

音響計測解析技術の振動試験への適用

Application of Acoustic Analysis to Vibration Test

君田 隆男* 中嶋 隆勝* 津田 靖子*
Takao Kimita Takamasa Nakajima Yasuko Tsuda

(2006年6月2日 受理)

キーワード：音響，振動，音圧，周波数，加速度，振動試験，共振検出

1. はじめに

人間の耳は常にさまざまな音を聞いている。それは人の声であったり、鳥の鳴き声であったり、木々のざわめきであったり、また家電製品のサイン音であったり、加工機械の稼働音であったり、車の走行音であったりする。そして人間は、その音から何かしらの情報を得ることができる。その人の健康状態、鳥が何匹いるのか、風の強さ、調理の完了、加工の良否、車のスピードなど、音から得られる情報は極めて多い。

このような音からの情報取得を、計測機器やパソコンなどを利用して行うのは、非常に難しく、ここに、音響計測解析技術の必要性が生じる。音響計測解析技術を効果的に利用することで、人間が耳を用いて行う情報取得よりも、さらに多くの情報を得ることが可能になる。

本報では、基本的な音響計測解析技術を、具体例や実際の計測結果とともに紹介する。さらに、音響計測解析技術を振動試験に適用した事例として、筆者らが新たに考案した手法である「音響解析による共振現象検出手法」について、実験データを交えて報告する。

2. 音響計測解析技術

(1) 音とは何か

音とは、空気の圧力変動である。この圧力変動を音圧と言い、人間の耳やマイクロホンは、この音圧を検出するセンサである。音が伝搬するという現象は、音圧が空気の疎密波として伝わっていく現象である。こ

の波を音波と呼んでいる。

音波の振幅は音の強さ(大きさ)に関係し、音圧(振幅) [Pa]、あるいはその対数表記である音圧レベル [dB] によって表される。音波の周期は音の高さに関係し、周波数 [Hz] によって表される。音響計測解析においては、おもにこの音圧と周波数を分析することが基本となる。

音が発生するもっとも一般的な原因は、物体の振動現象である。物体の振動が、物体に接する空気に伝わり、音が発生する。逆に言えば、音の発生がある場合、物体の振動現象が存在すると言える。つまり、音響計測解析を行うことで、発生源である物体(対象物)の振動に関する情報が得られる。

(2) 音響計測解析技術の概要

(A) 計測機器

音響計測に用いるもっとも代表的な機器は、騒音計(サウンド・レベル・メータ)である。前述の音圧レベルを計測する機器であり、すべての機器のフロントエンドになる。アンプやレンジ切替などが必要でない場合は、できるだけ平坦な周波数特性を持つマイクロホンを分析器に接続して用いることもある。

音圧検出を行うこれらの機器に、データログや周波数分析器を接続して解析を行う。周波数分析器には2種類あり、おもに音源探査や機械の低騒音化対策に用いられるFFTアナライザ(定幅分析器)と、音質や防音材料特性の評価に用いられるオクターブ分析器(定比幅分析器)がある。一般に、FFTアナライザは機械動作や機構との関連性が高く、オクターブ分析器は人間感覚との親和性が高い。なお、近年はパソコンの進歩に伴い、高速サンプリングでパソコンに音を取り込み、デジタルデータとしてソフトウェア上で解析を行うことが多い。

* 情報電子部 信頼性・生活科学系

(B) 計測解析手法

計測解析の手法は多種多様なものが存在するが、ここでは下記 (a) ~ (d) に、代表的な計測解析手法を紹介する。なお、目的や対象物に応じて、(a) ~ (d) の計測解析手法を使い分ける必要があるが、より詳細な情報を得るためには、さらに波形解析処理^{*1)}や、確率統計解析^{*2)}の手法を組み合わせる解析を行うこともある。

(a) 音圧レベル計測

音の強さの計測であり、もっとも単純かつ基礎的な計測である。騒音の評価やラベリング、低騒音化対策・防音対策の効果測定、公害や環境規制対策、音による良品/不良品判定などの目的で行われる。人間の聴感を加味した A 特性周波数補正^{*3)}を用いて計測することが多い。

図 1 に、インクジェットプリンタ稼働音の計測方法と計測結果を示す。一連の印刷動作に伴い発生する音について、A 特性音圧レベルの経時変化を計測した。計測の結果、印刷動作開始から 10 秒後、用紙が給紙トレイから印刷部に送られる際に、もっとも強い音が発生し、そのときの音圧レベルが 68 dB であることがわかる。また、その後の動作においても、一定間隔で用紙を前に送り出す動作時に、音圧レベルが高くなっていることが確認できる。

(b) 音圧時間波形の解析

音圧の振幅（場合によっては位相）が、時間的にどのように変動しているかを調べる計測である。音の減衰時間や残響時間の計測、衝撃音の解析などの目的で行われる。振動波形と比較することで、対象物の振動とそれに伴って発生する音との時間的な関連性などを知ることも可能である。

図 2 に、制振材の防音効果を調べるための衝撃音の計測方法と計測結果を示す。制振材を貼り付けた半鐘と、貼り付けていない半鐘に鋼球を落下させ、発生した衝撃音の音圧時間波形を計測した。制振材を貼り付けたことにより、減衰時間が短くなり、響きが低減されていることが確認できる。

(c) 音圧の周波数解析

音の高さの計測であり、音圧レベル計測だけではわからない、音の中身を知ることができる解析である。スペクトル解析とも呼ばれ、音の高さを表す周波数だ

*1) 周波数フィルタ、エンベロープ、ケプストラムなど

*2) 確率密度関数、成分分析、パターン認識など

*3) A 特性周波数補正：人が感じる音の大きさは音の高さによって異なるため、聴感に近い測定ができるように規定された周波数補正曲線のことで、通常の騒音計には補正回路が内蔵されており、この特性を用いて測定された値を、A 特性音圧レベル、あるいは単に騒音レベルと呼ぶ

けでなく、各周波数成分(スペクトル)ごとの音圧パワー(パワースペクトル)あるいは音圧振幅(振幅スペクトル)が得られる。機械機構(回転や往復運動)による発生音の解析、音源探査、防音材料の改良開発、音質評価などの目的で行われる。目的に応じて、フーリエ解析(FFT: Fast Fourier Transform)とオクターブ分析(CPB: Constant Percentage Band)を使い分ける必要がある

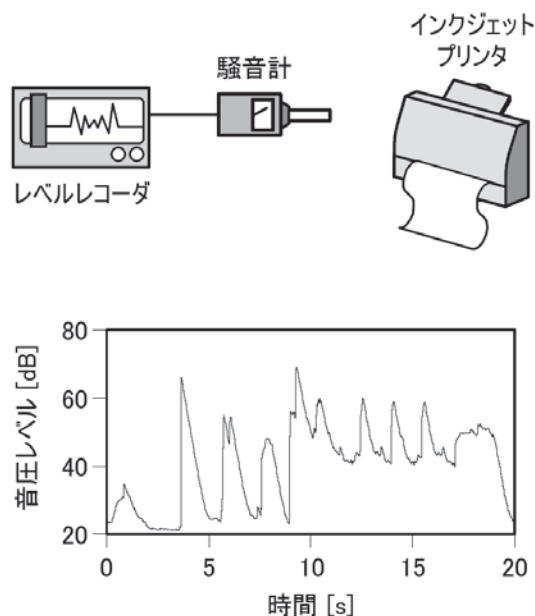


図 1 インクジェットプリンタ稼働音の音圧レベル経時変化

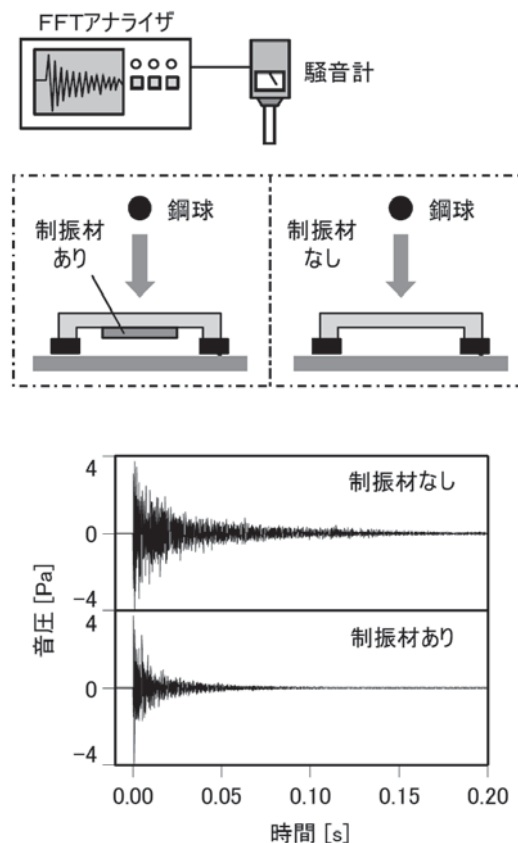


図 2 半鐘への鋼球落下による衝撃音の音圧時間波形

る。理論上、定常音を対象としていることに、注意が必要である。

図3に、ヘッドライヤ作動音の計測解析方法と計測結果を示す。ヘッドライヤの2段階の運転モード（弱、強）について、発生音のFFT解析を行った。計測の結果、強モードにおいては、音圧レベルだけでなく、周波数スペクトルも高くなるのがわかる。内蔵ファンの回転数に同期したスペクトルが作動音に現れているため、弱モードに比べて、強モードではファンの回転数が上がったことが確認できる。作動音の周波数スペクトルを解析することで、逆にヘッドライヤ内蔵ファンの回転数を検出できる可能性もある。

(d) 音圧の時間一周波数解析

音圧の周波数が、時間とともにどのように変化するかを調べる解析である。(c)の周波数解析では、定常音しか扱うことができなかったが、この解析では、変動音を周波数領域から捉えることができる。時間的に変動する音（減衰音、残響音など）の周波数解析、音声の分析（声紋分析）、音色の解析などの目的で行われる。さまざまな方式があり、代表的なものに短時間フーリエ変換（STFT: Short Time Fourier Transform）や、ウェーブレット変換（WT: Wavelet Transform）などがある。解析結果は、通常カラーマップやウォーターフォールなどの3Dグラフ表示で得られる。

図4に、インクジェットプリンタを振動試験機で正弦波掃引加振^{*4)}した際に発生する音の、計測解析方法と計測結果を示す。加振振動数5 Hzから50 Hz、加速

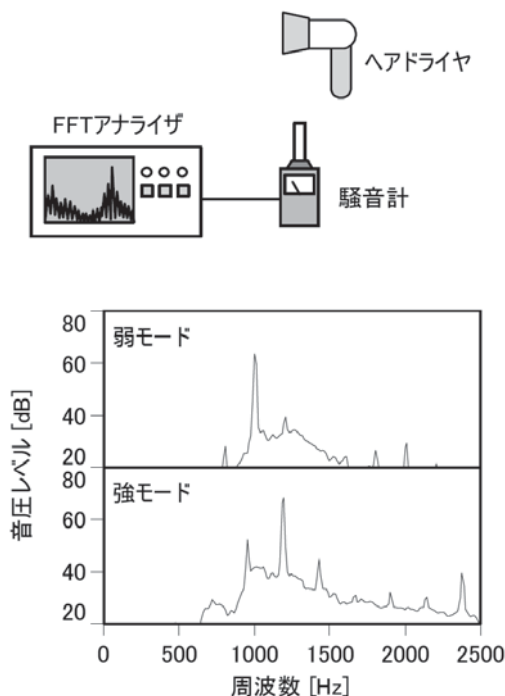


図3 ヘッドライヤ作動音のFFT解析

度一定 9.8 m/s^2 の条件で、5分間かけて正弦波掃引加振した際の発生音について、時間一周波数解析を行った。計測の結果、時間とともに上昇する加振振動数が、発生音にも現れていることがわかる。また、240秒付近において、高周波数帯域の音が発生していることがわかる。これは、インクジェットプリンタの共振により発生した音だと考えられる。振動試験時の発生音を調べることによって、振動試験供試品の共振現象が検出できる可能性が示唆され、後述の「音響解析による共振現象検出手法」の考案につながっていく。

(3) 音響計測解析技術の利点と欠点

ここまで述べてきたように、音響計測解析により、発生源である物体の振動現象を知ることができる。さらに、固有振動数などの振動特性を知ることができれば、対象物の性状（動作、構造、機構、材質など）に関する情報も得ることができる。

ここで、対象物の性状を知る手法として、直接振動を計測する手法と、音響計測解析による手法との比較を行う。

(A) 振動計測による手法

振動計測による手法では、基本的に、対象物に直接

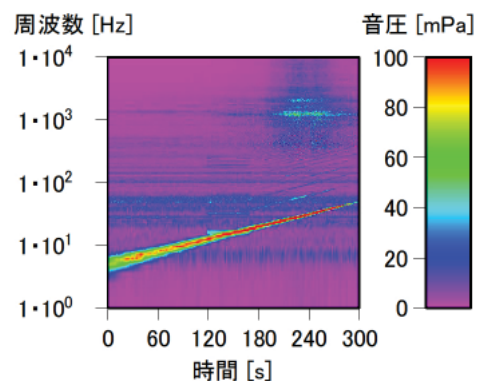
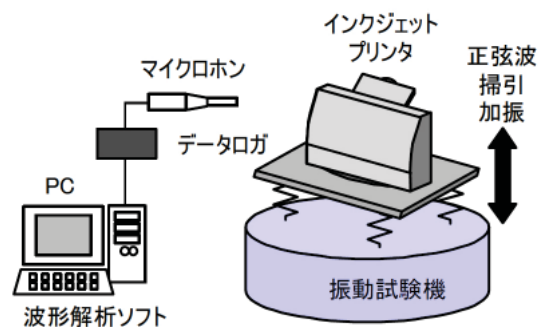


図4 インクジェットプリンタ加振による発生音の時間一周波数解析（正弦波掃引加振）

*4) 正弦波掃引加振：正弦波を、ある振動数からある振動数まで連続的に変化させて加振する方法で、Sin Sweep加振とも呼ぶ

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する。ノイズの影響が少ないため、精度の高い信号検出が行えるという利点を持つ。反面、加速度ピックアップの取り付けスペースがない場所や、加速度ピックアップの質量が振動現象を変化させてしまうような場所の計測ができない。さらに、信号検出が加速度ピックアップを取り付けた場所に依存するため、対象物全体の情報を得るためには、多数のピックアップを用いる必要がある。また、加速度ピックアップの設置場所により、振動現象を見逃したり見誤ったりする可能性があるため、十分な注意が必要である。

(B) 音響計測解析による手法

音は離れた場所にも空気を介して伝搬するので、センサを対象物に直接取り付けする必要がない。このため、離れた場所の計測ができるだけでなく、条件によっては、見えない場所や対象物内部の振動現象まで知ることができる。また、通常の音圧計測用のマイクロホンは無指向性であるため、対象物の「ある部分からの発生音」と限定して捉えるのではなく、対象物全体を包括的に捉えることが可能である。しかし、この利点は、逆に欠点にもなる。マイクロホンからは、対象物の振動現象に関係のある音だけでなく、環境騒音などの背景音も同時に計測される。同様に、対象物の複数箇所から音が発生している場合、それぞれの発生音の合成音が計測される。個々の振動現象を正確に知るためには、背景音の影響を低減・除去した後に、それぞれの発生音を分離して捉える解析手法が必要になる。

(4) 計測解析手法の受動的利用と能動的利用

(A) 受動的利用

稼働中の機械や設備が自ら発生する音を計測解析する方法で、おもに動力機構や可変機構を備えた機械設備が対象となる。(2)の(B)に示した計測解析例においては、(a)と(c)がこの分類となる。他に具体例としては、機械騒音・環境騒音測定全般、機械設備の状態監視・故障診断、モータ組付け精度の判定、エンジン異常音の検出、不良ベアリングの探査、聴診器による心音検査など¹⁻³⁾があげられる。

(B) 能動的利用

何らかの信号を対象物に加え、その応答として発生する音を計測解析する方法である。おもに材料や構造の特性を調べる目的で行われる。(2)の(B)に示した計測解析例においては、(b)と(d)がこの分類となる。また、次章で述べる「音響解析による共振現象検出手法」も、この分類に属する。他に具体例としては、音響材料の特性測定全般、部品の打音検査、コンクリート剝離の検出、超音波エコー診断、魚群探知機、潜水艦ソナー

などがあげられる。

3. 音響解析による共振現象検出手法

前章で述べた音響計測解析手法を、振動試験分野に適用した研究事例について紹介する。ここでは、音の計測解析手法を能動的に利用し、振動試験機で加振した製品の共振現象を、音の計測解析を用いて検出することを試みている。

ここで、本研究における「共振現象」の定義について述べる。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。しかし本研究では、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、本研究で適用を試みた振動試験分野において、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ような振動現象(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⁴⁾ことに基づいた定義である。

(1) 必要性

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、共振現象が原因で起こった重大事故も多発している(原発冷却水漏れ、タイヤ脱落事故など)。一方、製品の出荷前検査やクレーム対策の一環として、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⁵⁾。

従来から試験現場においては、共振現象の検出手法として、人間感覚を利用する手法や振動計測による手法が一般に用いられている。しかし、体系化された手法が存在しているわけではなく、また経験や勘によるところが大きいのが実情である。振動試験の重要性が増している中、共振現象検出手法については、曖昧なまま残されていると言える。

また、2004年のJIS規格の改正により⁵⁾、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^{*5)}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、試験現場での問題も生じている。

振動が原因となる損傷事故の未然防止のためだけでなく、製品設計ならびに包装設計の適正化による省資源化、コスト削減のためにも、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

*5) ランダム振動試験：指定した振動数帯域に含まれる振動を、ある一定時間内においてランダムに発生させ、加振する振動試験方法

表1 共振現象検出手法 従来法と考案法の比較

	ランダム振動試験	手法の容易さ	耐ノイズ性	定量的評価	検出場所
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
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 場所のみ
音響解析による手法	○ 対応可	○ 非接触で 計測可能	△ 背景音の 分離が必要	○	不特定 製品全体

る手法の確立が、非常に重要である。

(2) 音響解析による共振現象検出手法

前章で述べた音響計測解析手法を振動試験に適用し、「音響解析による共振現象検出手法」を考案した。振動試験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。この際に発生する特徴的な音を計測解析することで、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。

音響計測解析手法の一般的な特徴は、前章に述べたとおりである。ここでは、振動試験への適用に的を絞り、従来法と考案法との比較を表1に示す。

(3) 実験方法

音響解析による手法と振動計測による手法を比較検証するために、実験を行った。本報では、インクジェットプリンタを対象物とした実験について説明する。実験装置を図5に示す。

振動試験機の振動台上にインクジェットプリンタを固定し、プリンタの2ヶ所（Point A：本体カバー上部，Point B：給紙カバー上部）に加速度ピックアップを接着した。マイクロホンは、プリンタ上部200 mmの場所に設置した。振動試験の加振条件は、加振周波数帯域5~50 Hz，加速度パワースペクトル密度^{*6)}（PSD: Power Spectral Density）1.44 (m/s²)²/Hz一定のランダム加振である。マイクロホンから計測される音圧と、加速度ピックアップから計測される加速度をパソコンに取り込み、波形解析ソフトを用いて解析を行った。

(4) 実験結果

図6に、2ヶ所の加速度および音圧のPSDを求めた結果を示す。またこの図から、共振点（振幅が極大となる振動数）および共振範囲（最大共振点から-6 dB以内の振動数範囲）を求めた結果を、表2に示す。

はじめに、振動計測による手法を用いた結果について検討すると、図6および表2のいずれを見ても、Point AとPoint Bの加速度から検出された共振現象に、明らかな違いがあることがわかる。信号検出が加速度ピックアップを取り付けた場所に依存するという振動計測による手法の欠点が、実験データに顕著に現れて

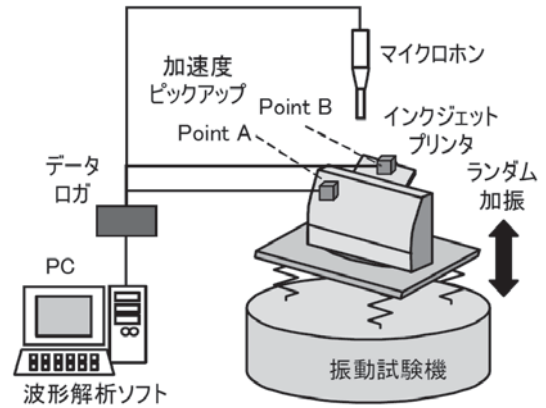


図5 実験装置

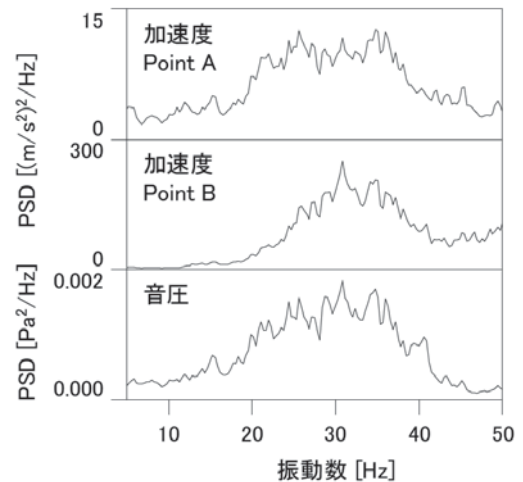


図6 インクジェットプリンタ加振時の音圧，加速度パワースペクトル密度（ランダム加振）

表2 ランダム加振 共振点と共振範囲

	加速度 Point A	加速度 Point B	音圧
共振点	24 Hz 26 Hz 31 Hz Max 35 Hz 36 Hz	Max 31 Hz 35 Hz	24 Hz 26 Hz Max 31 Hz 35 Hz 36 Hz
共振範囲	20~39 Hz	26~38 Hz	20~37 Hz

*6) パワースペクトル密度：本来，振動数に対して連続であるパワースペクトルを，単位振動数1 Hzあたりのパワーに換算した値

いる。

次に、音響解析による手法を用いた結果について検討する。図6を見ると、音圧にも明らかな周波数のピークが現れており、音響解析による手法を用いることで、共振現象の検出が可能であることがわかる。また、図6および表2のいずれを見ても、音圧から検出された共振現象に、2ヶ所の加速度から検出された両方の共振現象が現れていることが確認できる。つまり、1本のマイクロホンで、2ヶ所の共振現象を同時に検出できることがわかる。

音圧から得られる最大共振点の振動数は31 Hzであり、これはPoint Bの加速度から得られる最大共振点の振動数と一致している（Point Aの加速度から得られる最大共振点は35 Hz）。Point Aの最大共振点ではなく、Point Bの最大共振点が音圧に現れた原因を考察するために、ある時間帯における2ヶ所の加速度および音圧の時間波形を図7に示す。この図を見ると、音圧とPoint Bの加速度のピークは、ほぼタイミングが一致しており、また波形も非常に類似していることがわかる。Point Aについても共振現象の発生は確認できるが、その加速度振幅はPoint Bに比べて1/4程度である。つまり、共振の弱い、あるいは共振による発生音の弱い

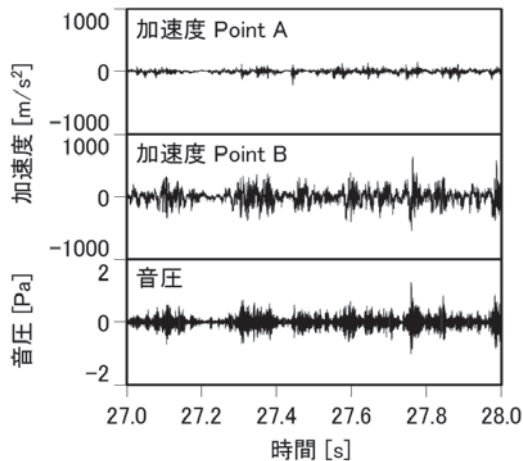


図7 インクジェットプリンタ加振時の音圧、加速度時間波形（ランダム加振）

Point Aに比べて、Point Bの共振現象の方が音圧に強く現れていることがわかる。これは、発生音の弱い共振現象の検出が難しいという音響解析による手法の弱点と言える。しかし逆に、製品から離れた場所で計測を行うことで、センサの設置場所によらず、製品を全体的・包括的に捉えて、代表的な共振現象（強い共振）を検出することができる本手法の利点であるという見方もできる。

4. おわりに

本報では、音響計測解析技術を用いて、対象物の振動現象についての情報を取得する方法をいくつか紹介した。そして、その具体的な適用事例として、筆者らが考案した「音響解析による共振現象検出手法」について説明し、その有効性を明らかにした。

音響計測解析技術は、うまく利用することで、人間の耳と同等か、あるいはそれ以上の情報を取得することができる。計測解析技術の研究開発を進めることで、さまざまな分野や対象物への適用が見込まれ、今まで熟練者の耳に頼っていた検査工程や、労力とコストを掛けて行っていた試験工程などを、大幅に改善できる可能性を秘めている。

なお、考案した「音響解析による共振現象検出手法」は、すでに特許出願を済ませ、現在実用化に向けての検討を進めているところである。

参考文献

- 1) 小林健二：音・振動による診断工学，コロナ社(2000)
- 2) 一宮亮一：機械系の音響工学，コロナ社(1992)
- 3) 竹内 節：振動分析による設備診断と治療技術，技術評論社(1985)
- 4) JIS E 4031(1994)；鉄道車両用部品－振動試験方法 解説
- 5) 中嶋隆勝，津田和城：大阪府立産業技術総合研究所報告，No.19 (2005) p.39
- 6) 社団法人日本包装技術協会 JIS 改正原案作成委員会：包装技術，42, 16 (2004) p.71