

振動試験における共振位置の可視化手法の検討

谷山清吾*

Consideration of Visualization Method for Resonance Position in Vibration Test

Seigo TANIYAMA

振動による負荷試験の1つに共振試験がある。共振試験では、試験体が共振を起こす周波数の探査（以下、共振探査）を行うことで試験周波数を決定する。共振探査を行う際には試験体上で最も大きな共振を起こす位置（以下、共振位置）で試験を行う必要がある。しかし、共振位置を正確に把握するには試験の長時間化や高額な加速度センサーが複数必要なことなどから、共振位置について詳細な検討ができていない場合は非常に少ない。そこで本研究では、簡易かつ安価に共振位置を可視化する手法の検討を行った。

Keyword： 振動試験，共振探査，共振位置，構造解析，シミュレーション

1. 緒言

振動試験では、試験体に適用される規格などによってさまざまな試験条件が規定されている。これらの試験条件の中でも特に多くの試験体に適用される試験の1つに共振試験がある。

共振試験では、特定の周波数範囲で試験体を振動させ、試験体に取り付けた共振探査用の加速度センサーと振動制御用の加速度センサーの値の差から共振周波数を調査する共振探査を行う（図1）¹⁾。このとき、試験体上の振動は均一とは限らないため、共振探査時には、試験体上で最も大きな共振を起こす共振位置に加速度センサーを取り付ける必要がある。

共振探査によって決定された共振周波数で一定時間の振動負荷を与えることで、試験体が共振をおこした状態での共振試験を行う。当センターにおいても振動試験機（メーカー：IMV株式会社，型式：i230/SA2M）（図2）を所有しており、多くの県内企業が共振試験および共振探査を実施している。なお、同試験機には、振動制御や試験体の振動状況を把握するための加速度センサーを用いる（図3^{2) 3)}）が、このセンサーは、様々な試験体に取り付けることができ、振動試験に対する影響が軽微で、周波数や加速度など、様々な振動条件に対応出来るなどの理由のため、小型軽量かつ高感度でダイナミックレンジも大きなものである。通常、接着力が高く耐熱性もある「カプトンテープ」を用いて振動テーブルや試験体に貼り付けている（以後、本センサーの事を『高性能加速度センサー』と称する）。

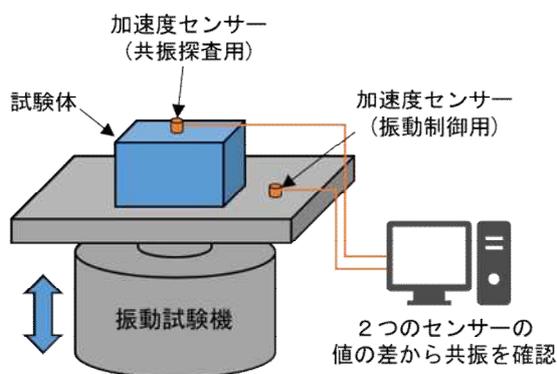


図1 振動試験機による共振探査



図2 振動試験機

●VP-02S

- ・単価：約100,000[円]
- ・測定加速度：±1000[G]
- ・周波数：～13000[Hz]



図3 高性能加速度センサー例（VP-02S）

* 生産技術部

共振探査における問題点は、共振位置の検討時に共振探査用センサーの取り付け位置をずらしながら複数回の共振探査を行う必要があることであり、何度も振動を繰り返すために試験体に与える負荷が多くなる上、試験が長時間化してしまう。共振探査用センサーを複数用意し同時に多点の共振探査を行うことで共振探査の回数を減らす方法もあるが、センサーは高額で多くの共振探査用のセンサーを用意することは困難であることと、複数のセンサーを同時に取り付けるとセンサーの重量が共振探査の結果に影響を及ぼす可能性がある。

そこで本研究では、簡易かつ安価に共振位置を可視化する手法の検討を行ったので報告する。

2. 共振位置可視化手法の検討

本研究では共振試験の対象となる試験体について、「解析に使用可能な3次元CADモデルがあるもの」、「3次元CADモデルがなく、簡易なモデル作成が困難なもの」に分類し、それぞれの分類について、共振位置の可視化に取り組んだ。

・「解析に使用可能な3次元CADモデルがあるもの」

これまで当センターで共振試験を行った県内企業製品については3次元CADモデルを有していることがほとんどである。こちらの試験体については、コンピュータシミュレーションによる共振位置の可視化を行う。シミュレーションによる固有振動数および共振位置の可視化は、試験回数及び時間の低減によって共振探査の繰り返しによる試験体への余分な負荷を与えないなど多くのメリットがある。また、シミュレーションを行うに当たっての対象とする試験体は、単純な形状と複雑な形状の2種類を用意した。

・「3次元CADモデルがなく、簡易なモデル作成が困難なもの」

試験体への余分な負荷を与えないという観点から、3次元CADモデルを有していない試験体についても3次元CAD作成をした上でのコンピュータシミュレーションによる共振位置の可視化が望ましいと考えるが、設計図のない試験体や3次元CADモデル作成の困難な試験体に対応するため、安価な加速度センサーを複数用いることによる共振位置の可視化を検討した。また、検討時の試験体は単純な形状の試験体を用いる。

2. 1 シミュレーションによる共振位置可視化の検討

解析に使用可能な3次元CADモデルがあるものについて、シミュレーションによる共振位置の可視化を検討した。

シミュレーションソフトは、構造解析ソフト「Altair

Inspire」を用い、試験体の3次元CADデータを取り込み、同ソフトの固有振動解析機能を用いて共振周波数を確認した。

さらに振動試験機による実振動試験での結果と比較することで解析の妥当性を評価した。

2. 1. 1 単純な形状の試験体の場合

単純な形状の試験体としては、3Dプリンタによって作成した図4の試験体(寸法:80mm×80mm×厚み10mm 材質:ABS樹脂)を用いた。事前に簡易のシミュレーションを行い、試験体の共振位置になり得る箇所を含む①～⑨のエリアに分割して試験を行うこととした。①～⑨のエリア分割及びエリア⑨共振探査時のセッティングを図5に示す。エリア①～⑧の試験時も同様に対象位置に図3の共振探査用加速度センサーを取り付けて共振探査を行った。

また、シミュレーション及び、振動試験機による共振探査の加振条件は、正弦波周波数範囲5～500Hz、で、加速度1Gとし、試験体の80mm×80mmの面に対して、垂直方向に加振した。(シミュレーションについては周波数の設定はなく加速度1Gのみの設定)

加振条件については、事前の予備試験によって決定した。予備試験では周波数範囲1～2000Hz、0.1G～1Gで共振探査を行った。周波数は振動試験機の加振性能の範囲限界を、加速度は一般的に共振探査を行う際の加速度0.1G～1Gの範囲で実施した。その結果から400Hz付近での共振の可能性が大きいことがわかったため、400Hzを含む周波数範囲5～500Hzで試験を行った。5Hzからとした理由は当センターでの共振試験において低周波数(地震を想定)での試験が多いことから設定した。また、加速度0.1G～1Gでは1Gで最も顕著な共振を確認できたため加速度は1Gとした。



図4 試験体

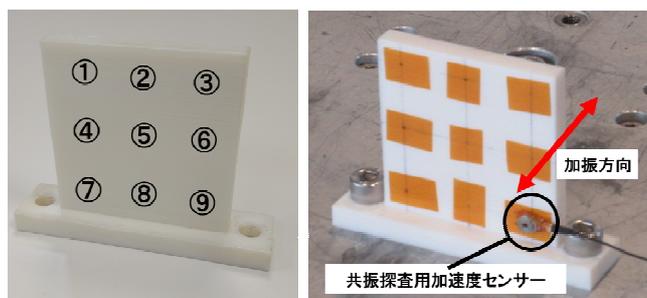


図5 ①～⑨エリア分割（左）エリア⑨共振探査セッティング（右）

2. 1. 2 複雑な形状の試験体の場合

複雑な形状の試験体として図6の県内企業製品（ダウンライト）を用いた。単純形状と同様に事前に簡易のシミュレーションを行い、試験体の共振位置になり得る箇所を含む①、②のエリアに分割（図7）して試験を行うこととした。複雑形状の内部構造を含む3Dモデルを図8に示す。基本的に3DモデルはCADモデルをシミュレーションソフトに取り込む際に自動で生成され、各 부품の材質のみ手動で設定を行う。

また、シミュレーション及び、振動試験機による共振探査の条件は、実際に県内企業が同試験体の共振探査時に実施している試験条件を参考に、周波数1～15Hz、加速度0.1Gとし、①、②の面に対して、垂直方向に加振した（シミュレーションについては周波数の設定はなく加速度0.1Gのみの設定）。

エリア①共振探査時のセッティングを図9に示す。試験体は立方体の治具に吊り下げの形で振動試験機に取り付ける。



図6 試験体：複雑形状（ダウンライト）



図7 複雑形状測定位置

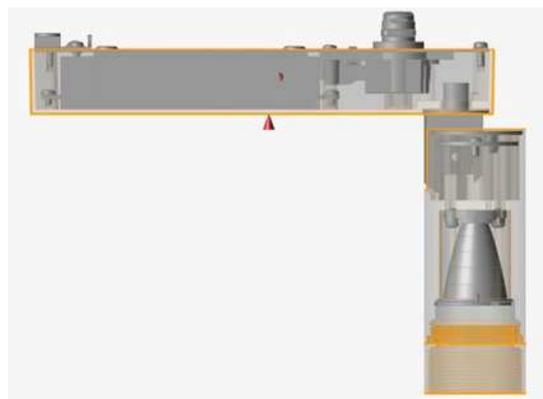


図8 複雑形状（ダウンライト）3次元CADモデル



図9 複雑形状の試験体のエリア①共振探査セッティング

2. 2 安価な加速度センサーによる共振位置可視化の検討

一部設計図のない試験体や3Dモデル作成の困難な試験体を対象に安価な加速度センサーによる共振位置可視化を検討した。RaspberryPiをログとして、複数の安価な加速度センサーを接続し、試験体に取り付けることで一度に広範囲の共振位置を可視化する。使用するセンサー個数は対象の試験体の大きさによって異なるが3～9個程度で複数のセンサーを試験体に取り付けて共振探査を行う。最大の共振を検知したセンサーが共振位置に近いという方法で共振位置を絞り込む。本来、高性能の加速度センサーを複数用いることが理想であるが、1個最低10万円程度する高性能の加速度センサー（図3）を複数用意することは現実的ではない。そこで、図10⁴⁾の安価な加速度センサーADXL375を単純形状試験体のエリア①、⑤、⑨に取り付け、高性能の加速度センサーVP-02Sとの比較を行った。

安価なセンサー（ADXL375）をエリア⑨へ取付けた場合

の振動試験時の写真を図11に示す。エリア①, ⑤の試験時も同様に対象位置に安価なセンサーを取り付けた。高性能なセンサー(VP-02S)の取り付けについては、図5と同様である。なお、振動試験機による共振探査の条件は、2. 1. 1章の条件で行なった。

●ADXL375

- ・単価: 約2,000[円]
- ・測定加速度: ± 200 [G]
- ・周波数: ~ 1600 [Hz]



図10 安価加速度センサー例 (ADXL375)

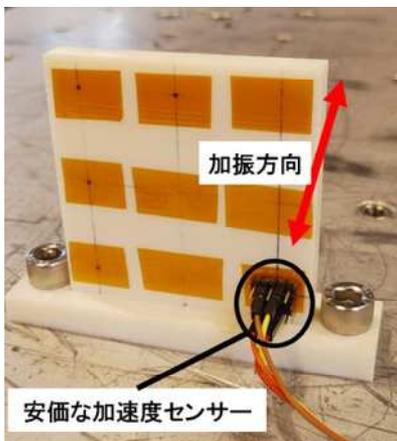


図11 安価なセンサー (ADXL375) の共振探査セッティング (エリア⑨の場合)

3 結果及び考察

3. 1 シミュレーションと実際の振動試験との比較

3. 1. 1 単純な形状の試験体の場合

単純形状の解析結果を図12に、振動試験機による共振探査の結果を図13示す。単純形状①～⑨エリアにおける共振の大きさを比較した結果、【⑦, ⑧, ⑨<④, ⑤, ⑥<①, ②, ③】となっていることを確認できた。振動試験による共振の大きさは【⑦, ⑧, ⑨<④, ⑤, ⑥<①, ②, ③】となっており、解析によって振動試験による共振探査と同様の結果を得られた。

これにより、単純形状においては解析による共振位置可視化の妥当性を確認できた。

また、共振周波数においても解析では約425Hz、振動試験では約400Hzと近い結果を得ることができた。

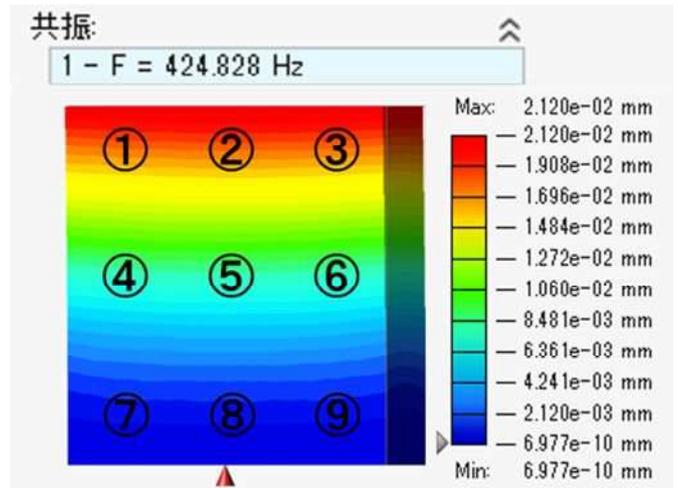


図12 解析による共振位置: 単純形状
(共振の大きさ【⑦, ⑧, ⑨<④, ⑤, ⑥<①, ②, ③】)

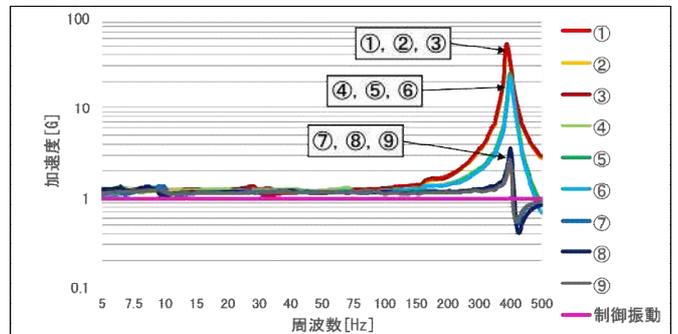


図13 振動試験機による共振探査: 単純形状
(共振の大きさ【⑦, ⑧, ⑨<④, ⑤, ⑥<①, ②, ③】)

3. 1. 2 複雑な形状の試験体の場合

複雑形状の解析結果を図14に、振動試験機による共振探査の結果を図15に示す。複雑形状①～②エリアにおける解析、振動試験機での共振の大きさを比較した。結果、解析によって振動試験による共振探査と同様の結果を得られた。また、共振周波数においても解析では約0.5Hz、振動試験では約1Hzと近い結果を得ることができた。なお、振動試験の加振条件は1～15Hzであるが、シミュレーションにおける周波数の条件は0Hz～になる。シミュレーションの結果では0.5Hzとなっており振動試験においても0.5Hzを含む範囲での試験が望ましいが、試験機の加振性能による制限のため今回の振動試験で可能な最小の試験周波数は1Hzとなっている。

シミュレーションに要する時間は5～10分程度であり、短時間で実振動試験と同等の共振位置可視化を行うことができた。

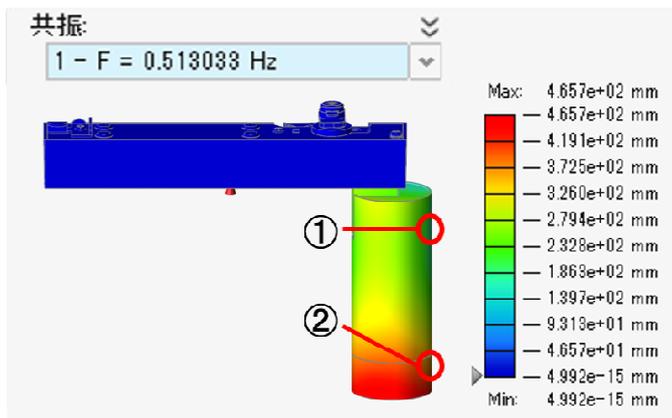


図14 解析による共振位置：複雑形状
(共振の大きさ【①<②】)

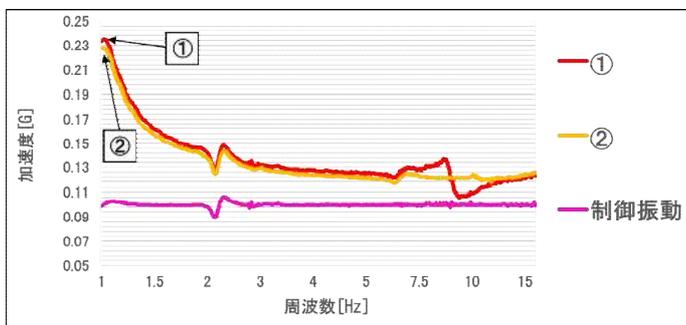


図15 振動試験機による共振探査：複雑形状
(共振の大きさ【①<②】)

3. 2 安価な加速度センサーによる共振位置可視化の検討

単純形状試験体のエリア①、⑤、⑨に、安価な加速度センサーADXL375を取り付けた場合と、高価な高性能加速度センサーVP-02Sを取り付けた場合の比較結果のグラフを図16に、数値を表1、表2に示す。

エリア①や⑤のように共振時の加速度が大きい場合、表1と表2に示すように共振周波数や加速度の数値が高性能センサーで①(390Hz, 51.11G)、⑤(398Hz, 24.26G)安価センサーで①(390Hz, 51.57G)、⑤(400Hz, 24.29G)とほぼ一致しており、安価センサーでも十分使える事が分かった。共振時の加速度が小さい場合(今回の場合エリア⑨)は、高性能センサーでは⑨(398Hz, 2.67G)、安価なセンサーでは⑨(398Hz, 3.14G)とエリア①、⑤に比べると両センサーでの加速度の差が大きかった。これは、図16の結果にも表れているが、安価センサーの場合、加速度が低い場合の感度が悪いことが理由と考えられる。しかし、実際の共振試験で問題となるような加速度は数10G以上の場合が大半であり、その加速度であれば、今回使用した安価なセンサーでも十分使用できると思われる。

以上のことから、複数のセンサーによって共振位置を絞り込む方法では1個数千円程度の安価なセンサーによっても十分である。また、安価な加速度センサーの例としては図10の例以外にも図17⁵⁾のような性能(測定加速度、周波数など)の異なるセンサーが多くある。使用するセンサーは、共振探査の振動条件に応じて対応可能なセンサーを選定する。また、複数のセンサーを取り付ける際のセンサー重量が及ぼす共振探査への影響については、今回使用した安価センサーは高性能センサーと同様の重量であり非常に軽量であることと、複数の安価センサーの使用は大まかな共振位置の絞り込みが目的であり、安価センサーによって共振位置を可視化した後は、最終的に可視化された共振位置で1つの高性能センサーを用いた共振探査を行うことを想定しているため問題ないと考える。

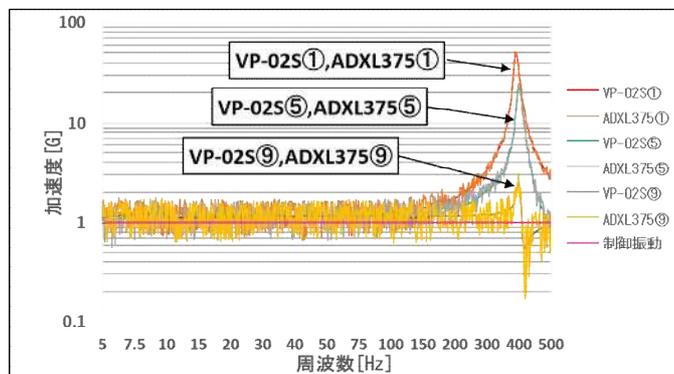


図16 高性能、安価加速度センサー比較

表1 高性能センサーの結果

	①	⑤	⑨
周波数 (Hz)	390	398	398
加速度 (G)	51.11	24.26	2.67

表2 安価センサーの結果

	①	⑤	⑨
周波数 (Hz)	390	400	398
加速度 (G)	51.57	24.29	3.14

● MPU-9250

- ・単価：約2,000[円]
- ・測定加速度：±16[G]
- ・周波数：～4000[Hz]



図17 安価加速度センサー例 (MPU-9250)

4. 結 言

本研究では、固有振動解析による共振位置の可視化と複数の安価な加速度センサーを用いた共振位置可視化によって、簡易かつ安価に共振位置を可視化する手法の検討を行った。これによって、試験体の3Dモデルがある場合にはシミュレーションによって、ない場合には安価な加速度センサーによって短時間で共振位置の可視化に活用できると考える。この際、設計図のない試験体や3次元CADモデル作成の困難な試験体を除いて、基本的にはシミュレーションによる手法が望ましく、共振探査の繰り返しによる試験体への余分な負荷を与えることがない。

安価な加速度センサーを用いた手法については県内企業の共振試験においてより使用しやすい形にするためにセンサーを簡易に試験体に取り付ける方法（磁石、粘着テープ、治具）についても検討が必要であると考えます。また、高性能センサー、安価センサーのどちらにおいても複数のセンサーを使用することによるセンサー重量が及ぼす共振探査への影響について、検証しノウハウを得ることでより高精度な共振探査につながると考える。

謝 辞

本研究で使用した県内企業製品及び製品の3Dモデルについて、国分電機株式会社様にご協力いただいたことを、ここにお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) JFE 振動試験（共振点探査および共振点耐久試験）
<https://www.jfe-tec.co.jp/tech-consul/vibration-testing.html>
- 2) IMV 圧電式加速度ピックアップ
<https://we-are-imv.com/business/products/item/vibrograph-e-comp/#VP-02S>
- 3) IMV 圧電式加速度カタログ
<https://we-are-imv.com/business/products/specifications/item/specifications-e-comp/#VP-02S>
- 4) Strawberry Linux ADXL375
<https://strawberry-linux.com/catalog/items?code=12112>
- 5) Strawberry Linux MPU-9250
<https://strawberry-linux.com/catalog/items?code=12250>