

当社は、各種の材料試験に加え、自動車そのものから構成部品の耐久試験、およびシミュレーション技術を駆使して、お客さまのさまざまな設計フェーズあるいは上市後の性能把握から課題解決までの支援を行っている。

自動車・部品の耐久性能評価では、まず車両で高速走行や悪路路面等の振動の発生状況、バリア衝突・オフセット衝突・側面衝突等の試験から衝撃の発生状況を把握する。以上の情報から構成部品で問題となる振動情報を的確にとらえて、さまざまな試験機を用いて振動再現および衝撃再現試験を目標回数まで実施し、耐久性能評価を行っている。自動車としての評価では4Poster試験機を用いて走行時の振動をそのまま試験機上で再現し、車両としての耐久性能評価を行っている。

本報では、このなかの振動試験機について、現状の試験対応状況から、振動試験、衝撃試験での性能評価の方法について現状のトレンドを示し、自動車のEV関連での試験への取り組みとその関連の自動車部品の試験例として、リバースエンジニアリングでの複合試験について紹介する。



技術本部
機械・プロセスソリューション事業部
機械技術部
おがた つよし
緒方 剛

D-1 振動試験機を用いた評価方法について

1.1 振動試験機の使用状況

振動試験はその特徴から試験の依頼は、自動車や飛行機、船舶など使用時に振動が発生するもの、また貨物に対して上記の輸送手段をもちいて移動する際に問題がないことを検証するための試験が一般的である。一方対象物が定置型の場合は、地震時の耐震性能評価の試験依頼が多い。

昨今、輸送機分野の振動試験のトレンドは、部品での規格評価を行う一般的な試験依頼に加え、部品をアセンブルしたユニット単位での評価依頼が増加傾向にある。

部品レベルであれば評価する加速度レベルにもよるが、試験体サイズから装置のテーブルサイズが600×600程度で、加振力として30kNクラスまでの加振機を用いて評価することが比較的多い。また、従来は金属製部材の評価を行うことが多かったが、輸送機分野においても樹脂やCFRPなどの非金属製部材の評価依頼が増えている。また、現状これらの試験は、温度管理下での振動試験の依頼を受けることが多くなっている。

一方、ユニット単位での現状の評価状況は、試験体の大きさはメートルサイズ、質量は数百kg程度になるのが一般的であり、装置としても50kN以上の加振力を持った試験機が必要となることが多い。

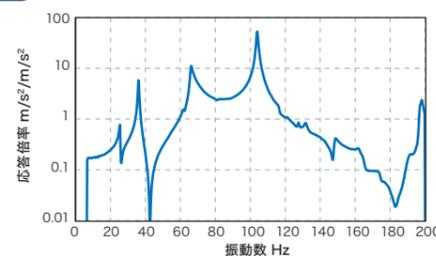
また、試験条件は、部品レベルおよびユニット単位でも同様に、その内容物を入れた状態での試験、循環させながらの試験、あるいは稼働状態での振動試験依頼がトレンドとなっている。このような条件の試験は、循環時の温度、圧力変化や動作安全性確認も必要になる。

1.2 振動試験の評価手法について

振動試験機をもちいた評価手法として従来から行われているものは、正弦波掃引加振(スイープ加振)を行い、共振振動数を把握

した後、耐久試験として、共振振動数での正弦波加振を目標回数まで行うというものである。JIS D 1601(自動車部品振動試験方法)¹⁾は、この試験方法で実施する規格となっている。この評価方法のメリットは、構造が単純な部品であれば共振振動数を確実に把握し、その共振振動数で振動印加を行うため部品にとって厳しい評価となり、この評価をクリアできれば十分に安全性を確保したことになる。デメリットは、構造が複雑な部品の場合は、多くの場合で共振振動数が2つ以上あることがあり、各共振振動数とも部品にとって破損につながるモードであることが考えられる。第1図に共振の波形例を示す。このような共振振動数が複数ある波形が発生した場合、耐久試験時に加振する共振振動数の選定を間違えると実条件の結果と異なる試験を実施する可能性がある。そのため、実機での耐久試験を行った場合に想定と異なった破損結果が見れる場合もあることから、耐久試験のための共振周波数の選定は非常に重要となる。また、車両の外部入力、不規則な路面からの振動に暴露されるランダム振動による入力が増加している。それに対して正弦波は特定の振動数にターゲットを絞って評価を行うことになるため、実走行では不具合が発生しないが正弦波加振試験を行うと問題が発生する場合がある。

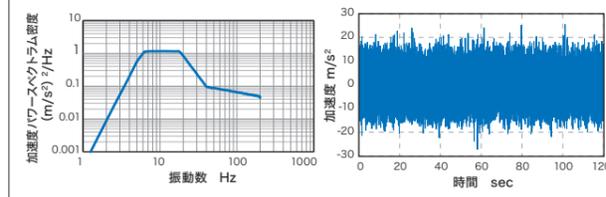
第1図 スイープ加振の結果、共振振動数が多く発生している例



正弦波加振試験を実施する上で問題となる例として、試験体に除振のためにゴムマウントをもちいたユニットでの評価があげられる。輸送機などの振動入力、ランダム振動に対して除振を行うため、数年かけても振動による劣化等はそれほど多くは発生しない。しかし、共振振動数による正弦波加振試験を実施するとランダム振動に比べ過大な振動の入力状態となる。これにより、マウントは熱影響を受け性能劣化を起し、除振されずに試験体に過度な振動入力や、マウントが熱変形を起こすなど、試験体に対して安定した試験の実施が難しい状況が発生する。この場合、代替マウントを用意する、あるいは熱影響を受けないように温度管理や冷却しながら振動試験を行うなど実現象では発生しない問題での試験手法の検討が別途必要になる。

正弦波加振のデメリットに加え、実現象での振動入力ランダム振動であるという状況、技術的には加振機制御の性能向上もあり、2000年代に入り規格でも振動試験機でランダム加振を採用した試験が徐々に出てくるようになってきている。例としては、第2図に示す2004年のJIS Z 0232 梱包貨物-振動試験方法²⁾や2008年のJIS E 4031 鉄道車両部品-振動及び衝撃試験方法³⁾などがあげられる。ランダム加振のメリットは、評価に必要な振動数範囲で振動を付加する点にある。そのため複雑な部品やユニットでの評価のように各部材の影響によりさまざまな共振振動数をより多く含んでいる場合でも評価に必要な振動を与えることができる。これにより共振振動数の選択ミスによる試験のやり直しが発生しなくなる。また、実測波による再現試験に比べ、より多くの被害量を与えることが可能となり、試験時間の短縮効果も期待できる。デメリットは、ランダム的な振動印加となるため、正弦波加振では容易であった部品の対象部位に適用されるS-N曲線を用いた被害量算定による試験回数設定が難しくなることや、試験を実施するための条件としてランダム波形の設定を、実現象の測定データから

第2図 ランダム加振での規格例(JIS Z 0232 附属書A表1より)³⁾



第3図 24kN加振機

	
最大加振力 24kN(正弦波) 24kNrms(ランダム波) 48kNpeak(衝撃波)	温度制御範囲 -40℃～180℃
振動数範囲 5～2,600Hz	湿度制御範囲 20%～98%
加振方向 垂直・水平	温度変動幅 ±0.5℃
最大変位 51mm _{rms}	湿度変動幅 ±4%RH
最大速度 2.2m/s _{0-p}	温度分布 ±3℃
最大加速度 1142m/s ² _{0-p}	温度下降時間 +20℃～-40℃ 60分以内
波 形 正弦波、ランダム波、衝撃波	温度上昇時間 -40℃～+180℃ 90分以内
最大搭載重量 400kg	内槽寸法 W1000mm×D1000mm ×H1000mm
可動部重量 21kg	加振方向 上下方向
消費電力 36kVA	消費電力 19kVA
a) 水平方向加振	b) 恒温槽設置時(上下方向加振)

適切に行わなければならないといった問題が発生する。

振動試験の試験手法においてランダム加振による振動評価は、振動の確からしさを確保する上で必要不可欠な手法であり、今後各輸送機分野においても広がっていくものと考えられる。

1.3 衝撃試験の試験手法について

一方、振動試験機では正弦半波等をもちいた衝撃試験の実施も可能である。現状の振動試験機による衝撃試験は増幅器の性能向上等により、各社振動試験機メーカー共にその加振力を2倍まで上げて評価できるように装置が設計されているものが一般的である。そのため、従来、衝撃試験機で行われてきた衝撃試験の一部を振動試験機で実施するケースも増えてきている。振動試験機を使用するメリットは、試験の再現性が高い、試験時間が短縮できることである。デメリットは、衝撃試験が可能な加速度振幅や作用時間が限られており、思ったほど使用範囲が広がらない点である。一般的に動電型加振機は、性能限界として、変位が両振幅で50mm～100mm、速度が2m/s～3m/s程度となり、この二つのパラメータによる試験制限が発生することが多い。この変位、速度を超えると衝撃試験機による試験評価となる。

1.4 振動試験機について

当社は上記試験手法に対応するため、部品レベルの試験は加振力24kNの振動試験機で、ユニット単位の試験は加振力125kNの振動試験機で評価できる体制を整えている。

加振力24kNの試験機の性能を第3図に示す。水平のテーブルサイズが500×500あり、このテーブルを使用することで、重力方向が問題となる部品でも2kHzの高振動数まで振動試験を実施することが可能となっていることが特徴である。また、上下方向のみの加振であるが、温度管理下での複合試験(加振条件と温度条件を同時に与える)の実施も可能となっている。温度管理下の試験は樹脂部品での評価依頼が多く、その特徴から重力方向が重要になることが少ないため、キューブ型治具をもちいて3方向の試験を行うことが多い。また、部品レベルでの試験の特徴として部品の一部を外部に固定する試験依頼も多く、弊社では外部固定での試験が容易にできるように、門型フレームを組んで試験できる設備の改良を行って対応している。

加振力125kNの試験機の性能を第4図に示す。最大の特徴は水平テーブルであり、サイズが1200×1200あるにもかかわらず、2kHzまで加振できるようになっており、大型のユニット単位でも高い振動数まで振動特性の把握が可能である。また24kNの試験機でも導入している外部固定での試験対応も可能となっており、大型部品からユニット単位をさまざまな動作をさせながら試験を行う環境となっている。

第4図 125kN 2号機

	最大加振力 125kN(正弦波) 125kNrms(ランダム波) 250kNpeak(ショック波)
振動数範囲 5～2500Hz(SIN) 2～2500Hz(RANDOM)	加振方向 水平・垂直
振動台寸法 1.2m×1.2m 0.75m×0.75m	最大変位 51mm _{rms} (機械的ストローク 62mm _{0-p})
最大速度 2.0m/s _{0-p}	最大加速度 1000m/s ² (SIN) 700m/s ² (RANDOM) 2000m/s ² (SHOCK)
波 形 正弦波・ランダム波・ショック波・任意波	最大搭載質量 2000kg
可動部質量 70kg	

これ以外にも125kN加振機を保有している。第5図に性能を示す。この加振機の特徴はテーブルサイズが2000×1500あり、車両のハーフボディや大型部品等を取り付けての振動試験が可能である。また、振動子がテーブルの上下および水平に組み込まれているため、一度のセットで、水平1方向と上下方向を評価できるのが特徴である。これにより、組み換え作業が1回減り大型な試験体の場合、作業効率を上げられることになる。ただし、この装置は振動数範囲が1Hzから100Hzまでとなる。

第5図 125kN 1号機

最大加振力	125kN(正弦波) 75kNrms(ランダム波)
振動数範囲	1~100Hz ※1
振動台寸法	2.0m×1.5m ※2
加振方向	水平・垂直
最大変位	100mm _{r.p.p.} (水平) 51mm _{r.p.p.} (垂直)
最大速度	1.0 m/s _{r.p.p.}
最大加速度	30m/s ² _{r.p.p.} ※3
波 形	正弦波・ランダム波 ショック波・任意波
最大搭載質量	1500kg
可動部質量	1300kg

※1 拡張板取付時: 1~50Hz ※2 拡張板取付時: 2.0m×2.0m ※3 地震振動による制限

D-2 EV分野への取り組みおよび試験例

2.1 EV分野への取り組み

当社の振動試験機をもちいたEV関連の取り組みはお客さまからの試験依頼内容として、試験手法で示した一般的なスイープ加振試験と正弦波耐久試験の組み合わせに始まり、さまざまな規格試験も適宜実施している。また、EV関連部品でも重要な位置を占める2次電池は、EV関連部品と同様の特性試験に加え、各国の振動耐久性評価の規格試験を実施している。

振動試験を行う上で治具が試験体に対して十分剛性が高いものでない場合、試験体よりも治具の方が先に破損することや試験体に過度な振動を印加し試験体が破損する可能性がある。また、このような剛性の低い治具は、試験体と治具の共振現象が同時に発生するため、必要な共振現象を見逃す原因となる。このことから、治具設計は、振動試験において非常に重要な因子であり、試験体の共振による振動発生に対して十分に耐えうる剛性を確保した治具設計が必要不可欠となる。

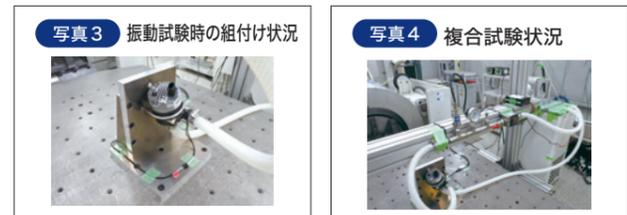
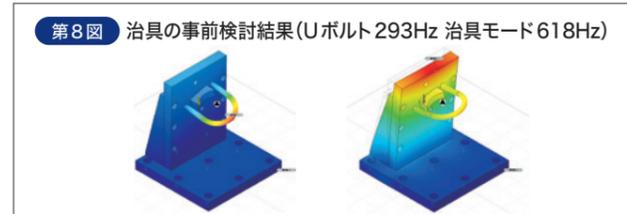
当社はこの治具設計から対応しており、EV車用の2次電池パックの振動試験に対する治具設計について述べる。まず、この2次電池パックが設置されていることが多く、そのパックの取付け方法はホワイトボディの各フレームに対してさまざまなアプローチで固定している。また、EV車用の2次電池パックのサイズは1.5m×2.0m程度の大きさのものも珍しくなく、重量も数百キロとなることから、ボディへの取り付け点は、十数か所から数十か所にわたるものが多い。このように複雑な形状に対して振動試験を実施する際は、全ての固定位置、設置情報の抽出、また要求周波数範囲に対して十分剛性の高い治具を製作することが試験を行う上で重要なポイントとなる。

トとなる。そのため、当社は3DCADの活用及び簡易数値計算をもちい、EV車用の2次電池パックが問題なく振動試験を実施できる治具設計を行っている。対象となるEV車用の2次電池パックの例を写真1に示す。

また、当社は、リバースエンジニアリングによる各種性能把握試験を業容の一つとして取り組んでいる。その中で振動試験に関して、通常はお客さまが設計製作された車両部品の試験であれば部品の取り付け状態についてドラフト図あるいは3Dデータを提供いただき、当社で試験を行う上で問題ない治具の設計、製作を行い試験実施している。しかし、リバースエンジニアリングで実施する場合は、対象試験体の取り付け状態や接触状況等を実機から把握する必要がある。そのため、当社はこれらの情報を把握するため、3次元測定により得られた3Dモデルを基に治具図面の作成を行っている。3Dモデル情報の取得として、第6図に3次元計測器の例を示す。これをもちいる大型で複雑な試験体に対して、この高精度な3Dモデルデータを用い、必要十分な治具の設計を行う。

2.2 リバースエンジニアリングでの試験例

リバースエンジニアリングでの試験例としてEWP(電動ウォータポンプ)の複合試験の実施状況を示す。写真2は、車両に実際に取り付けられているポンプの状況となる。振動試験は、実現象と同様の方向に正しく加振力を入力するため、取り付け状態を再現することが重要である。振動試験を実施するにあたり、実際の試験体の設置角度や取り付け状態を再現する。大型試験体や取り付け状態が複雑な試験体の場合は、先ほど示したように3次元計測器をもちいて3Dデータを作成し、そのデータを基に治具設計している。実機の取り付け状態に基づいて設計した治具を第7図に示す。



第1表 試験条件

加振方法	正弦波掃引加振(スイープ加振)
振動数範囲	5Hz~200Hz
加振振幅	1m/s ² ・5m/s ² ・10m/s ²
加振手法	0.5oct/min 順方向・片方向
加振方向	車両前後方向
ポンプ回転数(稼働時)	3600rpm
ポンプ流量(稼働時)	6L/min
流体温度	25℃(室温時) 60℃(高温時)
圧力	15kPa(高圧時)
試験パターン	1.ポンプON・流体室温・常圧 3.ポンプON・流体高温・常圧 2.ポンプOFF・流体室温・常圧 4.ポンプON・流体室温・高圧

第2表 試験結果(55Hz付近の共振)

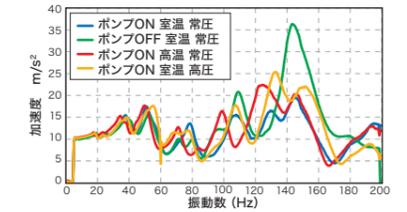
ポンプ	水温	圧力 負荷	加振振幅 m/s ²	振動数 Hz	応答振幅 m/s ²	応答 倍率
ON	室温	常圧	1	57.5	2.78	2.87
			5	53.5	9.98	1.99
			10	51.0	17.50	1.74
OFF	室温	常圧	1	55.5	1.99	1.98
			5	54.5	8.94	1.78
			10	52.5	15.78	1.57
ON	高温	常圧	1	54.5	2.62	2.60
			5	52.0	10.30	2.05
			10	50.0	17.66	1.76
ON	室温	高圧	1	58.5	2.96	2.92
			5	56.0	10.86	2.16
			10	55.5	17.62	1.75

今回の振動試験は、ポンプに確実に振動を伝搬させるため、車両の取り付け状態よりも強固な固定方法に変更して試験を実施している。また、本試験は低次の固有振動数把握を目的としたため、加振振動数が200Hz以下での試験実施とした治具設計を行った。試験体を治具に取り付けた条件の解析結果を第8図に示す。解析条件は、ポンプ質量を考慮した条件となっている。この解析の結果より、目標としている200Hzを十分にクリアしていたことから、この治具を製作した(写真3参照)。

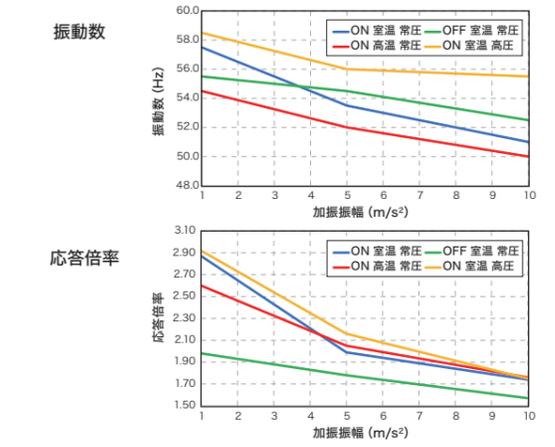
実際の取り付け状態を模擬し、共振を避けた治具を製作することができたのでポンプを稼働させながらさまざまな試験を行っている。ポンプを稼働する際は、循環水の温度管理、流量、さらにユニットの場合であれば圧力変動等を監視しながら試験を行う。試験状況を写真4に示す。このシステムは、流量、流体温度、流体圧力を計測可能とし、またチラーをもちいることで、循環水の温度を管理して試験が可能となっている。そのため、流体の情報を詳細に確認しながら振動試験を行うことができる。今回は、特性把握のためのスイープ加振試験を実施した。試験条件を第1表に示す。

第9図~第10図および第2表にポンプ加速度についてスイープ加振試験結果を示す。第9図は加振振幅10m/s²での試験パターン4パターンについて重ね書きで結果をまとめている。横軸に振動数(Hz)縦軸に加速度(m/s²)をとり、表示している。第2表および第10図は55Hzの共振振動数に的を絞り、振動数・振幅値および応答倍率をまとめたものである。この結果より、加振振幅が大きくなると共振振動数が徐々に下がっていることが確認

第9図 スイープ加振結果(振幅10m/s²での結果)



第10図 加振振幅依存性の確認



できる。また、加振振幅が大きくなると共振振動数が大きくなる割合が下がっていることも確認できる。

本試験結果より、以下のことが明らかとなった。

- 共振時の振動数は、ポンプONで水温高温時の場合が、振幅に関係なく振動数が低い。これは水温上昇により、使用したホースによる剛性の影響が考えられる。このことから、実機に対しても水温上昇により、固有振動数が低くなる現象が発生する可能性があることが分かった。
- 共振時の応答倍率は、ポンプOFFで水温常温時の場合が、全体的に低くなっていることがわかる。これはポンプを停止することで、循環水が質量として影響する割合が増えたものと考えられる。

このように当社は、単純な振動試験だけではなく複合的な評価についてもお客さまの要望に応じて柔軟に試験を実施している。

ここではポンプでの試験実施例を示した。当社はこのような部品単位レベルから、ユニット単位の振動試験に対してさまざまなアプローチで特性試験から耐久試験を行っている。

また、計算科学センターと連携することによって、振動試験のみにとどまらず、解析のアプローチを行うことで、現状把握から問題解決を実施することが可能であることが当社の強みとなっている。

本稿では、最初に振動試験機の輸送機分野での評価方法について紹介し、後半はリバースエンジニアリングの例として電動ウォータポンプの複合試験例について紹介した。また、当社は、今回紹介した振動試験機以外にも油圧式のアクチュエーターを組み合わせ、自動車そのものを加振できる4 Poster試験機も保有している(こべるにくす Vol. 18 (2009), No. 36にて報告)。今後も振動試験についてさまざまな試験技術を取り入れ、自動車総合試験会社としてお客さまのニーズに常に対応できる技術確立に引き続き努めていく。

参考文献 *1) JISD1601 (1995) 自動車部品振動試験方法
*2) JISZ0232 (2004) 梱包貨物-振動試験方法 最新は2020年
*3) JISE0431 (2008) 鉄道車両部品-振動及び衝撃試験方法 最新は2013年

*4) CREAFORM社ホームページ
<https://www.creaform3d.com/ja/ce-ding-soriyusiyon/potaburu3dsukiyanahandyscan-3d>