

振動試験における非線形応答現象

Nonlinear Response Phenomena on Vibration Testing

中嶋 隆勝* 津田 和城*
Takamasa Nakajima Kazuki Tsuda

(2005年7月6日 受理)

キーワード：振動試験、非線形、包装貨物、自動車部品、鉄道車両部品、破損

1. はじめに

振動試験は、あらゆる製造業で必要な試験であり、振動が原因となる製品や部品の破損事故、あるいは動作不良事故などを未然に防ぐことを目的としている。たとえば、原子力発電所で用いられる部品が破損すれば大惨事を引き起こす危険性がある。また、医薬品のラベルが輸送中の振動で擦れるだけで医療過誤の原因となりかねない。その他、一見ささいな不具合でも、被害を受ける立場からすると大きな問題であり、それが続けば、製造者の信頼が失われ、経営上大きな損失につながる。このように、振動試験は製造者にとって非常に重要な試験であり、試験結果は、製品や部品が現実に受ける振動環境での耐久性を正確に反映する（以下、実地での再現性と表現する）ものでなければならない。

しかし、著者らは、これまで多くの企業より依頼を受けて振動試験を行ってきたが、現在の規格に従った振動試験を行っても、実地での振動が十分正確に再現されない事例を多く経験している。そして、その原因のひとつとして、製品や部品への振動伝達の非線形性が振動試験の基礎となる理論に考慮されていない点が考えられる。そこで、非線形現象の一例として、ガタを含む包装貨物の振動応答解析を行い、振動試験が実地での振動耐久性を再現できない現象が存在することを示した¹⁾。ここでは、まず、振動試験方法の概略および問題点について説明し、次に、非線形振動応答の具

体例を紹介する。最後に、ガタを含む包装貨物の数値解析結果を示し、問題となる現象の存在について記述する。

2. 振動試験方法

(1) 規格の種類

振動試験方法が規定されている JIS について抜粋し、その試験対象ごとに分類したものを表 1 にまとめる。分類 A は、包装貨物を対象とした試験であり、輸送中に生じる振動による内容物（製品）の損傷の可能性を確認できる。分類 B は、使用中に振動を受ける製品あるいは部品を対象とした試験であり、使用中に生じる振動による製品（部品）の破損、あるいは動作不良の可能性が確認される。使用中の振動の例としては、自動車や鉄道車両など、移動体に発生する振動、あるいは発電所、プラント、工場などでの稼働中に発生する振動などがある。分類 C は、地震による破損、動作不良、転倒などを確認する試験であり、通常、厳しい振動を受けることはないが、地震動が発生すれば、大きな被害を招くおそれのある設備や製品を試験の対象としている。

(2) 振動耐久性評価試験方法

表 1 で分類 A および分類 B に分類された試験は、供試品（部品、製品、あるいは包装貨物）が使用中や輸送中、長時間にわたって受け続ける振動を、短時間の振動試験で置き換える試験方法である。したがって、入力振動の加速度は、現実の振動加速度よりも高いレベルに設定され、試験時間の算定には S-N 曲線（疲労

* 情報電子部 信頼性・生活科学系

表1 振動試験方法が規定されている JIS 規格

分類	規格番号	規格名称
A	JIS Z 0232:2004	包装貨物 — 振動試験方法
B	JIS D 1601:1995	自動車部品振動試験方法
	JIS E 3014:1999	鉄道信号保安部品 — 振動試験方法
	JIS E 4031:1994	鉄道車両部品 — 振動試験方法
	JIS C 60068-2-6:1999 (JIS C 0040:1999)	環境試験方法 — 電気・電子 — 正弦波振動試験方法
	JIS C 60068-2-64:1997 (JIS C 0036:1997)	環境試験方法 — 電気・電子 — 広帯域ランダム振動試験方法及び指針
C	JIS S 1018:1995	家具の振動試験方法
	JIS C 60068-3-3:2000 (JIS C 0055:2000)	環境試験方法 — 電気・電子 — 機器の耐震試験方法の指針
	JIS C 60068-2-57:2002 (JIS C 0057:2002)	環境試験方法 — 電気・電子 — 時刻歴振動試験方法
	JIS C 60068-2-59:2001 (JIS C 0056:2001)	環境試験方法 — 電気・電子 — サインビート振動試験方法

特性を表す曲線) が用いられる^{2,3)}。一方、分類 C の試験では、地震が想定されているため、地震波を再現するのにさほど時間を必要とされない。そのため、これらの試験では、S-N 曲線による振動時間の短縮は行われず、想定される振動がそのまま用いられる。

すべての振動試験に共通して、振動試験は供試品が使用中や輸送中、地震などで受ける振動に対して十分な耐久性を有しているかを確認する試験であるといえる。そのため、試験結果の信頼性を高めるためには、供試品の実地での振動の予測精度を高める必要があり、供試品が受ける振動を事前に調査した上で、試験条件が決定されなければならない。たとえば、ある部品が工場間輸送される場合、まず、輸送経路に関する路面状態および距離、使用するトラックの種類(リーフ型、エアサスペンション型)などのデータから部品が受ける振動を推定する。次に、可能性のあるあらゆる振動を想定して十分な安全性が確保される試験条件を決定する。最後に、振動耐久性試験を実施し、部品が十分に安全に工場間輸送されるよう輸送形態の見直しや部品強度の改良などを行う。ただし、無意味に厳しい試験条件を決定すれば、過剰品質となり余分なコストが必要となる。逆に、実地よりも低いレベルの試験条件が決定されると、輸送中の破損事故を引き起こす原因となる。このように、振動耐久性評価を行う上で実地での再現性は非常に重要な項目であり、実地での振動を

十分に調査して、試験条件が決定されなければならない。実地での振動レベルの調査は、非常に時間と労力が必要な作業であるが、積極的に取り組むべき課題である。

3. 振動試験における問題点

振動試験を行う目的の多くは供試品の振動耐久性評価であり、その実地再現性を確保するためには、供試品が受ける振動を十分に把握しておき、それに適した試験条件を決定する必要があることは、前章で述べたとおりである。しかし、もっと大きく試験の信頼性を損ねる問題が存在する。それは、振動伝達の非線形性である。特に、表1で分類した分類 A および分類 B の試験では、S-N 曲線を用いた試験時間の短縮が行われるが、これは、入力振動と応答振動の関係に線形性が存在するという前提で成立する方法である。しかし、現在の耐久性評価試験は、それらの前提について十分な検討がなされないまま行われており、ガタを有する場合の衝突振動や、非線形材料や幾何学的大変形を伴う振動については、正しい評価がくだされているとは言い難い状況である。5章で紹介する限界入力加速度を超える振動が加われば、線形応答の場合と比較して10倍以上の厳しさの振動が製品や製品内部へ伝わる。たとえば、実地での振動レベルが限界入力加速度を超

えることがないにもかかわらず、試験条件が限界入力加速度を超えるレベルに設定されていれば、実地の10倍以上の厳しい振動が供試品に加えられることになる。その結果、出荷するためには試験への合格が義務付けられており、改良のため多大なコストが必要となる。

4. 振動応答現象の計測事例

これまでに振動試験で計測した非線形振動応答現象を紹介する。まず、これまで、線形振動理論で一般的に広く紹介されている振動応答の代表事例を取り上げた後、非線形振動の事例を取り上げる。後者の事例は、ともにすべての入力振動に対して現れる現象ではないため、耐久性評価結果の実地再現性が妨げられることになる。

(1) 線形応答現象

振動台上に、ロッカー（以下、製品Aと称す）を固定し、振動台を水平方向に振動数10Hz、最大加速度 4m/s^2 の正弦波で加振したときに、振動台および製品A上の天部に生じる振動加速度を加速度センサーにより計測する。計測結果を図1に示す。図より、入力、応答ともに波形が理想的な正弦波であり、かつ、入力と同じ振動数(10Hz)の振動が応答として計測されている。これらは、ほぼ理想的な線形応答現象の特徴であり、入力振動と応答振動の関係に線形性が存在することが期待される。しかし、現実には、すべての入力振動についてこのような応答が現れるわけではなく、同製品の同部位に異なる振動を入力した結果、次節で示す非線形応答現象Iが計測された。

(2) 非線形応答現象I（複雑な形状の応答波）

前節(1)と同様にして、製品A天部の水平方向正弦波振動(4Hz, 4m/s^2)に対する応答を計測する。計測結果を図2に示す。図より、入力振動がほぼ正弦波であるのに対して、応答振動は非常に複雑な波形となっており、明らかに非線形応答現象であることがわかる。すなわち、入力振動と応答振動の間に線形性は存在せず、入力振動の加速度レベルを2倍にしても、応答振動の加速度レベルは2倍とならず、誤った耐久性評価が行われる可能性がある。

(3) 非線形応答現象II（異なる振動数の応答波）

同様にして、別の製品(ディスプレイであり、以下、製品Bと称す)リアカバー部の水平方向正弦波振動(10Hz, 16.5m/s^2)に対する応答を計測する。計測結果を図3に示す。図より、入力振動がほぼ10Hzの単一振動数の正弦波であるのに対して、応答振動には約100Hzの強い振動数成分が含まれている。線形振動理

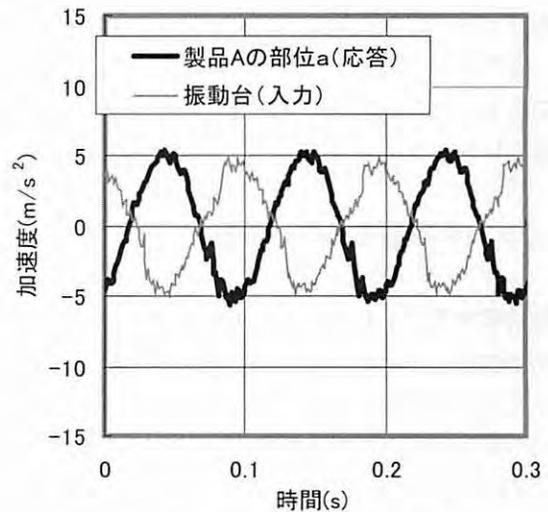


図1 線形振動応答の事例
(入力振動：10Hz, 4m/s^2)

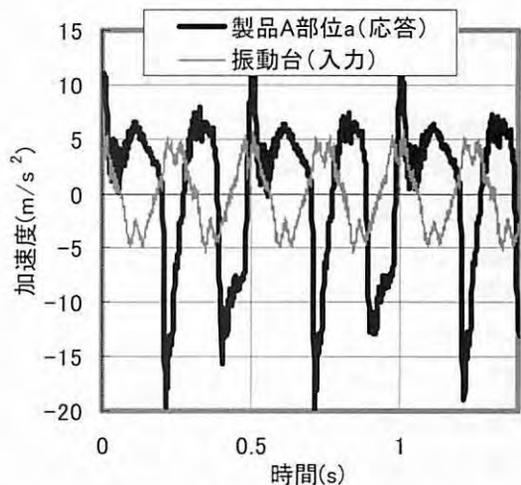


図2 非線形振動応答現象の事例 I
(入力：4Hz, 4m/s^2 , 正弦波振動)

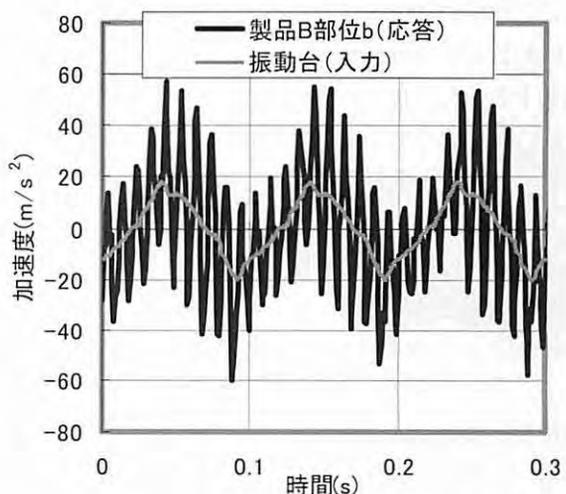


図3 非線形振動応答現象の計測事例 II
(入力：10Hz, 16.5m/s^2 , 正弦波振動)

論では、入力振動数以外の成分が応答振動に現れることはあらず、この現象も非線形応答現象であるといえる。蓄積疲労評価において、荷重の繰り返し回数は重要であり、この現象が耐久性評価を行う上で問題となることは言うまでもない。

5. ガタの非線形応答数値解析

(1) 包装貨物のモデル化および解析方法

包装貨物内の製品（内容品）と緩衝材の間にガタが存在する場合の包装貨物外部から加わる振動に対する内容品の振動応答の解析を行うために、図4に示す包装貨物のモデルを作成し、以下の仮定を設定する。容器および内容品は剛体であり、外力により容器の内寸法及び内容品の外寸法は変化せず、容器および緩衝材の質量は無視できるものとする。また、緩衝材は線形ばねとし、緩衝材と内容品は連結されていないため、緩衝材に圧縮方向の力は作用するが、引っ張り方向の力は作用しない。さらに、容器は振動台に固定されており、入力振動がそのまま伝搬される。ガタの大きさは、容器内寸法から、内容品外寸法および二つの緩衝材の自然長を足し合わせた分の差と定義した。したがって、厳密に言えば、ガタの大きさが0の場合にも、内容品の自重による下側緩衝材の変形量分の隙間は存在することになる。

各緩衝材の自然長は50mm、ばね定数は122.5kN/mとし、内容品の質量は10kgとする。この仕様（緩衝材の自然長およびばね定数）は、包装貨物の落下高さを1m、緩衝材の最大ひずみを0.8、内容品の許容加速度を 490m/s^2 に設定したときの緩衝包装設計手法⁴⁾により導出した設計寸法であり、ある程度、現実的な値に設定されている。その結果、ガタを考慮しない系の固有振動数は17.6Hzとなる。

数値解析には、数値積分法のひとつであるヴェルレ法を用い、時間ステップは0.1msとし、加振後、500s経過するまでの包装貨物の振動について数値計算を行う¹⁾。

(2) 数値解析結果および考察

(A) 限界入力加速度

加速度伝達率を最大応答加速度の最大入力加速度（以下、入力加速度と略す）に対する比と定義し、入力加速度が加速度伝達率に及ぼす影響について数値解析を用いて検討する。入力振動の振動数を5Hz、25Hz、50Hzの三種類に設定し、それぞれの入力加速度と加速度伝達率の関係を表した数値解析結果を図5に示す。図5(a)および(b)より、入力加速度があるしきい値

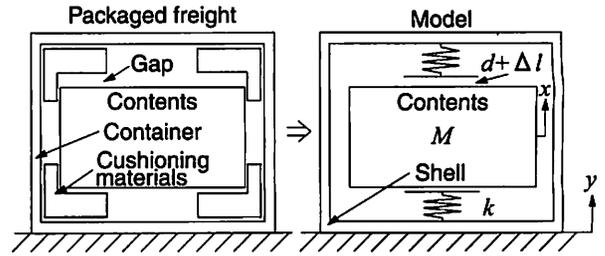


図4 包装貨物の数値解析モデル

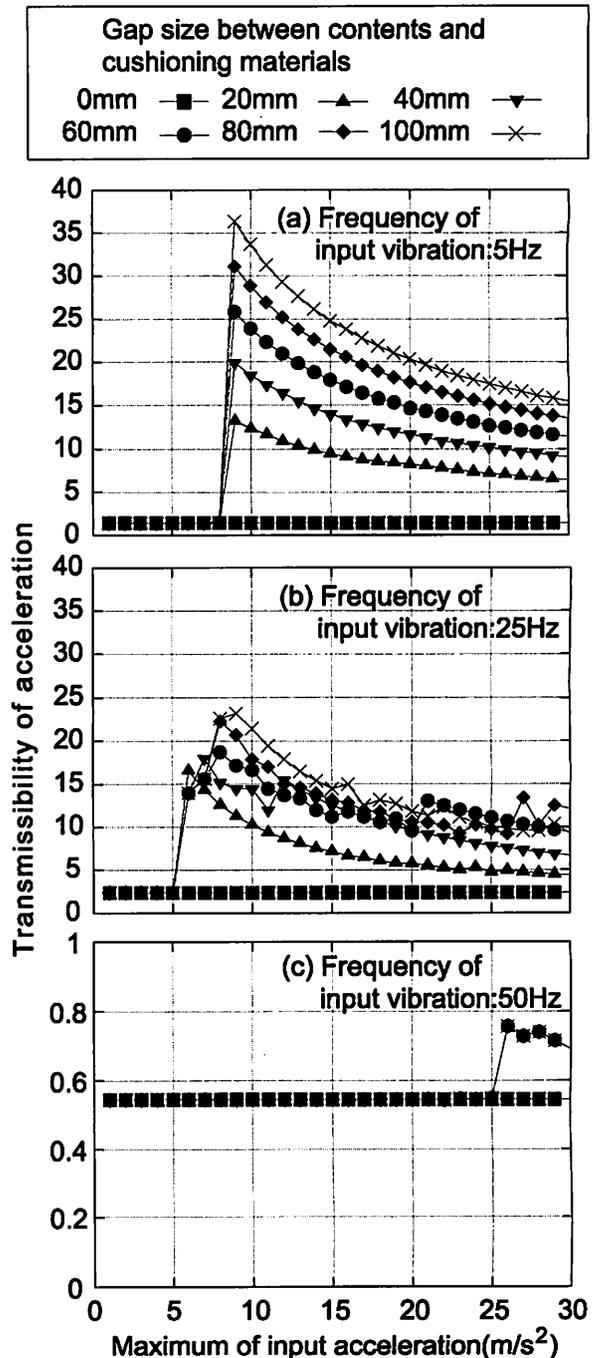


図5 入力加速度と伝達率の関係
(限界入力加速度が存在)

(a)では約 8m/s^2 であり、(b)では約 5m/s^2 である)を超えると、加速度伝達率が非連続的に増加し、内容品が激しく振動することがわかる(以下、このしきい値を限界入力加速度と呼ぶことにする)。一方、図5(c)では、 30m/s^2 の加速度の振動を加えても、加速度伝達率が1を超えることはなく、実用上、限界入力加速度は存在しないとみなすことができる。この限界入力加速度は、包装貨物内のガタだけの問題ではなく、ガタを有するあらゆる製品についても十分に起こりうる現象であることは容易に推測できる。

限界入力加速度による伝達率の急激な変化は、包装貨物だけでなく、あらゆる製品の振動耐久性評価を行う上で、十分に考慮されていなければならない問題であるが、現在の振動試験方法では全く考慮されていない。3章でも述べたように、実地での振動レベルが限界入力加速度よりも低いのに、評価試験の振動レベルが限界入力加速度よりも高ければ、厳しすぎる試験条件であり、試験に合格するために必要以上の多大なコストが費やされることになる。また、これとは逆に、実地において非常に短時間でも限界入力加速度を超える振動が生じる可能性があるのに、評価試験で限界入力加速度よりも低いレベルの振動しか加えない場合、評価試験には合格しても、製品の破損事故が発生し、場合によっては、人命に関わるような大事故につながる可能性もある。

著者らは、限界入力加速度によって試験評価の精度・信頼性が大幅に低下することを回避するため、新たな振動耐久性評価方法を考案し、特許出願(特願2003-424895)している。この方法は、試験条件を入力振動のレベルのみではなく、応答振動も用いて規定する試験方法であり、供試品の各部に伝わる振動レベルに応じて蓄積される疲労が計算され、実地で蓄積される疲労と同等の疲労が供試品に加わるまで試験が継続される方法である。現在、この方法を採用した試験装置の開発を進めている。

(B) 共振を引き起こす振動数

振動耐久性評価の現場において、共振とは、入力振動に比して非常に大きな応答振動が生じる現象であり、その振動数は共振振動数や共振点などの用語で表現されている。その言葉からもわかるように、共振を引き起こす振動数は、ある一点に限られており、その点はずれると加速度伝達率が急激に低下し、通常の振動、すなわち、加速度伝達率が1程度の振動に戻ってしまうと一般的には考えられている。しかし、ガタを有する場合の入力振動の振動数と加速度伝達率の関係を数値解析によって調べた結果、図6に示すように、共振

を引き起こす振動数の範囲は広帯域化する(以下、共振現象の広帯域化と呼ぶ)。さらに、その傾向は、入力振動の加速度が大きくなるにつれて強くなることが図6の(a)と(b)、(c)を比較することによりわかる。すなわち、入力振動の加速度が大きいくほど共振を引き起こす振動数の範囲が広く、逆に、入力振動の加速度が小さければ、共振現象を引き起こす範囲は狭く、場合によっては、共振を引き起こさない可能性もある。

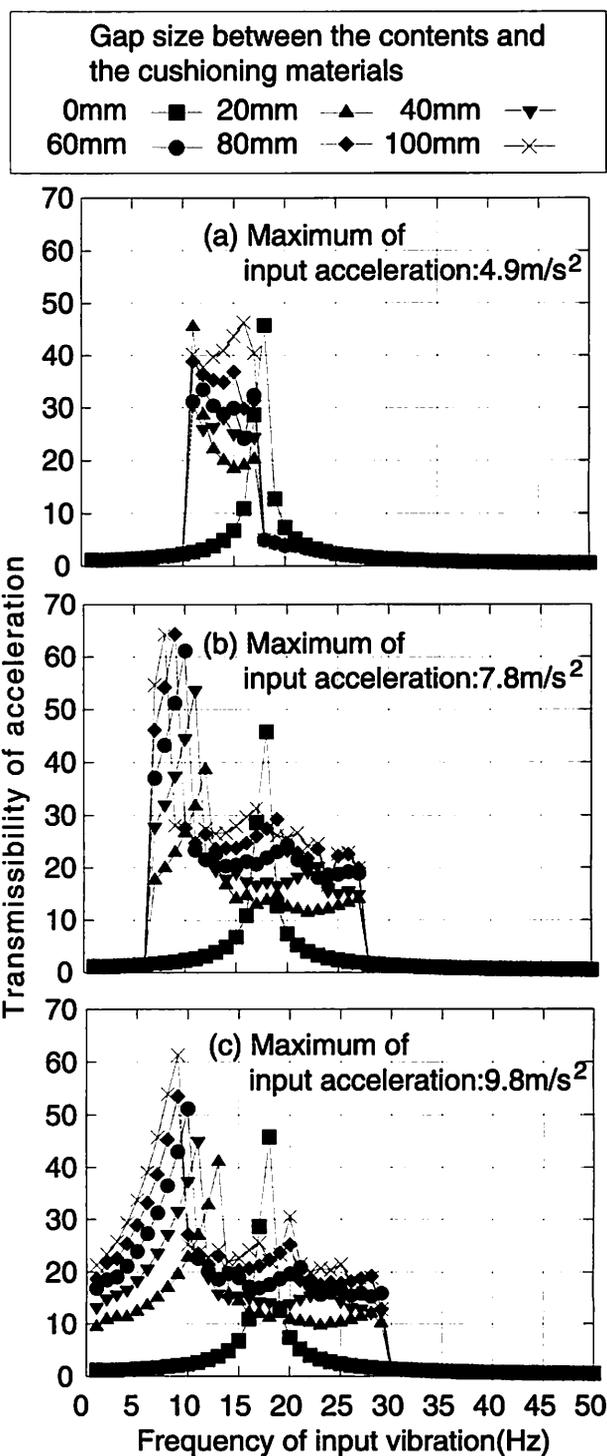


図6 入力振動数と伝達率の関係 (広帯域での共振現象)

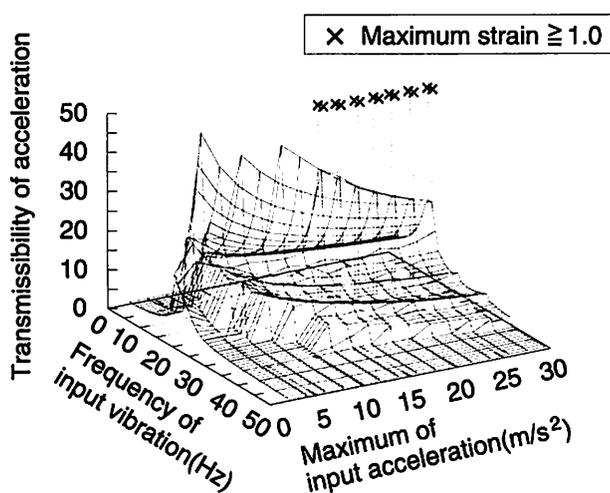


図7 入力振動数・入力加速度と伝達率の関係

実際の共振振動数検出試験において、ある共振現象が、特定の振動数だけではなく、ある幅を持った振動数範囲で発生することは、よく経験される現象である。また、低レベルの振動では生じない共振現象が、入力振動の加速度レベルを上げることによって、突然、現れるということもしばしば経験される現象である。これらの現象が数値解析によって再現されたとみることが出来る。

(C) 限界入力加速度の決定要素

図5(a)の各ガタの寸法に対する限界入力加速度を比較すると、ガタの大きさにかかわらず全て同じ値となっており、限界入力加速度はガタの大きさにはあまり影響を受けない傾向があることがわかる。一方、図5(a)と、図5(b)の各限界入力加速度について比較すると、入力振動の振動数が5Hz(図5(a))の場合、限界入力加速度が約 8m/s^2 であり、25Hz(図5(b))の場合、限界入力加速度は約 5m/s^2 である。さらに、振動数が50Hz(図5(c))の場合には、限界入力加速度

は約 25m/s^2 までの範囲では存在しない。このことから、入力振動の振動数は、限界入力加速度の値、さらには、その存在に大きく影響すると考えられる。

ガタの大きさを20mmに設定した数値解析によって、振動の入力加速度と振動数の二つのパラメータと加速度伝達率の関係を調べた結果を3次元のグラフにまとめ、図7に示す。図より、入力振動の振動数が系の固有振動数(ガタがない線形振動での共振振動数に相当)から離れるほど、限界入力加速度が大きくなる傾向がある。この傾向は、系の固有振動数よりも大きな振動数の入力振動を加えたときに顕著で、約40Hzを超えると限界入力加速度は 30m/s^2 以上の値となる。

6. おわりに

振動試験における供試品の非線形応答現象の具体例を紹介し、輸送包装貨物において代表的な非線形応答現象の一つとしてガタを例に挙げ、数値解析を行い、耐久性評価結果が実地で再現されないメカニズムを明らかにした。実地での再現性を保障するためには、実地において想定される振動をできるだけ正確に把握し、限界入力加速度など振動伝達の非線形性を十分に考慮した試験方法を開発しなければならない。著者らは、振動伝達の非線形性にも対応できる試験方法を考案し、特許出願している。

参考文献

- 1) 津田和城, 中嶋隆勝: 包装学会誌, 14 (2005) p.35.
- 2) たとえば, 酒井善治: 日本振動技術協会誌, 4 (2001) p.8
- 3) たとえば, 河野澄夫, 岩元睦夫: 食糧—その科学と技術—, 28 (1989) p.1
- 4) 日本包装技術協会: 新・包装技術便覧1, 日本生産性本部, (1995) p.2110