

EV 駆動部品の使用環境を再現する性能試験システム

Performance Test System Reproduces the Usage Environment of EV Drive Components

大竹 克朋 OTAKE, Katsutomo

三春 勉 MIHARU, Tsutomu

宮本 洋圭 MIYAMOTO, Hiroyoshi

近年、自動車の電動化は、世界的な排ガス規制や脱炭素化が進む中、急速に進展している。特に、電気自動車（EV）の開発は複雑な制御が必要になるため試験工数が膨大となる可能性があり、EV 向け試験装置の需要が高まっている。富士電機は、このような需要に対して EV 駆動部品性能試験システムを開発した。本システムは、実路走行時の負荷の模擬や、供試体が使用される温度と湿度の実環境を模擬することで、試験効率と信頼性向上に貢献する。

The electrification of automobiles has been progressing rapidly today in the face of global emissions regulations and decarbonization. As electric vehicles (EVs) especially use complex control, the labor-hours for testing can significantly increase to develop them and demand has been increasing for EV test equipment. In response to this demand, Fuji Electric has developed an EV drive component performance test system. The system can simulate the load during actual road driving and actual environmental testing factors of temperature and humidity to improve test efficiency and reliability.

1 まえがき

自動車業界は世界的な排ガス規制や脱炭素化が進む中、急速に電動化が進展しており、国内でも 2030 年度に販売される自動車のうち約 55% が電気自動車（EV：Electric Vehicle）になるとの予測もある⁽¹⁾。EV は、ガソリン車やディーゼル車とは異なり複雑な制御が必要になるため試験工数が膨大となる可能性があり、信頼性の向上および試験効率の向上を図るために EV 向け試験装置の需要が高まっている。

このような需要に対して富士電機は EV 駆動部品の性能試験システムを開発した。

本稿では、EV 駆動部品の使用環境を再現する性能試験システムについて述べる。

2 EV 駆動部品の性能試験システムの概要

EV 駆動部品の性能試験システムは、EV 駆動部品性能試験機、恒温槽、温調装置で構成され、モータ・インバータ・減速機などの EV 駆動部品を供試体として、実際の運転環境に近い状態を再現可能な試験システムである。

図1に EV 駆動部品性能試験システムを示す。

EV モータは、小型・軽量化のため高速回転化が進んでおり、最高回転数は 20,000r/min に達している。また、高速回転化や EV モータ、インバータ、電子部品などの密集により車載部品の熱環境は厳しくなっている。このため厳しい温度環境下で性能や信頼性に問題ないか評価する必要がある。

2.1 EV 駆動部品性能試験機

EV 駆動部品性能試験機は、供試体単体で実路走行時の

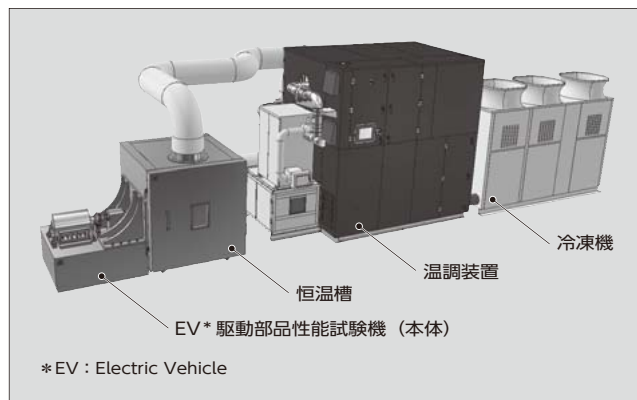


図1 EV 駆動部品性能試験システム

負荷を模擬した状態で評価するためのものである。この試験機は、供試体に対して負荷を発生させ、走行状態などの負荷状態を再現するためのダイナモメータ、ダイナモメータと駆動部品間の軸に掛かる回転方向の力を計測するトルクメータ、ダイナモメータおよび駆動部品に掛かる荷重を支持して軽減させる中間軸受け、EV モータを取り付けるためのイケールとこれらの部品を取り付けるための架台で構成される。図2に EV 駆動部品性能試験機（本体）を示す。

EV モータは、小型・軽量化と高出力化を両立するために高速回転化が不可欠である。試験装置においては高速回転によって生じる特有の問題に対処する必要がある。高速回転の装置は、共振の発生を抑えるため供試体の回転数に応じて装置の固有振動数を離調することや、高速運転による装置の温度上昇により冷却装置や潤滑のための補機類が必要となることから機械構成が煩雑になり、電氣的な課題よりも機械的な課題が多い。

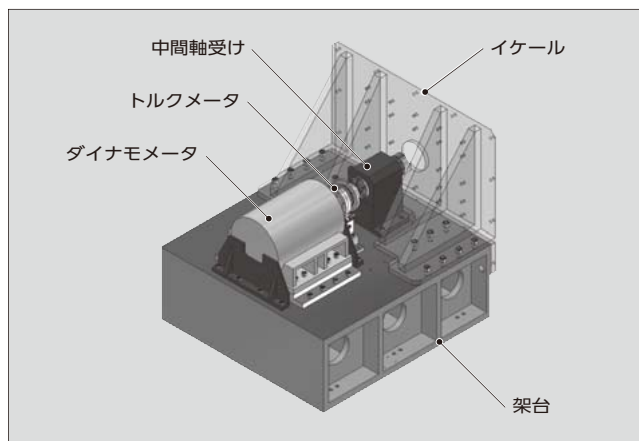


図2 EV 駆動部品性能試験機 (本体)

2.2 恒温槽・温調装置

恒温槽・温調装置は、恒温槽内の供試体が使用される温度や湿度試験環境を再現するためのものである。この装置は、恒温槽内の温度や湿度を制御する温調装置、温調装置内の冷却器に冷媒を供給するための冷凍機、水分を供給する加湿器などから構成される。図3に恒温槽・温調装置の構成図を示す。

EV は、モータやインバータ、バッテリーなどの小型大容量化、限られた空間への集積によって、電子部品の発熱量が増加している。電子部品は発熱量が増加することで、性能の低下や寿命が短くなることがある。自動車メーカーや自動車部品メーカーは、安心・安全性の観点から電子部品の信頼性評価の重要性がますます高まっており、実際の運転に近い状態でさまざまな使用環境を模擬した過酷な試験を行って品質を確認する必要がある。しかし、環境試験装置は小さな部品を評価する小容量の製品が一般的であり、駆動状態の中型・大型の自動車用部品を評価するような大容量の装置は少ない。また、ユニットの発熱負荷変動を吸収しながら温度環境を模擬する装置は、汎用ではなく一品生産品となるため価格が高く、市場に多くは導入されていない。そのため、コールド・ホットスタートから成り行きで評価試験を実施することが多い。

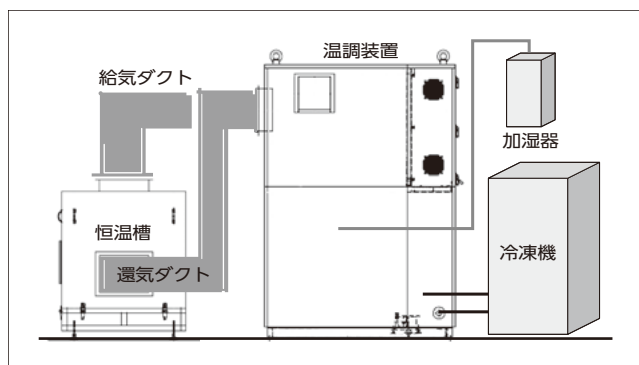


図3 恒温槽・温調装置の構成図

3 EV 駆動部品性能試験機の特徴

3.1 課題

高速回転の試験では、共振によりベアリングの急激な損耗を招き、回転軸系統の振れが増大し破損に至る恐れがある。機械の破損を回避するため、試験装置が持つ固有振動数と回転数を離す必要があり、対策として EV 駆動部品性能試験機の高剛性化と軽量化が有効である。また、遠心力を低減するため、回転軸の動バランス調整を考慮した設計が要求される。

高速回転の試験では、エネルギーの増加から発熱量が大きいため、潤滑不良によるベアリングの焼き付きによりフレーキング破損を招くことがある。このため、ベアリングの潤滑方法として、オイルを使用して潤滑と冷却を同時にする方法を採用することが一般的である。しかし、オイル潤滑を用いる場合は、オイルポンプ、熱交換器など機械構成が複雑となるほか、オイルミストにより周囲を汚してしまうなど、機器メンテナンスの範囲が広がるため、できれば避けたいというユーザーの要望が多くある。

3.2 対策と効果

信頼性の高い高速回転の試験装置を開発するためには、設計段階で装置の固有振動数を予測して適切な剛性を持った構造にする必要がある。運転時の回転数における振動数は 333 Hz (20,000r/min) であり、約 20% の離調率^(注)確保を設計値として設定した。試験装置の設計においては、有限要素法で振動解析を行い、固有振動数を得た。解析結果から、梁（はり）および厚みを調整して装置の高剛性化と軽量化のバランスを取って最適な構造を実現した。

図4に EV 駆動部品性能試験機の振動モードおよび 1 次固有振動数の解析結果を示す。

構造の最適化を行った結果、1 次振動モードでの固有周

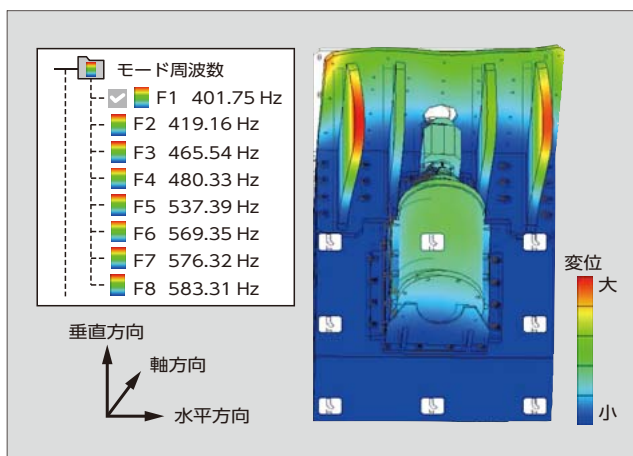


図4 EV 駆動部品性能試験機の振動モードおよび 1 次固有振動数の解析結果

〈注〉離調率：共振回転数の定格回転数に対する離れ率

表 1 EV 駆動部品性能試験機の振動レベル計測結果

対象	中間軸受け					
測定箇所	供試体側			ダイナモメータ側		
振動方向	軸	水平	垂直	軸	水平	垂直
振動速度 (mm/s)	1.87	1.82	0.01	0.01	2.52	1.99
対象	架台					
測定箇所	供試体側			ダイナモメータ側		
振動方向	軸	水平	垂直	軸	水平	垂直
振動速度 (mm/s)	0.30	0.43	0.26	0.27	0.48	0.25

波数は、401.75 Hz で回転周波数振動（333 Hz）に対して 20.4% の離調率を確保した。

また、共振検討に対する妥当性を確認するため実際に装置を運転して振動測定を実施した。測定では、特に回転体の重量を支えているため、最も振動が発生する可能性が高い中間軸受けと、回転系全体から振動の影響を受ける架台⁽²⁾を測定対象として評価をした。なお、振動測定の判定基準は、測定された振動値が正常値または異常値であるかを判定する判定基準として JIS B 0906 に則り、制限値として振動速度 2.8 mm/s 以下とした。

表 1 に EV 駆動部品性能試験機の振動レベル計測結果を示す。全ての測定箇所 で振動速度 2.8 mm/s 以下をクリアし、高速回転下で所望の振動レベルを達成した。

中間軸受けの潤滑方式は、オイル潤滑の代わりにグリース潤滑を採用した。グリース潤滑を採用するメリットは、機器配管などの分解作業、内部のオイル処理作業がなく、グリースアップによる簡単な作業でメンテナンスが済むためである。グリース潤滑はメンテナンス性が良い一方で、オイル潤滑よりも冷却効率が悪い⁽³⁾ため温度上昇による焼き付きに注意が必要である。

今回の設計においては、ベアリングの使用上限温度を 120℃以下とし、ベアリングの振動低減、回転精度の向上および適切な潤滑により中間軸受けの温度上昇を抑えるために、次の三つを重要項目として検討した。

(1) 遠心力を抑制する検討

遠心力によるベアリングの球面面圧を目標値まで下げるために、バランス等級を決定した。

(2) 回転精度と潤滑を考慮した与圧の設定

ベアリングにかかる軸方向の面圧を温度変化に対して一定与圧が与えられるように設計した。

(3) 潤滑剤の設定

耐熱性を考慮してウレア系グリースを選定した。

これらの設計の妥当性を確認するために、中間軸受けの

表 2 中間軸受け温度測定結果

	ダイナモメータ回転数 (r/min)
	20,000
供試体側温度 (℃)	60
ダイナモメータ側温度 (℃)	57

温度測定を行った。

表 2 に中間軸受け温度測定結果を示す。温度測定から使用上限値を満足する結果が得られた。

4 温調装置の特徴

4.1 課題

自動車試験には、ソーク運転とモード試験がある。ソーク運転は供試体が試験温度に達するまで停止するので発熱負荷はなく、冷凍機は軽負荷のため停止する。停止した冷凍機は、再起動防止遅延時間経過後に再起動するため、一定の冷却性能を発揮できず、安定した温度を維持できない。一方、モード試験は発熱負荷が 0～100% の間で大きく変動し、変動に合わせて装置を最適に制御して温度追従する必要がある。

これらの問題は、装置開発で設定した次の目標達成過程における課題として設定した。

- (a) 熱負荷変動に対して $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内の温度追従性能
- (b) 低温度環境下でも連続運転が可能な環境構築
- (c) 設置場所・付帯工事・調整時間を極小化

従来、自動車試験環境の構築は、常温・低温・高温それぞれの熱源機器を現地で組み合わせて施工する。今回の開発では、これらの課題に対して、全温度域の熱源機器を統合・最適化した。

4.2 対策と効果

熱負荷変動に対して $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内の温度追従性能を達成するためには、熱負荷変動の状態に関係なく冷凍機の停止やハンチングを防止し、安定した運転が必要である。温調装置は、図 5 に示す構成とした。

- (a) ソーク運転時などの冷凍機が軽負荷停止する対策として、図 5 に示す蒸発器(a)の 1 次側に設置した電気ヒータ(a)を出力し、蒸発器(a)に熱負荷を与え、冷凍機運転を継続させた。一方、モード試験時は供試体の発

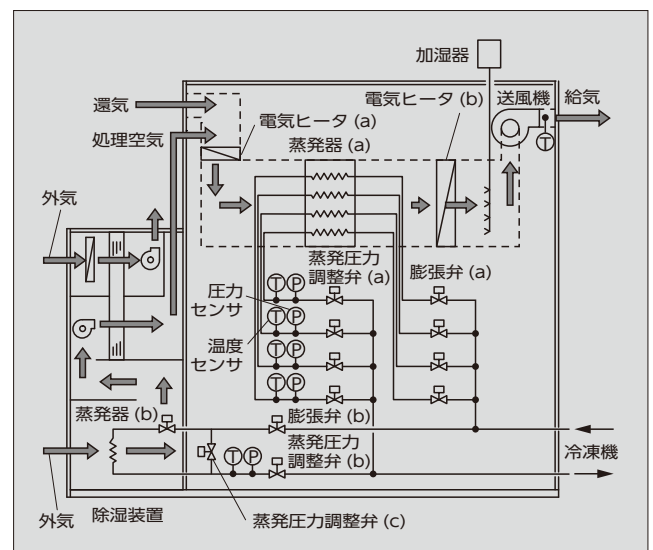


図 5 温調装置の構成図

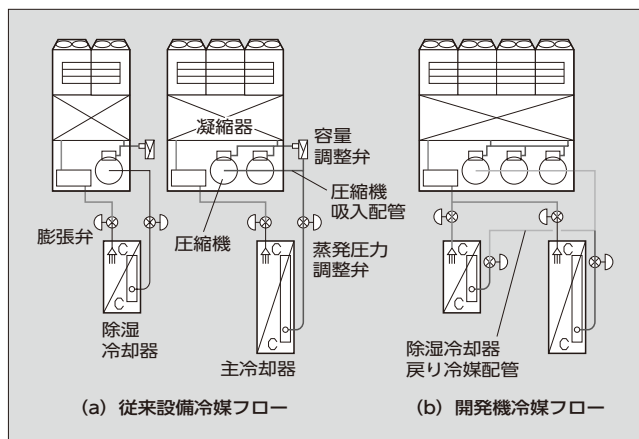


図6 冷凍回路

熱負荷変動に合わせて膨張弁(a)による冷媒流量制御、および蒸発圧力調整弁(a)による蒸発圧力制御を行う。さらに、蒸発器(a)の前後の電気ヒータの可変PID制御の最適値を見だし、冷凍機運転の継続と両立を実現した。

(b) 冷凍機系統の統合により、同一となった除湿装置の冷却器出口の戻り冷媒配管を利用して、サクシオンインジェクション回路を形成した結果、圧縮機の吸入配管ガス温度を仕様内に抑え、高温設定の軽負荷時でも冷凍機の連続運転が確保された。図6に冷凍回路を示す。

(c) 温度帯が異なる蒸発器には、効率面からそれぞれ異なる冷凍機を選定すること、 -40°C を実現するためには、低温用冷凍機を用いることなどの慣例を排除して、大きな負荷変動にも対応できる冷凍機を採用した。従来設備の冷媒はR404A（沸点 -46.1°C ）であったが、開発機はR410A（沸点 -51.4°C ）とした。図7に従来設備と開発機の冷凍機容量制御を示す。従来設備では中温インバータ機と超低温定速機で構成していたが、開発機は、全温度域を網羅できるインバータ機を採用し、負荷変動に対して安定した容量制御を発揮できるようにした。

図8にモード試験時の負荷追従性を示す。図8に示すように(a)～(b)の対策により、最も厳しい条件である低温領域

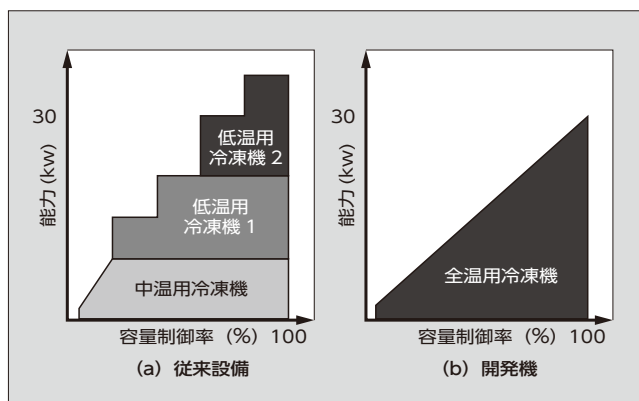


図7 従来設備と開発機の冷凍機容量制御

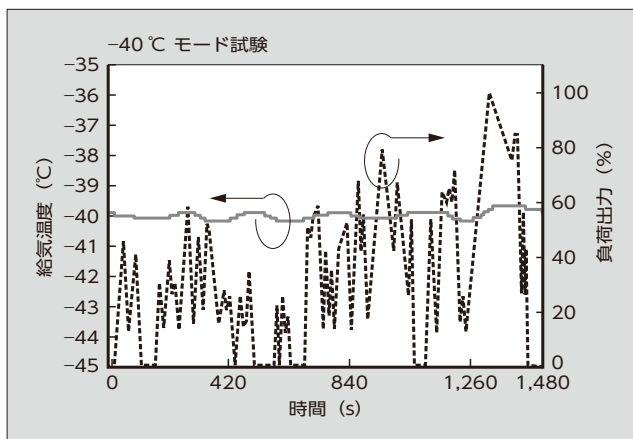


図8 モード試験時の負荷追従性

表3 従来設備との比較結果

従来設備		
冷却器		冷凍機
中温冷却器1	14列20段×830 L	10 HPインバータ機
低温冷却器2	16列10段×830 L	20 HP定速機
低温冷却器3	16列10段×830 L	20 HP定速機
除湿プレクーラ	16列6段×250 L	5 HPインバータ機
合計	522 m (1.3 m ³)* ¹	55 HP (4.3 m ²)* ²

製品試作機		
冷却器		冷凍機
全温冷却器	22列20段×650 L (4分流)	40 HPインバータ機
除湿プレクーラ	16列6段×250 L	
合計	310 m (0.7 m ³)* ¹	40 HP (2.4 m ²)* ²

*1 冷却器有効部の占有する体積
*2 冷凍機設置面積

において、負荷が0～100%変動した場合でも、給気温度を $-40\pm 1^{\circ}\text{C}$ の範囲に抑えた高精度な負荷追従性を実現した。

また、(a)～(c)などの対策を行う過程において、構成機器を総合的に最適化検討した結果、パッケージ化した小型製品を完成させることができた。代表例として、除湿装置導入により着霜がなくなったため、伝熱フィンのピッチを8 mmから6 mmに狭くした上、従来の冷却器の設計時に考慮される着霜による熱交換効率の低下を加味するために使用される着霜係数を1とできる（通常：0.6～0.7）ことから、装置サイズに影響する冷却器の体積の大幅な小型化（約45%）が実現した。併せて、前述したように冷凍機系統の統合を行い設置面積の縮小（約45%）を実現した。

表3に従来設備との比較を示す。

4 あとがき

EV駆動部品の使用環境を再現する性能試験システムについて述べた。これからのEVシステムは回転数の高速化

や高電圧化が予想され、新たに発生する技術課題に対応する必要がある。今後も、パワートレインにおける試験効率および信頼性の向上に貢献する製品を提供していく所存である。

参考文献

- (1) 世界の電動車（xEV）シェア [PRESS RELEASE], Boston Consulting Group, JANUARY 10, 2020, <https://www.bcg.com/publications/2020/drive-electric-cars-to-the-tipping-point>, (参照 2023-02-10) .
- (2) 振動技術研究会. ISO基準に基づく機械設備の状態監視と診断. 第2.2版.
- (3) NTN株式会社. 転がり軸受理論・実践ガイドブック.



大竹 克朋

特殊空調設備のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部情報ソリューション事業部 FA システム技術部主査。



三春 勉

自動車用試験装置の機械設計、エンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部情報ソリューション事業部 FA システム技術部主任。



宮本 洋圭

電動応用分野のエンジニアリング業務に従事。現在、富士電機株式会社パワエレ インダストリー事業本部情報ソリューション事業部 DX 推進室企画部主任。





*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。