形状、振幅ともに損傷による有意な違いが見られる。約6100Hzで起振したとき（図-11(c)）、損傷モデル1は健全モデルとフーリエ振幅の形状が良く似ているが、値には損傷による差が見られる。健全モデルで振幅の大きいch2の振幅に大きな変化はないものの、例えばch4の振幅は1.69倍も大きくなっており、約5860Hzで起振したときよりも損傷に伴う差は大きい。損傷モデル2については、形状、振幅ともに損傷による有意な違いが見られる。以上を整理すると、長さ10mmの亀裂を与えた損傷モデル1については、約5500Hzで起振した場合にはフーリエ振幅に損傷による有意な差が見られるが、約5860Hzで起振した場合には有意な差が見られない。約6100Hzで起振した場合には5500Hzで起振したときほど明瞭ではないが、損傷による差が見られる。長さ50mmの亀裂を与えた損傷モデル2では、いずれの振動数でもフーリエ振幅に損傷による有意な差が見られた。

損傷モデル1に関して、約5500Hzで起振した場合に損傷による有意な差が最も顕著に見られた理由は、以下の通りであると考えられる。健全モデルでは、5500Hzは共振振動数とは一致していないため振幅が小さいが、損傷モデル1では、損傷により共振振動数が減少し5500Hzに近づいたために、5500Hzで起振した際の振幅が大きくなったものと考えられる。約5860Hzで起振したときに損傷に対する有意な差が見られなかった理由は、共振振動数から大きく離れているため、10mmの亀裂によって共振振動数が減少しても5860Hzのフーリエ振幅に影響が及ばなかったものと考えられる。約6100Hzで起振したときは、5500Hzで起振したときとは別のモードの共振振動数の減少の影響を受けて応答が変わったものと考えられる。

一方、損傷モデル2では全ての振動数で損傷による有意な差が見られたのは、起振振動数が共振振動数に近づくことによってフーリエ振幅の値が大きくなるといった共振

振動数の変化による影響だけでなく、長い亀裂によって鋼板の振動モード自体が変化したことによる影響もあると考えられる。仮に、図-8(a)に示される4つのセンサのフーリエ振幅を結んだ形状を正弦波の1波長と見なすと、各センサ間の距離は25mmであるため、波長は75mm、半波長は37.5mmとなる。亀裂長さ50mmよりも半波長の長さ37.5mmの方が短いので、その振動数成分のフーリエ振幅が変化するのは明らかである。なお、図-8(a)の形状は鋼板の振動形状を25mm間隔で抽出したものであるため、実際の半波長は37.5mmよりも更に短いものであると予想される。同様の考察から、損傷モデル1の亀裂長さ10mmは鋼板の振動の波長に比べて短いため、振動特性が損傷モデル2のときほど明瞭に変化しなかったものと考えられる。

(3) まとめ

約5500Hz～6100Hzの高振動数で鋼板を起振した場合、短い波長を励起させることができるため、いずれの振動数でも50mmの亀裂を検出することが可能である。波長より短い10mmの亀裂を検出するには、圧電振動板の共振振動数と鋼板の共振振動数の両方に近い約5500Hzで鋼板を起振すればよい。なお、圧電振動板の形状を変更して共振振動数を高くすれば、より短い波長の振動を低電圧で励起することができるため、より短い亀裂の検出が可能になると期待される。

4.2 起振振動数におけるフーリエ位相差

(1) 起振振動数におけるフーリエ位相差の変化

次に、起振振動数におけるフーリエ位相差を読み取り、5回の計測結果がどの程度ばらついているのか、損傷に伴ってフーリエ位相差がどのように変化するのか調べる。図-12, 13, 14に、約5500Hz, 5860Hz, 6100Hzのそれぞれの振動数で起振したときの各センサで計測されたフーリエ位相差を、モデル毎に示す。各センサとch1とのフーリエ位相差を求めた。凡例は5回計測の各回に対応している。ばらつきの定量評価のため、5回計測の標準偏差も併せて示す。

5回の計測結果のばらつきを表わす標準偏差を各モデルで比較すると、約5500Hzと6100Hzで起振したときは、健全モデルと損傷モデル1の標準偏差は小さく、損傷モデル2の標準偏差はそれよりも大きい。一方、約5860Hzで起振したときは、いずれのモデルでも標準偏差が大きい。振幅が小さいため、誤差の混入などにより、ばらつきが大きくなったと考えられる。フーリエ振幅よりもフーリエ位相差の方がばらつきが大きい、この理由は、フーリエ振幅は絶対値であるが、フーリエ位相差は相対値であるためであると考えられる。

図-15に、5回計測の平均値を健全、損傷1、損傷2の3つのモデルで比較したものを示す。約5500Hzで起振したとき（図-15(a)）、損傷モデル1のフーリエ位相差は健全モデルとほぼ同じであり、損傷による有意な差が見られるとはいいがたい。一方、損傷モデル2では、図-12のばらつきを考慮に入れても損傷による有意な差が見られる。

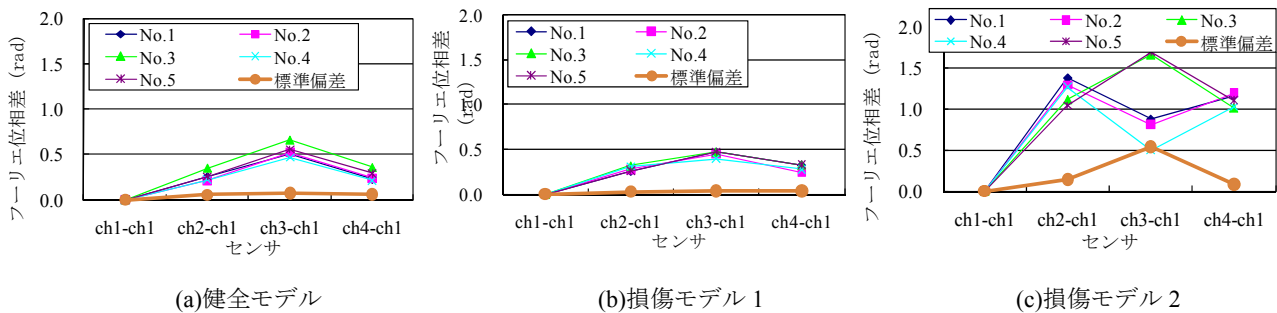


図-12 損傷に伴うフーリエ位相差の変化 (5500Hz 起振時)

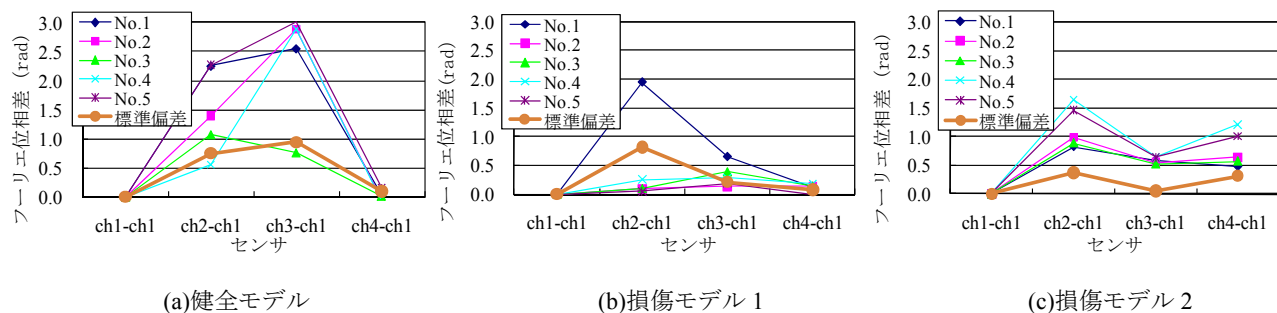


図-13 損傷に伴うフーリエ位相差の変化 (5860Hz 起振時)

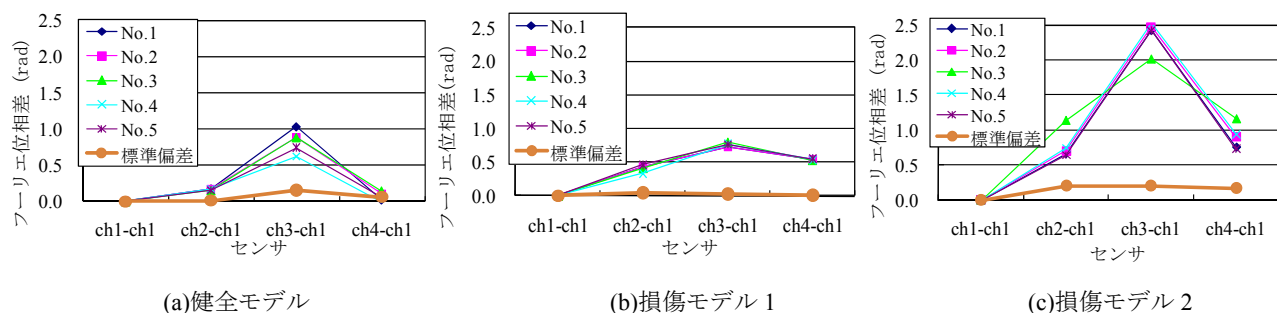


図-14 損傷に伴うフーリエ位相差の変化 (6100Hz 起振時)

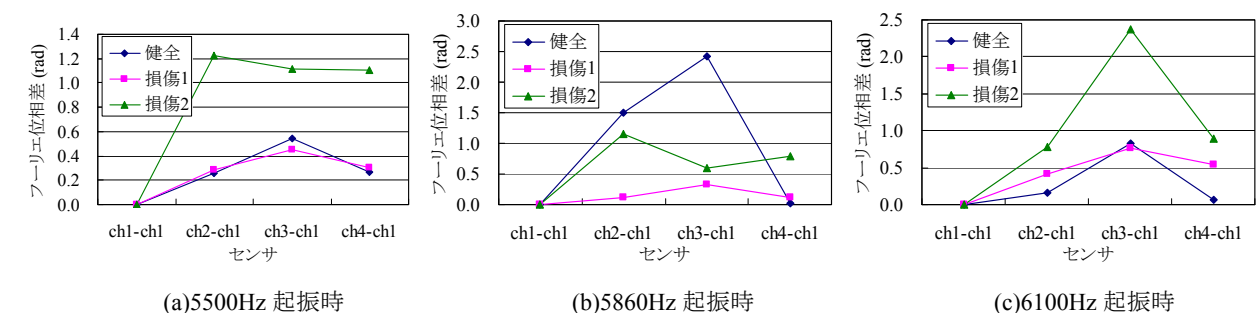
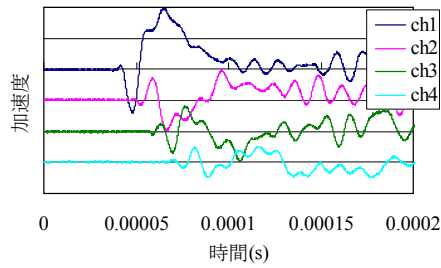


図-15 損傷に伴うフーリエ位相差の変化 (5 回計測の平均)

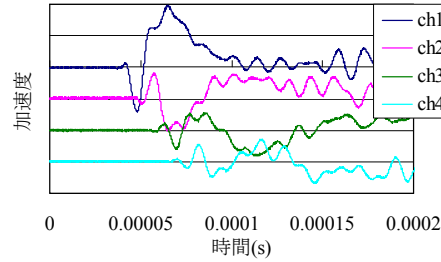
約 5860Hz で起振したとき (図-15(b))，損傷モデル 1 も損傷モデル 2 も健全モデルと大きく異なっている。しかし，図-13 のようにばらつきが大きいため，損傷による差異であるのか，ばらつきの範囲であるのか，区別することが困難である。約 6100Hz で起振したとき (図-15(c))，損傷モデル 1 は健全モデルとグラフの形が違うが，図-14 のばらつきを考慮すると損傷による有意な差が見られるとは言い難い。一方，損傷モデル 2 では損傷による有意な差が見られる。

(2) まとめ

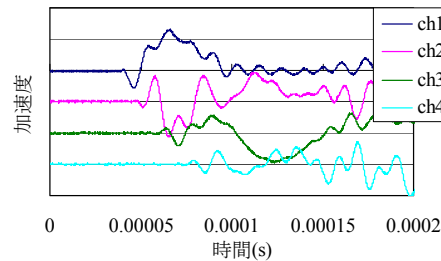
フーリエ位相差はフーリエ振幅に比べ，計測毎のばらつきが大きく，損傷に対する感度が小さい。大きな加速度応答が得られた約 5500Hz と 6100Hz で起振した場合には，損傷モデル 2 の損傷を検出することができるが，損傷モデル 1 の損傷を検出することはできない。加速度振幅の小さい約 5860Hz で起振した場合は，計測毎のばらつきが大きいため，いずれの損傷も検出することができない。



(a)健全モデル



(b)損傷モデル 1



(c)損傷モデル 2

図-16 シャープペンシルの芯圧折による応答加速度の時刻歴

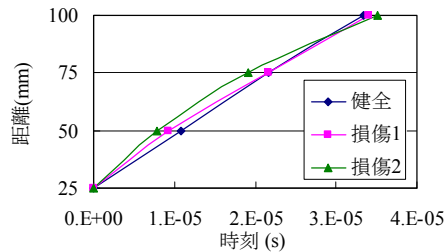


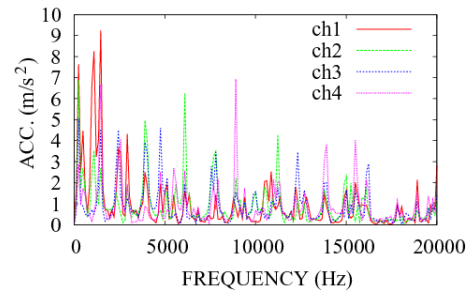
図-17 伝播時間と伝播距離の関係 (シャープペンシルの芯圧折)

5. 損傷に伴う鋼板の振動特性の変化 (シャープペンシルの芯圧折で衝撃力を与えた場合)

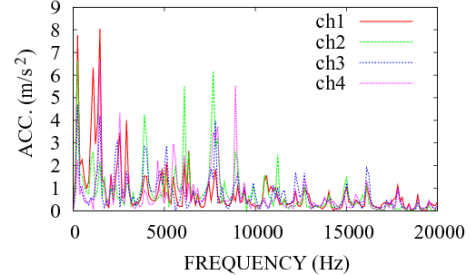
5.1 伝播距離と伝播時間の関係

図-16 に、各センサで計測された加速度波形をモデル毎に示す。5 回計測のうちの 1 回目の記録を示している。ch1 から ch4 に振動が伝播する様子が分かるように、各センサの基線をずらして図化している。波形形状を比較することを目的としているので、縦軸にスケールを示さず、4 つのセンサの加速度を同じ比率でスケールしている。

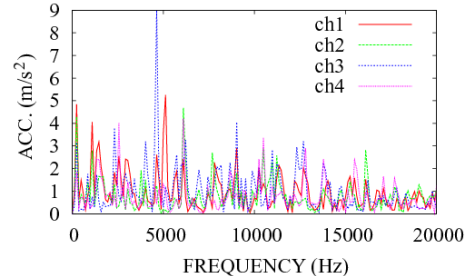
図-17 に、各モデルの伝播時間と伝播距離の関係を、ch1 を基準にとって示す。伝播時間は初動の到達時間より計算した。亀裂部位より後方にあるセンサへの到達時間が遅くなると予想したが、有意な差は見られなかった。



(a)健全モデル



(b)損傷モデル 1



(c)損傷モデル 2

図-18 シャープペンシルの芯圧折による応答のフーリエスペクトル (モデル毎)

5.2 フーリエスペクトル

図-18 に、20000Hz (20kHz) までのフーリエスペクトルをモデル毎に比較する。図-19 に、100000Hz (100kHz) までのフーリエスペクトルをセンサ毎に比較する。いずれも 5 回計測のうちの 1 回目の記録を示している。

図-18, 19 より、損傷モデル 1 は健全モデルに比べ、約 10000Hz 以上の振動数領域の振幅が小さくなっていることがわかる。損傷モデル 2 では、健全モデルと損傷モデル 1 の両モデルで見られる約 2000Hz 以下の大きな振幅が見られない (図-18(c))。これらの理由として、既往の研究でも示されているとおり¹⁰⁾、亀裂長さより短いまたは亀裂長さと同程度の波長を有する波が損傷部にトラップされて伝播されにくくなるためであるという仮説が立てられる。損傷モデル 2 の亀裂長さは損傷モデル 1 より長いので、約 2000Hz 以下の振動数特性まで変化したという仮説も立てることができる。しかし、10000Hz 以上の高振動数領域を比較すると、損傷モデル 1 の振幅は健全モデルの振幅より小さいが、損傷モデル 2 の振幅は損傷モデル 1 の振幅よりも大きく、必ずしも損傷のあるモデルの高振動数領域のフーリエ振幅が減少しているわけではない。そもそも、計測毎に衝撃力が異なるため、損傷だけによる応答の違いを抽出することが困難である。

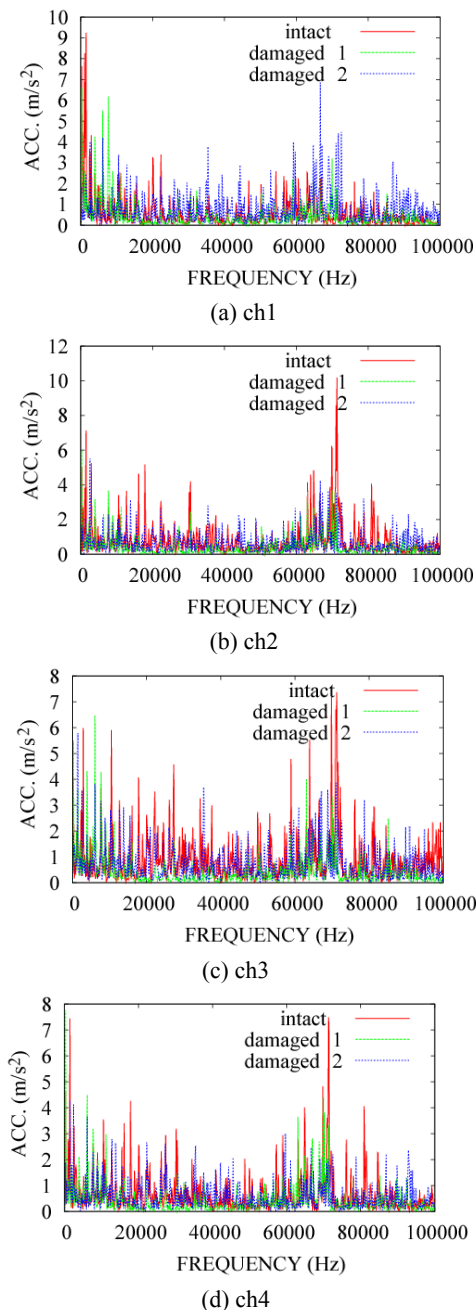


図-19 シャープペンシルの芯圧折による応答のフーリエスペクトル (センサ毎)

芯圧折に比べ、アクチュエータで起振したときのフーリエ振幅は、損傷による差がより明瞭である (図-11)。また、アクチュエータの場合は、常に同じ起振力を与えることが可能であるので、芯圧折よりもアクチュエータを用いた方が安定して明瞭に損傷の有無を判断することが可能であると考えられる。

5.3 時間一周波数特性

図-20, 21, 22 に、健全、損傷 1、損傷 2 のそれぞれのモデルの各センサで記録された加速度波形の時間-周波数特性を示す。時間-周波数特性は連続ウェーブレット変換により求めた。マザーウェーブレットは、ウェーブ数 6 の Morlet ウェーブレットを用いた。損傷による違いが見られ

る 10kHz~100kHz の応答のみ示す。加速度振幅は同じ縮尺でスケールしている。加速度の絶対値は議論の対象でないため省略する。健全モデルと損傷モデル 1 (図-20, 21) では、芯を折った直後からの応答加速度を記録したが、損傷モデル 2 (図-22) では、約 1 ミリ秒のプレトリガー部分も含めて記録している。記録開始時間に違いがあるが、それ以外は同じ条件で記録している。

損傷は ch3 のセンサを設置した位置に存在する。そこでまず、損傷の前方 (加振点側, ch1, ch2), 損傷位置 (ch3), 損傷の後方 (加振点から遠ざかる側, ch4) に分けて応答を比較する。損傷モデル 2 (図-22) では、損傷箇所にある ch3 の応答が、前方および後方にあるセンサの応答よりも小さく、特に約 20kHz 以上の高い振動数領域の応答の減少割合が大きい。ch1~ch4 の時間一周波数特性を比較すれば、ch3 に振動特性を変化させる何かがあると判断することは容易であると考えられる。また、損傷の前方にある ch1, ch2 の応答に比べ、損傷の後方にある ch4 の応答は高い振動数領域において増加している。一方、損傷モデル 1 (図-21) では、各センサの応答間に明瞭な違いは見られない。

次に、健全モデル (図-20) と損傷モデル 1 (図-21) の時間一周波数特性を比較すると、波形形状は異なるものの、損傷による違いであるのか、衝撃力の違いによるものかを区別することは難しいと考えられる。

以上より、時間一周波数特性を用いて損傷モデル 2 の 50mm の亀裂を検出すること、ch3 の位置に振動特性を変化させる何か (亀裂) があると推定することは可能である。これは、同じ衝撃力に対する応答をセンサ間で比較しているために可能である。しかし、時間一周波数特性を用いて損傷モデル 1 の 10mm の亀裂を検出することは難しい。同じ衝撃力に対する応答をセンサ間で比較しても、異なる衝撃力による健全モデルと損傷モデル 1 の応答を比較しても、明瞭な違いは見られない。

6. まとめ

本研究では、数キロヘルツの高振動数で構造物を起振することのできるアクチュエータを作成し、鋼板に与えた損傷 (亀裂) を検出できるかどうか実験により検討を行った。損傷の有無を判断する指標として、起振振動数における加速度のフーリエ振幅とフーリエ位相差の 2 つを想定した。まず、3 通りの高振動数で鋼板を起振し、損傷によってフーリエ振幅とフーリエ位相差がどのように変化するかと計測毎のばらつきの程度を調べた。次に、アクチュエータによる起振との比較のため、シャープペンシルの芯圧折によって衝撃力を与えたときの応答加速度を計測し、伝播時間-伝播距離の関係、フーリエスペクトル、時間一周波数特性が損傷によってどの程度変化するのか調べた。その結果、常に同じ高振動数領域の起振力を発生することのできるアクチュエータを用いて、圧電振動板の共振振動数と構造物の共振振動数の両方に近い振動数で起振し、損傷に対する感度が高く応答のばらつきが小さいフーリエ振幅を指標とすれば、シャープペンシルの芯圧折では検出できな

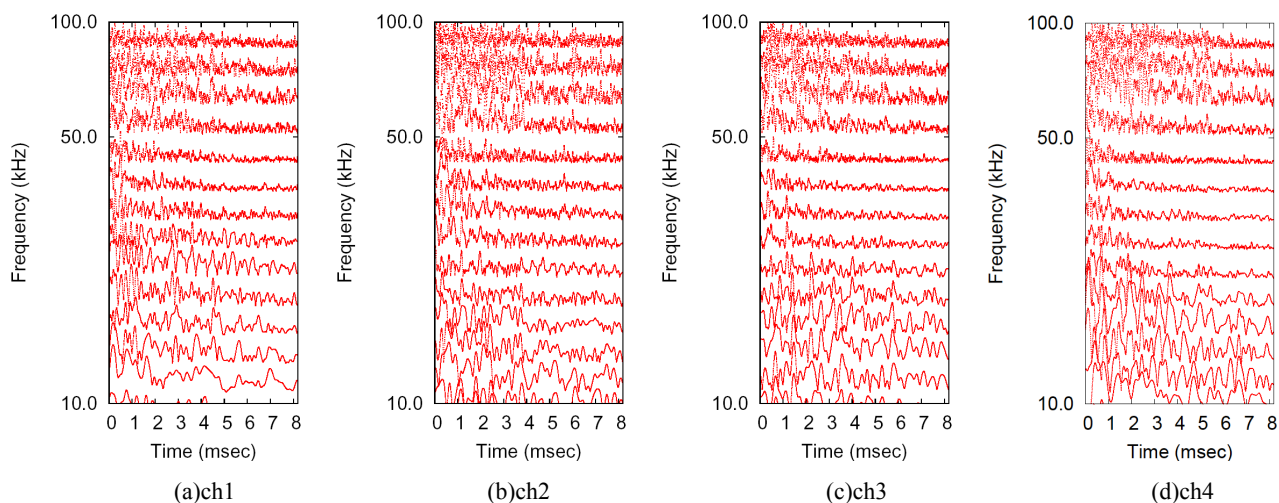


図-20 シャープペンシルの芯圧折による応答の時間-周波数特性（健全モデル）

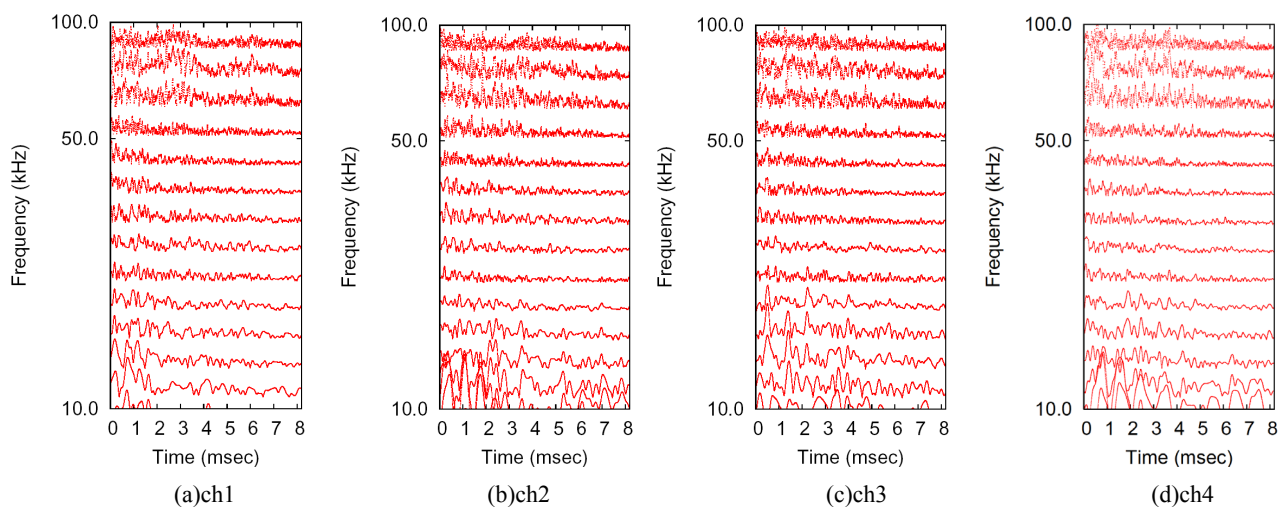


図-21 シャープペンシルの芯圧折による応答の時間-周波数特性（損傷モデル 1）

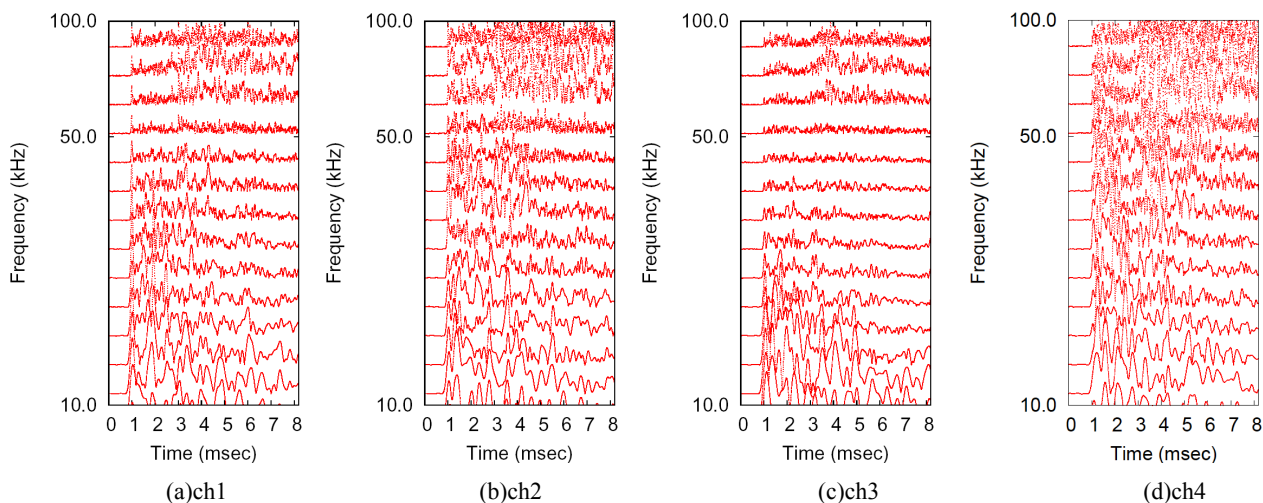


図-22 シャープペンシルの芯圧折による応答の時間-周波数特性（損傷モデル 2）

い亀裂レベルの小さな損傷を検出できることがわかった。

本研究の検討内容は、鋼板にかけた亀裂を対象とした極めて限定的なものである。一般化、実用化のためには、数値解析による検証、損傷の程度と応答の変化の関係の解明、定量的な損傷評価手法の確立とその理論的な裏付けなどが必要であり、今後の課題であると考え。

謝辞

本研究は、平成 21 年度科学研究費補助金の援助を受け、執り行われたものであります。ここに感謝の意を表し厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小林寛, 運上茂樹, 加納匠: 加速度センサを用いた道路橋の地震時被災度判定手法の開発, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 2005.
- 2) 本多弘明, 堀宗朗: 地震被害応急判定を目的とした構造物の復元力特性の計測方法の開発, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2009.
- 3) Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., and Shevitz, D.W.: Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, Report LA-13070-MS, Los Alamos National Laboratory, USA, 1996.
- 4) 古川愛子, 大塚久哲, 梅林福太郎: マイクロ起振器を用いた振動実験による鋼トラス橋の損傷同定, 応用力学論文集, Vol.9, pp.1103-1110, 2006.
- 5) 古川愛子, 大塚久哲, 梅林福太郎, 構造物の損傷に伴う振動特性の変化に関する実験的考察, 土木学会地震工学論文集, 第 28 巻, 論文番号 019, 論文, 2005 年 8 月.
- 6) 阿部雅人, 藤野陽三, 長山智則, 池田憲二: 常時微動計測に基づく非比例減衰系の構造同定と長大吊橋への適用例, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.261-274, 2001.
- 7) Ohtsu, M., Shigeishi, M., Sakata, Y.: Nondestructive evaluation of defects in concrete by quantitative acoustic emission and ultrasonics, Ultrasonics, Vol.36, pp.187-195, 1998.
- 8) 村田製作所: PIEZOELECTRIC SOUND COMPONENTS, <http://www.murata.co.jp/catalog/p43j6.pdf>, 2003.
- 9) FDK CORPORATION: 圧電ブザー注意書き, <http://www.fdk.co.jp/cyber-j/pdf/bz-caution.pdf>, 2008.
- 10) 盛川仁, 村上琢哉: 地震直後対応としての鋼構造物における亀裂の簡易な存否判定のための基礎的検討, 応用力学論文集, Vol.10, pp. 649-656, 2007.

(2010 年 3 月 9 日 受付)