

# 音響解析による共振現象検出手法の開発

## — 供試品モデルを用いた実験的検証 —

君田隆男・中嶋隆勝・津田靖子

### The Development of Resonance Detection Method Using Acoustic Analysis

#### — Experimental verification of the method by model of specimen —

Takao KIMITA, Takamasa NAKAJIMA and Yasuko TSUDA

製品の輸送中や稼動中に起こる損傷事故の主要な原因の一つに、共振現象がある。製品の振動耐久性や共振現象について調べるために振動試験が行われているが、共振現象の検出手法は明確に定められておらず、経験や勘に頼っているのが実情である。そこで筆者らは、音響解析による共振現象検出手法を考案した。本手法は、振動試験時に供試品の発する音を計測・解析することで、共振現象を検出する手法である。本研究では、音響解析による共振現象検出手法を実験的に検証するために、供試品モデルの加振実験を行った。さらに、音響解析による手法と従来から一般的に行われている振動計測による手法とを比較した。結果、音響解析による共振現象の検出手法は、従来からの振動計測による手法と比較し、より簡単に製品全体の共振現象を検出できることを明らかにした。

We have developed a resonance detection method using acoustic analysis. The resonance is major reason of product damage under transportation. Therefore the vibration test before shipping is very important. Conventional methods to detect resonance have many problems: it depends on experience and cannot be applied to the random vibration test. We measured and analyzed the sound emitted from specimen of the vibration test. In this report, rectangular steel plates as model of specimen were adopted. We conducted the vibration tests, and compared the proposed method and the conventional method that uses vibration measurement. The proposed method can easily detect the resonance comprehensively.

キーワード：音響解析、共振現象、振動試験、振動計測、製品損傷、音圧、加速度

Keywords : acoustic analysis, resonance, vibration test, vibration measurement, product damages, sound pressure, acceleration.

## 1. はじめに

あらゆる製品の輸送中や稼働中に起こる損傷事故の主要な原因の一つに、共振現象がある。近年、共振現象が原因となって起こった重大事故も多発している。一方、製品の振動耐久性や共振現象について調べるために、JISやISO等の規格に規定される振動試験が、さまざまな業界で行われている。しかしながら、振動試験における共振現象の検出手法は、かねてより明確にされていない。また、2004年のJIS規格の改正により<sup>1)</sup>、包装貨物振動試験の基本が、これまでの正弦波掃引試験からランダム振動試験に変更された。これに伴い、共振現象の検出はますます難しくなり、規格の記述からも、「共振」という言葉が見られなくなっている。しかし、振動耐久性の面で振動試験をクリアしていたとしても、実際の輸送時に予期せぬ共振現象が起り、製品の損傷が生じることは少なくない<sup>2)</sup>。

従来から、共振現象の検出手法として、人間感覚を利用する手法と、振動計測による手法が一般に用いられている。人間感覚を利用する手法は、視覚、聴覚、触覚などを利用して共振現象を感覚的に検出する手法であり、振動計測による手法は、製品に貼り付けた加

速度ピックアップを用いて振動加速度を計測し、共振現象を検出する手法である。この2つの手法の特徴をTable.1に示す。従来法には問題も多く存在しており、経験や勘によるところが大きいのが実情である。損傷事故の未然防止、輸送包装機器の改良開発、製品損傷箇所の事前予測と言った観点から、振動試験時（特にランダム振動試験時）に共振現象を正確かつ簡単に検出する手法の確立が、非常に重要である。

そこで、新しい共振現象検出手法として、音響解析による手法を考案した。本手法は、振動試験時に供試品の発する音を計測し、さまざまな解析手法を駆使することで、供試品の共振現象を検出する手法である。

音響解析を用いて対象物の振動現象を調べる手法としては、機械状態監視や設備診断の分野に、多数の研究事例が見られる<sup>3)</sup>。しかしこれらの多くは、自らが振動している物体や現象を対象にした機械振動分野の事例であり、製品に振動を加えた際の振動応答特性を調べる目的で音の測定解析を用いる本研究の手法とは異なっている。また、振動試験供試品の共振現象を検出するために、音響解析を用いる手法について論じたものは報告されていない。

Table. 1 Characteristics of conventional methods to detect resonance

	ランダム振動試験	手法の容易さ	定量的評価	検出箇所
人間感覚による手法	× 対応不可	◎ 機器不要	× 感覚のばらつき	不特定（製品全体） 共振発生箇所の特定は困難
振動計測による手法	○ 対応可	△ センサ設置困難、面倒	◎	センサ設置場所中心 製品全体の検出は困難

本報では、音響解析による共振現象検出手法を実験的に検証するために、供試品モデルに対する加振実験を行い、音響解析による手法と従来から一般的に行われている振動計測による手法との比較検討を行った結果について報告する。

## 2. 音響解析による共振現象検出手法

供試品の共振時には、振動が増大し、部品同士のたたき合いやびびり、こすれなどが生じる。この際に発生する音を、マイクロホンを用いて計測し、その音圧データを解析することで、供試品の共振現象およびその振動数を検出する手法である。

ここで、本研究における「共振」の定義について述べる。機械工学用語辞典では、「減衰の小さい振動系の定常強制振動応答で、系の固有振動数付近で励振振動数のわずかな変化に対して振動応答振幅が急激に変化して極大になる状態または現象をいう」と定義されている<sup>4)</sup>。一般には、「共振(振動数) = 固有振動(数)」と捉えられることが多い。

これに対し本研究では、共振現象を「製品損傷の危険性を伴う過大な応答振動が発生する現象」と定義する。これは、輸送包装業界や振動試験において、製品や製品各部の固有振動よりも、製品の損傷や破壊、疲労に影響を及ぼす振動現象(例えば、部品同士のたたき合いやびびり、こすれ、など)が重要視されている<sup>5)</sup>ことに基づいた定義である。

しかし本手法では、音の発生しない共振現象は検出することができない。よって本手法の検出対象は、「音の発生を伴う製品損傷の危険性がある過大な応答振動」に限定される。ただ

し、筆者らが長年行ってきた振動試験においては、製品損傷の危険性がある共振現象が起きている場合、何らかの特徴的な音の発生を伴うことが多い。逆に、音の発生を伴う共振現象は、製品損傷の危険性が高いと言える。

本手法では、共振現象の発生の有無および、共振現象が発生している場合に、共振振動数を検出することが目的となる。しかし、マイクロホンからは、共振現象に関係のある音(以下、「共振音」と呼ぶ)だけでなく、共振現象に関係のない背景音(振動試験機稼働音や周囲の環境騒音など)も同時に計測される。同様に、供試品の複数箇所でも同時に共振現象が起きている場合、それぞれの共振音の合成音が計測される。個々の共振現象を正確に検出するためには、背景音の影響を低減・除去した後に、それぞれの共振音を、分離して捉える必要がある。

本研究では、これらを実現するために、測定方法および波形解析方法の検討を行う。本報告については、供試品モデルに対して3つの異なる加振条件で実験を行い、フーリエ解析(FFT)やパワースペクトル密度(PSD)などの周波数解析および時間-周波数解析、時間波形への周波数帯域フィルタの適用、時間波形からのピーク周期の読取と確率密度関数(PDF)の導入などについて、検討を行った。

## 3. 実験方法

供試品モデルとして、短冊形鉄板(以降、単に「試料」とする)を実験に用いた。寸法は、幅30mm×長180mmで、板厚が1mm(試料A)と2mm(試料B)の2種類である。実験装置をFig. 2に示す。2種類の試料を、

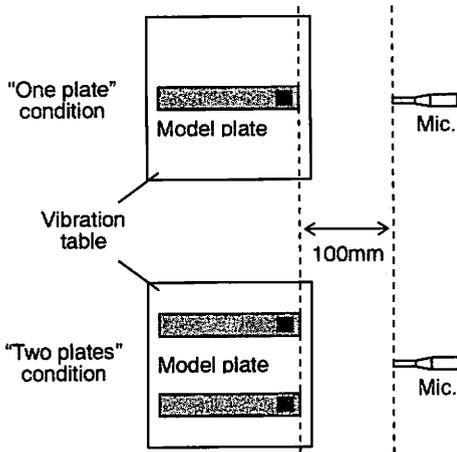
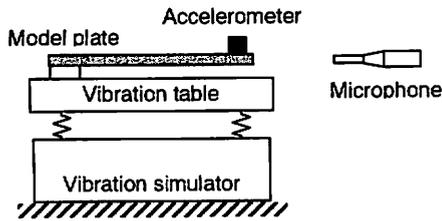


Fig. 2 Experimental setup

それぞれ1枚ずつ、あるいは2枚同時に振動試験機の振動台上に取り付けて実験を行った。音圧を計測するためのマイクロホン（精密騒音計/リオン社 NL-31/周波数範囲 20～20kHz）は、1枚のみ試料を取り付けた際にはその正面に、2枚同時に取り付けた際には、2枚の板からの距離が等しくなる位置に設置した。振動加速度を計測するための加速度ピックアップ（圧電型加速度ピックアップ/ブリュエル・ケアー社 Type4501/周波数範囲 0.1～16kHz）は、それぞれの試料に接着取付した。

加振条件は、正弦波対数掃引加振、正弦波一定加振、ランダム加振の3条件とした。加振した際に生じる音（音圧）と振動（振動加速度）を計測し、パソコン上で波形解析ソフトを用いて解析を行った。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1 正弦波対数掃引加振

振動台に試料Aのみ1枚を取り付け、正弦波対数掃引加振を行った結果を Fig. 3 に示す。5分間の加振時間において、加振振動数を5Hz から50Hz まで対数掃引させた。加振加速度は、加振振動数によらず  $9.8\text{m/s}^2$  一定とした。

振動加速度の時刻歴を示す Fig. 3 (a) において、振幅が急激に増大している時間帯（210～230秒）があり、共振現象が発生していることが確認できる。正弦波掃引加振の振動数に換算すると、25～29Hz で共振が起きていることになる。

音圧（生データ）の時刻歴を示す Fig. 3 (b) を見ると、ほぼ同じ時間帯で振幅が増大しており、音圧からも共振現象が検出できることがわかる。しかしながら、共振現象が発生している時間帯の振幅と、発生していない時間帯の振幅を比較すると、音圧ではその差があまり確保できていない。つまり、2で述べた、背景音の影響が大きいという音響解析による手法の欠点が顕著に現れている。

次に、音圧の時間-周波数解析結果である Fig. 3 (c) を見ると、共振現象が発生している時間帯において、音圧の高周波数帯域（約1500Hz 以上）に、強い成分が現れていることがわかる。これは、共振現象により振動が増大したことで、試料と振動台の間でたたき合いが起こり、その連続的な衝撃振動によって、試料の持つ高次の共鳴音が発生し、高周波数帯域に強い成分が現れたと考えられる。

これをもとに、音圧生データに遮断周波数5kHz のハイパスフィルタを掛け、その時刻

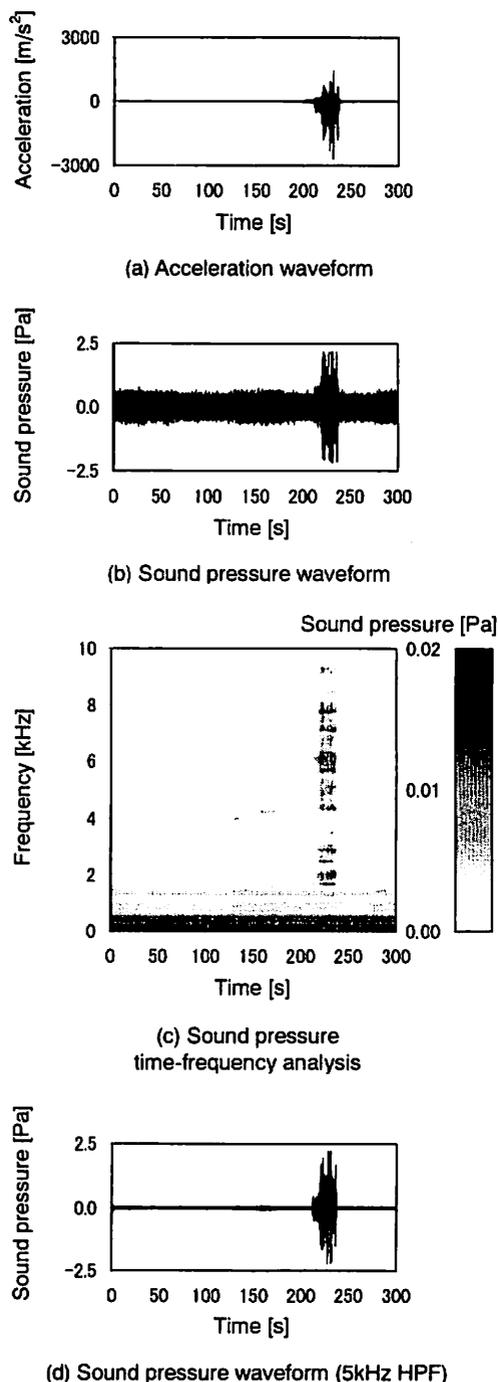


Fig. 3 Sin sweep test (logarithm)

Table. 2 Signal to Noise Ratio [dB]

Sample name	A	B
Acceleration	18.2	20.4
Sound pressure (raw data)	1.7	3.2
Sound pressure (1kHz HPF)	10.5	12.8
Sound pressure (5kHz HPF)	16.9	20.6

歴を求めた結果を Fig. 3 (d) に示す。音圧生データに比べて、より顕著に共振現象を検出できることがわかる。

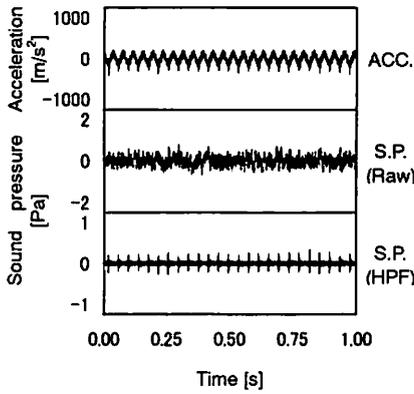
なお、試料Bのみ1枚を取り付けた条件についても、共振現象の発生時に、音圧の高周波数帯域に強い成分が現れる傾向は同様であった。

ここで、本研究の共振現象検出におけるSNR (Signal to Noise Ratio: 信号対雑音比、SN比) を定義する。共振現象の発生している時間帯の振幅実効値を信号成分 S、共振現象の起きていない時間帯の振幅実効値を雑音成分 N として、 $SNR = 20 \log_{10} (S/N)$  [dB] と定める。この値が大きいほど背景音の影響が小さく、共振現象を正確に検出できていると言える。

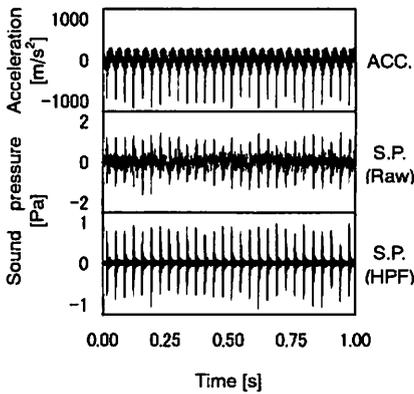
試料Aおよび試料B、それぞれ1枚を取り付けた条件について、振動加速度、音圧、そして遮断周波数の異なる (1kHz、5kHz) ハイパスフィルタを掛けた音圧について、それぞれのSNRを算出した結果を Table. 2 に示す。結果、本実験においては、音圧に遮断周波数 5kHz のハイパスフィルタを掛けることで、背景音の影響を低減・除去して、共振現象を精度よく検出することができた。

#### 4.2 正弦波一定加振

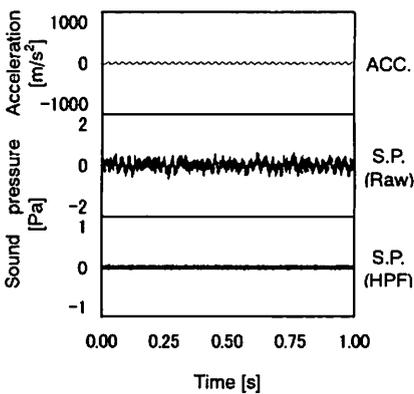
振動台に試料Aのみ1枚を取り付け、正弦



(a) 25Hz



(b) 28Hz



(c) 35Hz

ACC.	Acceleration
S.P. (Raw)	Sound pressure (raw data)
S.P. (HPF)	Sound pressure (5kHz HPF)

Fig. 4 Waveform (Sin test)

波一定加振を行った結果を Fig. 4 に示す。2 分間の加振時間において、加振振動数と加振加速度はともに一定とした。加振振動数は、4.1の実験において、共振現象が発生した振動数範囲に含まれている 25Hz (Fig. 4 (a)) と 28Hz (Fig. 4 (b))、そして共振現象が起きていない振動数範囲に含まれている 35Hz (Fig. 4 (c)) の 3 条件とした。加振加速度は、3 条件ともすべて  $9.8\text{m/s}^2$  とした。それぞれ、振動加速度の時間波形、音圧の時間波形 (生波形)、そして、4.1の結果をもとに、遮断周波数 5kHz のハイパスフィルタを掛けた音圧の時間波形を示す。

まず、Fig. 4 (a)～(c) それぞれの振動加速度波形を見ると、(a) 25Hz および (b) 28Hz において、共振現象によるたたき合いが発生していることが確認できる。(c) 35Hz については、振幅が加振加速度の  $9.8\text{m/s}^2$  とほぼ一致しており、共振現象が起きていないことがわかる。

次に、Fig. 4 (a)～(c) それぞれの音圧波形を見ると、(b) 28Hz については、生波形であっても、共振現象の発生を確認することができる。共振現象によるたたき合いが激しく、それに伴い発生した共振音についても、背景音と比べて十分に大きいため、特別な周波数帯域フィルタを用いなくても、生波形から共振現象が検出できたと考えられる。

これに対して、(b) 28Hz と同様に、振動加速度波形から共振現象の発生が確認されている (a) 25Hz については、音圧生波形から共振現象を確認することはできない。共振音が、背景音の大きさとはほとんど変わらないか、あるいは小さいために、生波形の状態では背景音に埋もれてしまっていると考えられる。これは、共振現象が起きておらず、背景音のみ

の状態である (c) 35Hz の音圧生波形と比較しても、振幅や波形がほとんど変わらないことから推測できる。

ここで、4.1の結果に従い、音圧波形に遮断周波数 5kHz のハイパスフィルタを掛けると、(a) 25Hz にも周期的なピークが現れ、共振現象が検出できることがわかる。これは、ハイパスフィルタによって背景音の影響が低減・除去され、その結果、埋もれていた共振音が抽出されたと考えられる。共振現象の起きていない (c) 35Hz については、ハイパスフィルタを掛けることで、背景音の影響が低減・除去され、ほとんど振幅の変動がない波形、すなわち、共振現象が起きていない状態を、より鮮明に確認できるようになる。

以上により、音圧波形に遮断周波数 5kHz のハイパスフィルタを掛けることで、背景音の影響を低減・除去できるという4.1の結果を、ここでも確認することができた。

続いて、共振振動数の検出方法を検討するために、加振振動数 28Hz 条件 (Fig. 4 (b)) について、より詳細な解析を行う。振動加速度波形および音圧生波形を FFT 解析した結果を Fig. 5 に示す。

振動加速度波形のFFT解析結果を示す Fig. 5 (a) を見ると、28Hz に最大ピーク振動数が現れている。この振動数は、加振振動数 28Hz と一致しており、共振現象は加振振動数と同期して発生していることがわかる。

次に、音圧生波形を FFT 解析した結果を示す Fig. 5 (b) を見ると、振動加速度の解析結果と異なり、共振振動数である 28Hz の成分は現れていない。これは、共振現象によるたたき合いが 28Hz 周期で起きていても、実際に発生している音は、1つ1つの衝撃振動

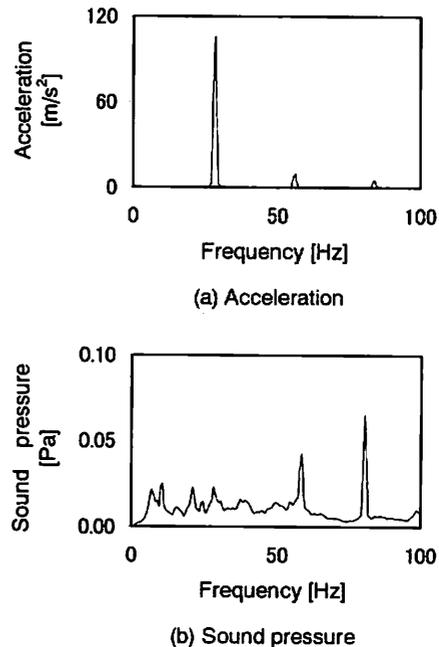


Fig. 5 FFT analysis (Sin test /  $f=28\text{Hz}$ )

による衝撃音、すなわち衝撃によって励起される試料の高次共鳴音であるためだと考えられる。このため、発生音の FFT 解析を行っても、高次共鳴音の成分を得ることはできるが、発生音には含まれていない 28Hz の成分は検出することができない。

そこで、Fig. 4 (b) に示す遮断周波数 5kHz のハイパスフィルタを掛けた音圧時間波形を見ると、ピーク周期はほぼ一定の0.035秒であることがわかる。この周期の逆数を求めると、共振振動数 28Hz を検出することができる。

以上のことから、音響解析による手法では、背景音の影響を低減・除去した時間波形からピーク周期を読み取り、その逆数を求めることで、共振振動数を検出できることがわかる。

#### 4.3 ランダム加振

試料Aのみ 1 枚を取り付けた条件、試料B

のみ1枚を取り付けた条件、そして試料Aと試料Bを2枚同時に取り付けた条件について、ランダム加振を行った。2分間の加振時間において、加振振動数範囲は20~80Hzとし、加速度パワースペクトル密度(PSD: Power spectral density)は $1.44 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$ 一定とした。

4.2の結果をもとに、遮断周波数5kHzのハイパスフィルタを掛けた音圧波形から、ピーク周期を読み取り、その逆数から共振振動数を検出する。試料Aのみ1枚を取り付けた条件を例に、この手順を具体的に説明する。Fig. 6は、ある時間帯における遮断周波数5kHzのハイパスフィルタを掛けた音圧波形である。ピークの時間周期 $T_1, T_2 \dots$ を順に読み取り、その逆数から共振振動数を求める。なおここでは、波形の始めから500個のピーク周期を解析対象データとした。

読み取られるピーク周期にはばらつきがあるため、その逆数である共振振動数にもばらつきが生じる。そこで、得られた共振振動数について、横軸を周波数とする確率密度関数(PDF: Probability density function)を求めた結果を、Fig. 7に示す。Fig. 7(a)は、試料Aのみ1枚を取り付けた条件のPDF、Fig. 7(b)は、試料Bのみ1枚を取り付けた条件のPDF、そしてFig. 7(c)は、試料Aと試料Bを2枚同時に取り付けた条件でのPDFである。

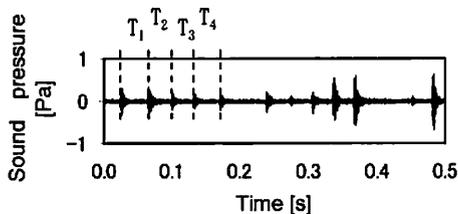
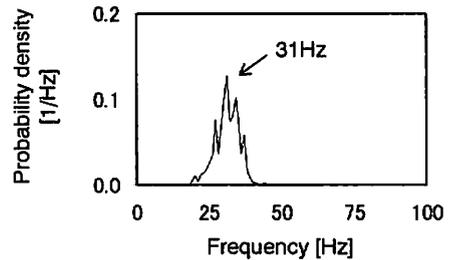


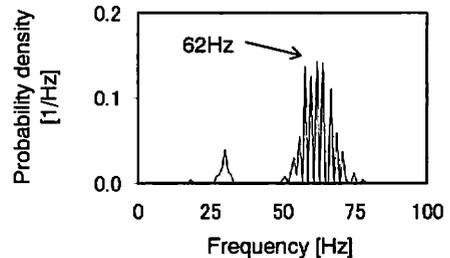
Fig. 6 Waveform Sound pressure 5kHz HPF (Random test)

また、振動計測による手法との比較を行うために、試料Aと試料Bを2枚同時に取り付けた条件での、それぞれの試料の加速度PSDをFig. 8に示す。

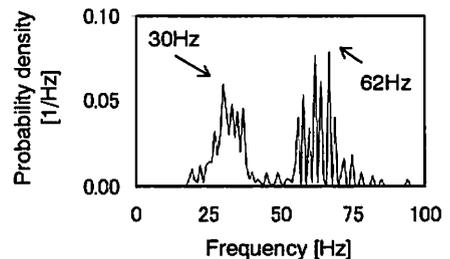
Fig. 7とFig. 8を比較すると、1枚のみ試料を取り付けた条件でも、2枚同時に取り付けた条件でも、音響解析による手法と振動計測による手法で、ほぼ同様の共振現象および共振振動数が検出されていることがわかる。



(a) Sample A (One plate condition)



(b) Sample B (One plate condition)



(c) Sample A&B (Two plates condition)

Fig. 7 Probability density function Sound pressure (Random test)

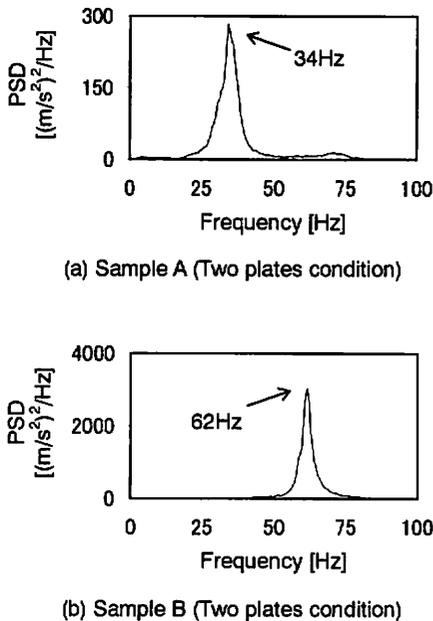


Fig. 8 Power spectral density acceleration (Random test)

特に、試料を2枚同時に取り付けた条件では、音響解析による手法で検出された共振現象 (Fig. 7 (c)) が、振動計測による手法を用いて2個の加速度ピックアップから検出された共振現象 (Fig. 8 (a) と Fig. 8 (b)) を重ね合わせたような結果となっている。このことから、音響解析による手法を用いることで、異なる2枚の試料の共振現象および共振振動数を、1つのマイクロホンで検出できていることがわかる。

以上により、4.2の結果として得られた、背景音の影響を低減・除去した音圧時間波形からピーク周期を読み取り、その逆数から共振振動数を求める方法が、ランダム振動試験でも有効であることが明らかになった。また、振動計測による手法では、加速度ピックアップを設置した場所の共振現象しか検出できなかったのに対し、音響解析による手法では、

複数の異なる共振現象を、1つのマイクロホンで検出できることがわかった。

これらの結果から、音響解析による手法を用いることで、振動計測による手法と比べて、より簡単に供試品全体の共振現象を検出できることがわかる。供試品のどこが共振するか事前にわからない場合や、加速度ピックアップの設置場所の決定が難しい場合などに、音響解析による手法が有効であることを示唆している。

## 5. 結論

振動試験供試品の共振現象を検出する新たな手法として音響解析による手法を考案した。そして、音響解析による手法の有効性を実験的に検証するために、供試品モデルに対する振動試験を行い、考案法である音響解析による手法と、従来法である振動計測による手法との比較を行った。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ハイパスフィルタを用いることで、背景音の影響を低減・除去し、音圧波形から共振現象を検出できる。
- (2) 正弦波加振条件およびランダム加振条件のいずれにおいても、背景音の影響を低減・除去した音圧時間波形からピーク周期を読み取り、その逆数から共振振動数を検出できる。
- (3) 複数の異なる共振現象および共振振動数を、1つのマイクロホンで検出できる。

以上により、音響解析による共振現象の検出手法は、音の発生を伴う共振現象に対象が限定されるものの、従来からの振動計測による手法と比較し、より簡単に製品全体の共振

現象を検出できることを明らかにした。

<参考文献>

- 1) (社)日本包装技術協会 JIS改正原案作成委員会、「JIS Z 0231 包装貨物－振動試験方法」の改正について、包装技術、Vol.42 No.6 (平成16年6月号)、71-75 (2004)
- 2) 津田和城、中嶋隆勝、がたを有する被包装物の振動に関する基礎的研究、日本包装学会誌、Vol.14 No.1、35-47 (2005)
- 3) 小林健二、音・振動による診断工学、コロナ社 (2000)
- 4) 西川兼康、高田勝、機械工学用語辞典、理工学社 (1996)
- 5) JIS E 4031:1994 鉄道車両部品－振動試験方法  
(原稿受付2006年6月5日)  
(審査受理2006年9月27日)