

(2) 数値解析と振動試験機を活用した電気自動車用バスバーの振動特性調査

松井 大治

電気自動車(以下、BEV)の駆動用バッテリーに搭載されている銅製バスバーについて、振動試験機と有限要素法(FEM)による数値解析を用いて振動特性の調査を行った。また得られた振動試験結果と数値解析結果を比較して、数値解析条件の妥当性を確認した。妥当性の確認できた解析条件にて、バスバーの材質を銅からアルミ合金に変更することによる振動特性への影響を確認した。

キーワード：有限要素法、FEM、固有値解析、周波数応答解析、振動試験

1. はじめに

近年、自動車産業では大きな変革が起こっており、その中の一つに自動車の電動化がある。BEVにおいては、航続距離を改善するために容量の大きいバッテリーを搭載することで、ボディサイズが同クラスのガソリン車に比べて車両重量が増加する傾向にある。重量増加に伴って電費が悪化するため、ガソリン車で行われている軽量化の取り組みは、BEVにおいても重要である。

当センターでは、市域企業の電動化への取り組み支援のため、EV 分解調査プロジェクトを立ち上げて、BEV に使用されている部品の調査を行っている。本報では、プロジェクトの一環として BEV の主要構成要素の一つであるバッテリーパック内に搭載されるバスバーに着目して振動特性の調査を行った。

バスバーは、BEV の駆動用バッテリーなどの電極端子として使用される大容量の電流を導電する導体である。バスバーの材質は銅を使うことが多いが、軽量化や低電費を実現するためにアルミ合金製バスバーの開発も進んでいる⁽¹⁾。

BEV のバッテリーに使用されるバスバーは、車両走行中の振動により、破損や変形などの不具合が発生する可能性があり、不具合を防ぐためには、バスバーの振動特性を把握して対策することが重要である。数値解析を用いることで、製品の製作前に振動特性を予測できるが、数値解析を有効活用するためには、妥当な

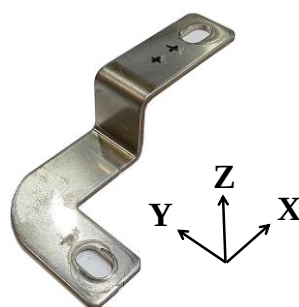
解析結果を得られているか検証することが重要である。

本報では、BEV の駆動用バッテリーに搭載されている銅製バスバーについて、振動試験と数値解析を用いて振動特性を調査した事例を報告する。また、実験結果と数値解析結果を比較して、解析条件の妥当性を確認したのち、バスバーの材質を銅からアルミ合金に変更した場合の振動特性への影響を確認した結果も報告する。

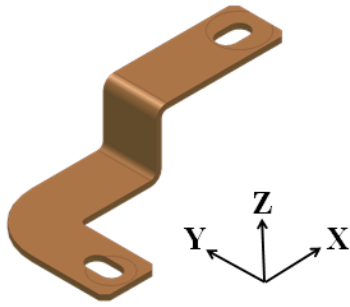
2. 試験方法

2.1 試料

今回、評価対象とした銅製バスバーを図 1 に示す。このバスバーは 2010 年式日産リーフの駆動用バッテリーパックで使われているものである。最外形寸法は、98.5mm(X)×49.5mm(Y)×24.5mm(Z)である。



(a) 銅製バスバー実物



(b) CAD データ

図 1 評価対象のバスバー

図 1(a)は実車から取り外した部品、図 1(b)は(a)の寸法計測結果をもとに作成した 3 次元の CAD データである。

2.2 振動試験機を用いた実機試験

振動試験機は、当センターで保有する IMV 社製 i240/SA3M を使用して、正弦波の振動数を徐々に変化させて加える掃引振動試験を行った。制御及び評価用の加速度ピックアップの取り付け位置を図 2 に示す。

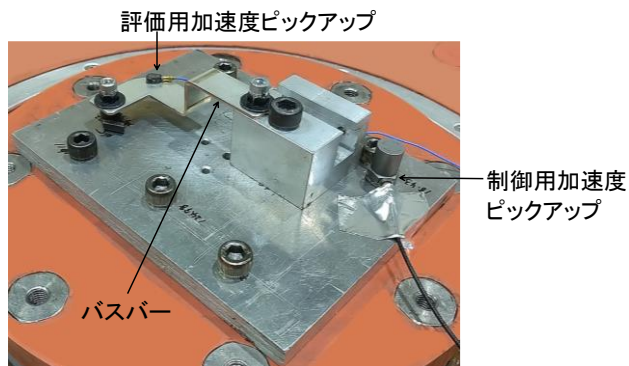


図 2 振動試験の様子

表 1 共振点探査試験の条件

項目	設定条件
振動数範囲 (Hz)	400～2000
加速度 片振幅(m/s^2)	5.0
掃引速度 (Hz/秒)	0.5
加振方向	上下 (図1のZ方向)

まず、共振点探査のために、表 1 の条件で試験を行った。その後、共振点探査試験で得られた共振ピーク付近の振動数について、表 2 の条件で試験を行い、変位を測定した。変位測定試験では、表 2 に示す振動数範囲において、増加方向と減少方向を合わせて 1 サイクルとして 5 サイクル行った。増加方向 5 回、減少方向 5 回の合計 10 回の測定における最大変位の平均を変位量とした。また、この時の振動数を共振振動数とした。

表 2 変位測定試験の条件

項目		設定条件
解析する 振動数 範囲(Hz)	1次	620～670
	2次	1170～1210
	3次	1845～1885
変位 複振幅(mm)	1次	0.005
	2次	0.001
	3次	0.0001
掃引速度 (Hz/秒)		0.25
加振方向		上下 (図1のZ方向)

2.3 有限要素法を用いた数値解析

数値解析は、当センターで保有する三次元 CAD システムに含まれる Solid Edge Simulation advanced の固有値解析と周波数応答解析の機能を使用した。

2.3.1 固有値解析

固有値解析は振動特性評価において、代表的な数値解析手法であり、固有振動数と変形モードを求めることができる。

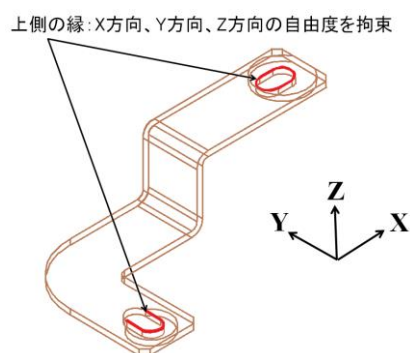
解析に使用した材料物性値と解析条件を表 3 に示す。ヤング率、密度、ポアソン比は、材質を純銅としたときの値である。

表 3 固有値解析に使用した材料物性値と解析条件

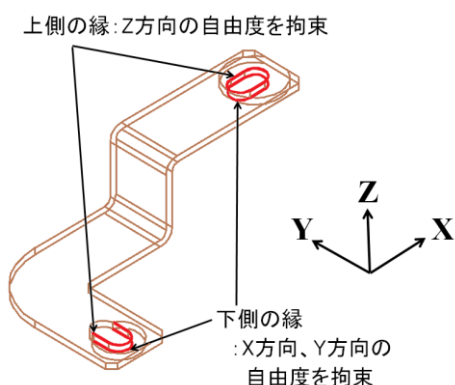
項目	設定条件
ヤング率(GPa)	117.2
密度(kg/m ³)	8940
ポアソン比	0.31
解析する振動数範囲(Hz)	10～2000
拘束条件	図3のとおり
解析する最大モード数	10
要素数	21.4万要素
要素の種類	4面体2次要素

振動試験時のバスバーの治具への固定を再現する拘束条件として、図 3 に示す 2 種類の条件を採用した。

(a)は、以前の事例報告⁽²⁾で固有値解析と周波数応答解析を行う際のボルト締結部の拘束条件として、妥当な結果が得られた条件である。(a)と(b)は固定部の剛性に差があり、(b)は、(a)よりも実際の試験の状態に近くなると予測して採用した。



(a) 拘束条件 1



(b) 拘束条件 2

図 3 バスバーの拘束条件

解析時の要素数については、事前に要素数を複数回変更して予備解析を行った結果から決定した。

2.3.2 周波数応答解析

周波数応答解析は、正弦波を入力条件として使用し、正弦波の振動数を変えることで、振動数に応じた解析対象物の応答を求める数値解析手法である。周波数応答解析では、加わる荷重の方向や解析対象物の減衰を考慮することができるため、変位量や応力の評価が可能となる。

当センターの保有する機器ではモード法による周波数応答解析を行うことができる。モード法は、固有値解析から得られた固有振動数と変形モードをもとに、各モードが独立であると仮定して計算を行う手法である。2.3.1 で得られた解析結果を用いて周波数応答解析を行った。

拘束条件ごとの周波数応答解析の解析条件を表 4 及び表 5 に示す。

拘束条件については、図 3 の 2 種類で検証した。解析する振動数範囲については、固有値解析で得られた各拘束条件での固有振動数に応じて決定した。

変位複振幅は、振動試験に合わせた数値とした。解析では、プラス方向とマイナス方向の変位を同時に加えることができないため、変位複振幅をプラス方向とマイナス方向に等分して解析を行い、それぞれの解析で得られた値の和を変位量とした。材料物性値、要素数及び要素の種類は、表 3 の条件と同じである。

表 4 拘束条件 1 の周波数応答解析に使用した解析条件

項目		設定条件
解析する 振動数範囲(Hz)	1次	683～685
	2次	1193～1199
	3次	1932～1940
変位複振幅 (mm)	1次	0.005
	2次	0.001
	3次	0.0001
解析する振動数間隔(Hz)		0.2
加振方向		上下(図1のZ方向)
構造減衰係数		0.019

表 5 拘束条件 2 の周波数応答解析に使用した
解析条件

項目		設定条件
解析する 振動数範囲(Hz)	1次	653.4~655.4
	2次	1214~1220
	3次	1862~1870
変位複振幅 (mm)	1次	0.005
	2次	0.001
	3次	0.0001
解析する振動数間隔(Hz)		0.2
加振方向		上下(図1のZ方向)
構造減衰係数		0.019

周波数応答解析の結果は、1 次から 3 次それぞれについて、Z 方向(図 1)の変位量が最大となった時の振動数(共振振動数)と変位量で評価を行った。

なお、構造減衰係数については、実機から測定した対数減衰率を使用した。対数減衰率の測定方法については 2.4 に示す。

2.4 対数減衰率の測定

当センター保有の解析ソフトでは、周波数応答解析での減衰を構造減衰係数で設定する必要がある。構造減衰係数は、試料内部の摩擦損失等による減衰を表す係数である。内部摩擦の表現方法としては、対数減衰率、位相の遅れ角、共振曲線の半値幅などがある⁽³⁾。今回は当センター保有の周波数分析装置で測定できる対数減衰率を測定して、構造減衰係数として使用した。

測定は、インパルスハンマーによる加振試験にて行った。測定装置の構成を図 4 に、加振試験で得られた評価用加速度ピックアップ位置での波形の一例を図 5 に示す。図 5 下段に示す時間領域の応答波形をヒルベルト変換することで、図 5 上段に示す変換後の波形が得られる。変換後の波形から点 1 及び 2 の値を読み取り、式(1)を用いて対数減衰率を算出した。測定は 10 回を行い、平均値を算出した。

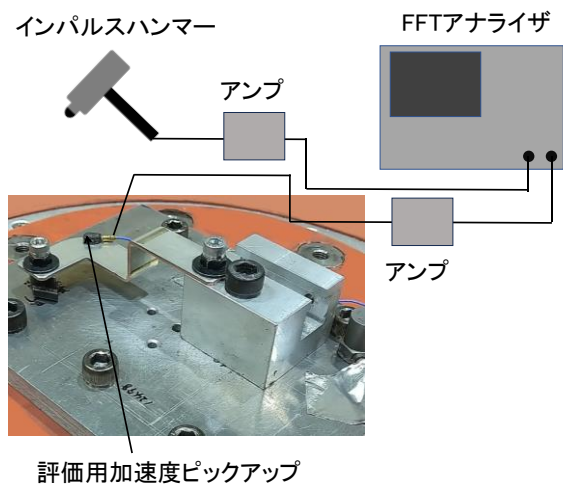


図 4 測定装置の構成

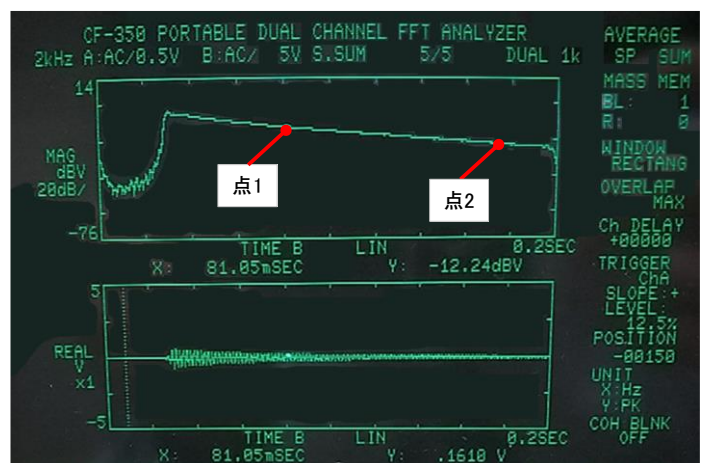


図 5 ヒルベルト変換後の波形

$$\delta = 0.1151 \cdot \left| \frac{\Delta Y}{\Delta X} \right| \cdot \frac{1}{f_n} \quad \dots (1)$$

δ : 対数減衰率

ΔY : 縦軸における 2 点間の差(dB)

ΔX : 横軸における 2 点間の差(秒)

f_n : 共振周波数(Hz)

2.5 材質変更による振動特性への影響の確認

2.3.1 で行った固有値解析について、材質をアルミ合金に変更して解析を行った。使用したアルミ合金の物性値を表 6 に示す。振動数範囲は 10~3000Hz として、その他の条件は表 3 の条件と同じである。

表 6 アルミ合金の物性値

項目	設定条件
ヤング率(GPa)	68.95
密度(kg/m ³)	2712
ポアソン比	0.33

3. 試験結果

3.1 振動試験機を用いた実機試験の結果

銅製バスバーの共振点探査試験の結果を図 6 に示す。横軸が振動数で、縦軸が伝達率である。図 6 から、伝達率の値が明確に極大となっている 645Hz(1 次)、1200Hz(2 次)、1870Hz(3 次)を頂点とする 3 か所を共振ピークと判断とした。

3 か所の共振ピーク付近の振動数について、変位測定試験を行った結果を表 7 に示す。

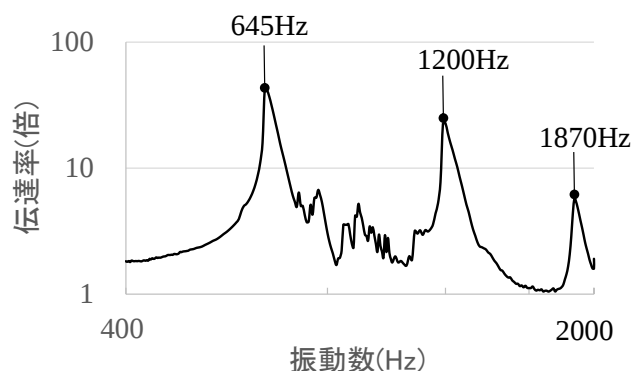


図 6 共振点探査試験の結果

表 7 変位測定試験の結果

次数	共振振動数(Hz)	変位量(mm)
1次	635	0.168
2次	1190	0.0288
3次	1860	0.000851

3.2 固有値解析の結果

銅製バスバーの固有値解析結果を表 8 に示す。どちらの拘束条件でも 3 個の固有振動数と変形モードが確認できた。固有振動数の値は異なるが、1～3 次の変形

モードは、いずれの拘束条件でも同じであった。

表 8 固有値解析結果(固有振動数と振動モード)

次数	拘束条件	固有振動数	変形モード	
			上方向への変形	下方向への変形
1次	1	684.2		
	2	653.9		
2次	1	1195		
	2	1216		
3次	1	1933		
	2	1862		

3.3 周波数応答解析の結果

銅製バスバーの周波数応答解析から得られた、1 次から 3 次のそれぞれのピークにおける共振振動数と変位量を表 9 に示す。変位量の評価位置は、図 2 の振動試験で評価用加速度ピックアップを取り付けた位置と同じ位置である。

表 9 周波数応答解析結果

次数	拘束条件	共振振動数(Hz)	変位量(mm)
1次	1	684.4	0.178
	2	654.4	0.173
2次	1	1198.4	0.0183
	2	1219.0	0.0199
3次	1	1930.0	0.000674
	2	1867.5	0.000676

3.4 対数減衰率の測定結果

インパルスハンマーによる加振試験から得られた対数減衰率の結果を表 10 に示す。測定 10 回の平均値は 0.0185 であった。周波数応答解析では、小数点第 3 位

までの値しか入力できないため、第 4 位を四捨五入して 0.019 を構造減衰係数として使用した。

4. 考察

4.1 銅製バスバーの試験及び解析結果の考察

表 8 に示すように、固有値解析では、いずれの拘束条件でも 3 個の固有振動数と変形モードを確認できた。いずれの拘束条件でも 1～3 次の変形モードは同じで、固有振動数は、1 次と 3 次は条件 2 の方が低く、2 次は条件 1 の方が低かった。

次に、周波数応答解析結果と変位測定の実験結果について、表 12 に共振振動数、表 13 に変位の比較を示す。

表 10 対数減衰率の結果

回数	対数減衰率
1	0.01860
2	0.01882
3	0.01898
4	0.01814
5	0.01879
6	0.01901
7	0.01839
8	0.01852
9	0.01833
10	0.01793

3.5 材質変更による振動特性への影響の確認結果

材質をアルミ合金に変更した後の固有値解析結果を表 11 に示す。

表 11 材質変更後の固有値解析結果

次数	拘束条件	固有振動数	変形モード	
			上方向への変形	下方向への変形
1次	1	957.2		
	2	912.8		
2次	1	1669		
	2	1697		
3次	1	2692		
	2	2592		

銅製バスバーの場合と同様に、どちらの拘束条件でも 3 個の固有振動数と変形モードが確認でき、固有振動数の値に差はあるが、1～3 次の変形モードは同じであった。

表 12 周波数応答解析と変位測定の実験結果

(共振振動数)

次数		共振振動数(Hz)	実験値との誤差(%)
1次	実験	635	
	拘束条件1	684.4	7.8
	拘束条件2	654.4	3.1
2次	実験	1190	
	拘束条件1	1198.4	0.7
	拘束条件2	1219.0	2.4
3次	実験	1860	
	拘束条件1	1930.0	3.8
	拘束条件2	1867.5	0.4

表 13 周波数応答解析と変位測定の実験結果

(変位量)

次数		変位量(mm)	実験値との誤差(%)
1次	実験	0.168	
	拘束条件1	0.178	6.0
	拘束条件2	0.173	3.0
2次	実験	0.0288	
	拘束条件1	0.0183	
	拘束条件2	0.0199	
3次	実験	0.000851	
	拘束条件1	0.000674	
	拘束条件2	0.000676	

共振振動数について、1～3 次の解析結果と試験結果の誤差が拘束条件 1 では 0.7～7.8%、拘束条件 2 は 0.4～3.1%であることから、条件 2 の方が条件 1 よりも実際の現象をよく表現していると考えられる。ただし、表 8 に

示すように、変形モードには拘束条件による差がなく、条件 1 でも固有振動数の誤差は 1 次の 7.8%が最大であるため、どちらの拘束条件でも妥当な解析結果を得られていると考える。今回の調査では、製品に使われている材料と解析条件で指定したヤング率と密度の差異や、解析に使用した CAD モデルには実物で見られる曲げ部の板厚減少や部位による板厚のバラつきを再現していないことで、それぞれ数%程度の誤差が生じると経験上予測できたため、10%程度以下の誤差であれば、妥当と判断した。

変位量について、1 次の振動数では試験結果と解析結果の誤差が拘束条件 1 で 6.0%、拘束条件 2 で 3.0%であり、どちらの条件でも妥当な解析結果が得られており、実際の現象をよりよく再現しているのは、誤差が小さい拘束条件 2 であると考え。2 次及び 3 次の振動数での変位量については、二つの理由により評価を行わないこととした。一つ目は変位量の絶対値が小さいため、二つ目は構造減衰係数として使用した対数減衰率は、時間軸波形のヒルベルト変換から求めており、1 次のモードに対応した値であるためである。評価対象物が、複数の固有振動数と変形モードを含む場合、それぞれのモードごとで減衰の値が異なることが多く、各モードの減衰は半値幅法⁽³⁾等により求める必要がある。今回は使用した機器の都合上、半値幅法での減衰率の測定ができないため、2 次及び 3 次の振動数での周波数応答解析は、1 次のモードの値を代用して行った。

振動数の値は、固有値解析と周波数応答解析の結果でわずかに差がある。これは、それぞれの解析の元となる運動方程式の形が異なるためと考える。固有値解析では、慣性力と復元力のみで運動方程式が記述されるのに対して、周波数応答解析では慣性力と復元力に加えて、粘性抵抗力及び外力で運動方程式が記述される。そのため、固有値解析では考慮されない、粘性抵抗力と外力の影響により固有振動数の値に差が生じていると考える。また、振動試験結果においても、共振点探索試験と変位測定試験では、ピークの振動数に差がみられる。これは、振動数を変化させる速さである掃引速度の違いによると考える。共振点探索試験では、共振振動数の目途付けが目的であったため、掃引速度

を速くし、変位測定試験では、より正確な変位量と共振振動数の測定のため、速度を遅くして行っている。

4.2 材質変更による振動特性への影響確認

銅製とアルミ合金製の固有値解析結果の比較を表 14 に示す。固有振動数に差はあるが、変形モードは表 8 と表 11 に示すように、1～3 次まで同じであった。

固有振動数の値は、いずれも拘束条件 2 で解析した結果である。固有振動数は、1～3 次いずれも銅に比べてアルミ合金の方が高くなった。今回の検証では、解析条件や形状は同じため、材質による差異が出ている。同一形状の製品で銅製とアルミ合金製を比べた場合、ヤング率は銅がアルミ合金の 1.7 倍であるため銅の方が剛性は高く、密度は銅がアルミ合金に対して 3.3 倍であるため、アルミ合金の方が質量は軽い。固有振動数は、剛性が高く、質量が軽いほど高くなる。固有値解析の結果から、今回検証したバスバーの形状については、材質をアルミ合金に変更することで、剛性は低下するものの、密度の低下による質量低減の効果が大きく、固有振動数が高くなると考える。

表 14 銅製とアルミ合金製の固有値解析結果の比較

次数	固有振動数(Hz)	
	銅	アルミ合金
1次	653.9	912.8
2次	1216	1697
3次	1862	2592

5. おわりに

本調査のまとめは以下のとおりである。

- 1 銅製バスバーに対して、振動試験機と数値解析を用いて振動特性の調査を行った。
- 2 実験結果及び解析結果から、今回の評価対象物については、共振振動数は 2 種類の拘束条件のどちらも妥当な結果が得られたと考える。変位量は、1 次の共振ピークの値については、どちらの拘束条件でも妥当な結果が得られたと考える。
- 3 銅製バスバーの調査結果を元に、同一形状、同一条件にて、材質をアルミ合金に変更して振動特性へ

の影響を数値解析により確認した。1 次から 3 次の固有振動数はいずれも、アルミ合金製のバスバーの方が高くなった。変形モードについては、1 次から 3 次まで材質の違いによる差はなかった。

おわりに、本調査で使用した三次元 CAD システム及び大型振動試験機は、公益財団法人 JKA の公設工業試験研究所等における機械設備拡充により整備したものである。

参考文献

- (1) 日本軽金属株式会社、低接触抵抗プレメッキアルミニウムバスバー(PPAB)の開発・特許取得・商品化のお知らせ、ニュースリリース(2022 年 2 月 8 日)、
<https://www.nikkeikin.co.jp/news/news/p2022020220.html>、(参照 2024 年 06 月 17 日)
- (2) 松井 大治、振動試験用治具の固有振動数への数値解析条件の影響評価、広島市工業技術センター年報、第 35 巻(2021 年)、p. 34～39
- (3) 山川 博司ほか、構造減衰係数の精密測定、マイクロメカトロニクス、Vol. 44(2000 年)1 号、p. 32～42