

ハイブリッド車モータ駆動用電力半導体の 耐久信頼性評価

Evaluation of Durability and Reliability of Power Semiconductor Device for
Hybrid Car's Motor Driver

篠原 貞夫*

Sadao SHINOHARA

鷹 鶯 弘 明*

Hiroaki TAKANOHASHI

加藤 修司*

Syuuji KATOU

安 楽 文 雄*

Fumio ANRAKU

要 旨

ハイブリッド車におけるモータ駆動用電力半導体部品の電流と発熱温度に対しての、単体寿命特性と完成車使用環境との相関を明確にし、電力半導体部品の信頼度を求めた。信頼度は 99.915%以上、形状パラメータ(m)は 5.5 以上の結果が得られ、あわせて耐久信頼性の評価手法が確立できた。

ABSTRACT

Reliability of power semiconductor device for hybrid car's motor driver was verified through clarification of relationship between unit duration characteristics and actual service environment regarding electric current and temperature by heat generation. Reliability of 99.915% or more and shape parameter (m) of 5.5 or more were obtained. Further, evaluation method of durability and reliability was established.

1. まえがき

自動車の低燃費化および排気エミッション低減に対する要求が強まる中で、IMA(Integrated Motor Assist)システムはそれを実現する一つの手法として開発された。このシステムは、車両の減速時にブレーキから熱として捨てていたエネルギーを、エンジンとトランスミッションの間に配置したモータを使って回収してバッテリーに蓄え、そのエネルギーで加速時に、モータを駆動し、エンジンをアシストすることにより、燃料消費量を減らすというものである。

このシステムの中で、駆動・回生というエネルギー変換を最適に制御するために欠かせないのが、高速で大電流のオン・オフを行う電力半導体である。IMA システムの市場での品質を保証するためには、この電力半導体の耐久信頼性を的確に検証することが重要である。

今回、IMAシステム開発の中で、モータ駆動用電力半導体部品の耐久信頼性保証が確立できたので報告する。

2. IMA システム概要

Fig.1 に IMA システムの構成を示す。IMA システムは、主動力に排気量 1 リッタのリーンバーン VTEC(可変バルブタイミングリフト機構)エンジン、補助動力に薄型 DC ブラシレスモータ、電力変換を行うパワーコントロールユニット(PCU)、電力を保存する Ni-MH バッテリーで構成されている。このシステムの特徴は、主動力として常にエンジンが駆動しており、モータは走行状態に応じてアシストする補助動力として使われていて、システム全体がシンプルであり、モータ、バッテリー、PCU の全てを小型・軽量化できるところにある。走行状態とシステム状態の関係を以下に示す。

- ・加速時…エンジンに大きな負荷がかかる加速時は、モータが最大約 5kgf・m のトルクを発生しアシストする。
- ・クルーズ時…クルーズ走行時は、エンジンのみで安定した低燃費走行を行う。

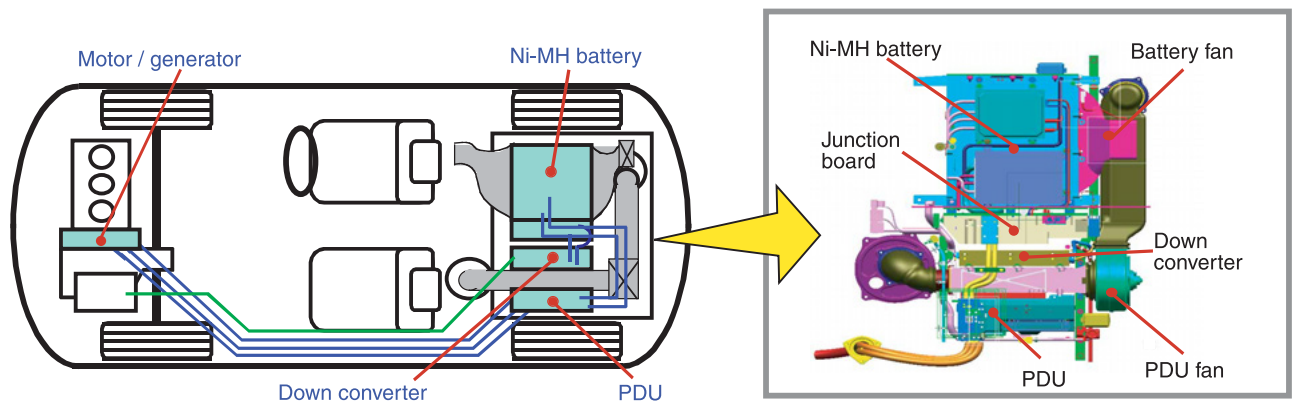


Fig.1 IMA system

- ・減速時…通常はブレーキから熱として捨てている減速エネルギーを、モータが回生制御により発電機的作用を果たし、バッテリーに充電する。
- ・停止時…アイドリングを自動的に停止し、燃料消費と排出ガスを抑える。

3. モータ駆動ユニットの機能概要

パワードライブユニット(PDU)の機能概要を Fig.2 に示す。主要機能部品は、電力半導体素子であるIGBT(Insulated Gate Bipolar Transister)、ダイオード、保護機能を内蔵したIPM(Intelligent Power Module)、IGBTのゲート駆動電源と入力電源電圧センサと ECU とのインターフェースを搭載したブリッドライユニット、電源電流を平滑化する電解コンデンサである。

モータは永久磁石式三相同期電動機である。ステータとロータの相対位置は3個のコミュテーションセンサで検出される。機械角60度ごとに訪れる一つの周期を6つに分割して検出し、6個のIGBTをオン・オフすることで、モータ

に接続される3相の端子 U・V・W に流す電流と方向を切り換えて、バッテリーからモータへ、あるいはモータからバッテリーへの電力の変換を行う。駆動力及び回生電力のコントロールは、切り換えのタイミングを進角・遅角、および短縮・延長させることと、デューティ制御により行っている。

ここで3相出力に流れる電流に対しIGBT、ダイオードに流れる電流値は、

$$I(\text{IGBT}) = 1/2 \times I_m \times (\text{Duty}/100)$$

$$I(\text{ダイオード}) = 1/2 \times I_m \times (1 - \text{Duty}/100) \quad (1)$$

I_m : 出力電流

Duty : 入力信号 PWM デューティ

の関係式で近似できる。すなわち実車で計測できる出力電流(モータ入力電流)により、電力半導体素子に流れる電流値が導き出され、1素子当たりの損失(発熱量)を得ることが出来る。

出力電流に対する電力半導体素子の損失特性を、Fig.3に示す。

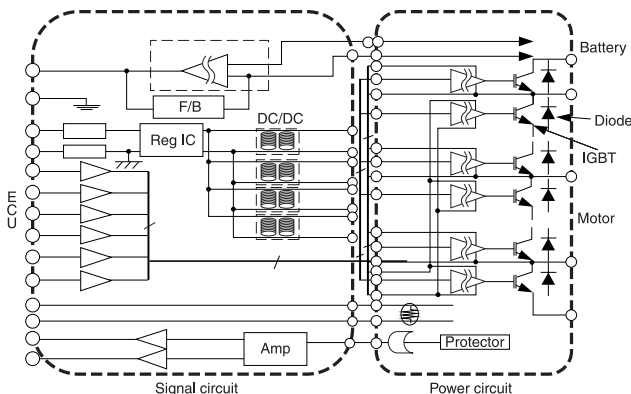


Fig.2 PDU block diagram

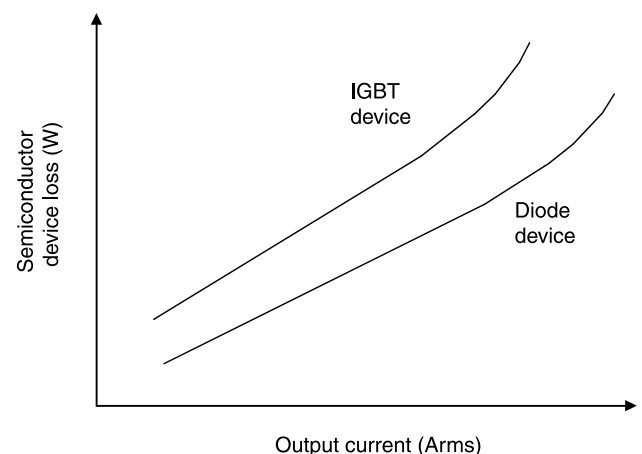


Fig.3 Power semiconductor device loss curve

4. 電力半導体の耐久信頼性評価手法

PDUの構成部品の中でも、重要機能である電力半導体は高電圧で大電流かつ高速で作動しており、環境的にも厳しい条件にさらされている。更に、市場で実際に使用される環境では、温度、湿度や振動などが複合的要因となって、部品にストレスがかかる。特に電力半導体は、自己発熱部品であるため、温度環境に対して厳しいデバイスのひとつである。耐久信頼性の検証は、各環境要因別に実施したり、あるいは構成材料や機能構造により、例えば、温度や振動の組み合わせ等の複合耐久条件を設定し実施している。一般に、この設定条件のモデリングが難しく、モデリング手法の構築が課題となっている。ここでは、電力半導体が発熱部品でもあり、特に使用環境的に厳しいため、温度と電流に対してのモデリングを実施し、耐久信頼性の評価を行った結果を報告する。

電力半導体素子を内蔵している IPM の内部構造を Fig.4 に示す。特に高熱になる部位が劣化や故障を起しやすい。(1)、使用条件と部品の故障要因を Table 1 にまとめた。この表から環境要因と故障部位が明確になり管理ポイントとして接合温度とケース温度を計測すれば良いことが分かる。実車使用時の温度、電流に対する管理温度推移を Fig.5 に

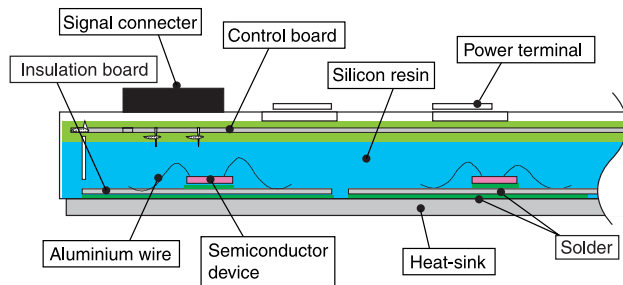


Fig.4 IPM internal diagram

Table 1 Trouble factor

IMA driving mode	Administrative point	Trouble point
Engine-start mode	Junction temperature	Aluminium-wire
Adjustable-speed mode	Case temperature	Chip-solder

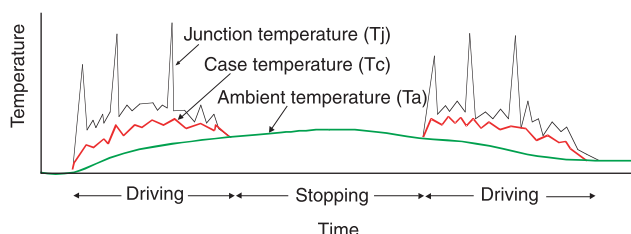


Fig.5 Transition temperature on the vehicle

示す。各種ストレスに対する一般的な寿命特性として、温度や電流等のストレスに対する寿命の特性と、実車のテストデータを Fig.6 に、環境試験を行なった時の故障時間から信頼度を求める表としてワイブルチャートを Fig.7 に示す。

検証の基本的考え方は、使用する部品単体のストレスに対する寿命特性を把握し、車両の使用頻度と生涯使用時間から Fig.6 のA点を求め、確認する手法を取る。

以下に耐久信頼性の評価手順について具体的に述べる。

- ① 電力半導体単体の寿命特性データを取る (Fig.6の寿命特性を参照)。
- ② 実車で走行した時の電流と温度のデータを取る。
- ③ ②で得た頻度から車両の生涯使用時間に換算する (Fig.6の実車データを参照)。
- ④ 実車データを①の加速係数を使って1点の温度、すなわち実車使用生涯寿命点 (Fig.6の点A) に換算する (ここで t_a 分は、実力に対する時間余裕分)。
- ⑤ 点Aと同じ温度条件で寿命試験を行い、ワイブルチャートにプロットする (Fig.7 参照)。
- ⑥ 点Aは、加速温度での車両生涯使用サイクル数であるので、ワイブルチャート上にプロットすることで信頼度が求められる (Fig.7 参照)。

ストレスに対する具体的な寿命データの取り方について

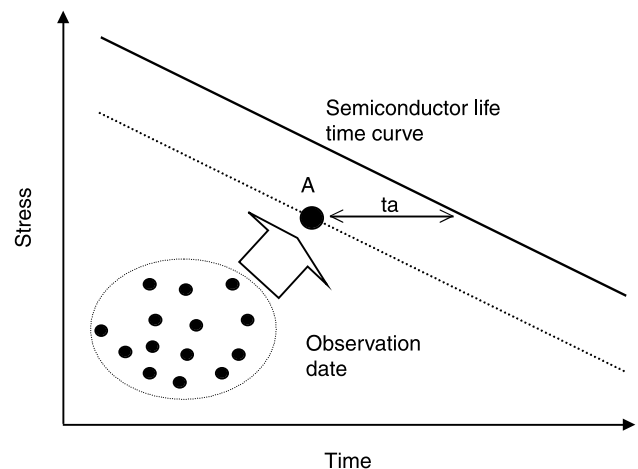


Fig.6 Durability curve

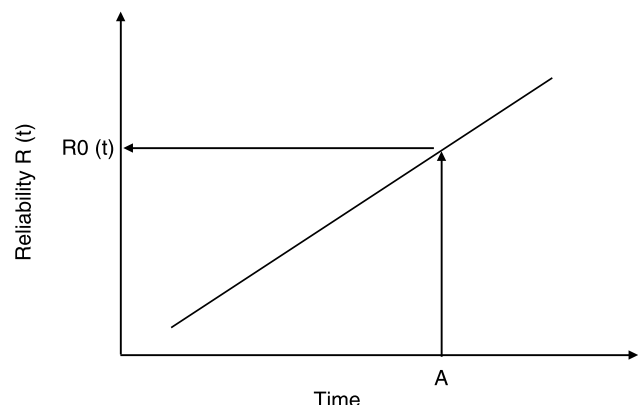


Fig.7 Weibull chart

以下に説明する。電力半導体は、Table 1 に示す通り、発熱部品である IGBT チップとダイオードチップから電極を引き出しているアルミニウムワイヤとはんだが、寿命を決定する上で重要な管理ポイントになる。

アルミニウムワイヤの寿命を決める主要パラメータは電流である。実車における走行時のデータから PDU の出力電流を計測する事により、式(1)に示す通り、電力半導体1素子当たりの電流に切り分けられる。次に式(2)より内部接合温度差(ΔT_j)が求められる。こうして電流ストレスを ΔT_j に置き換える。

$$\Delta T_j = R_{th} \times \{ (I_m \times V_{sat}) + P_{sw} \} \quad (2)$$

T_j : 内部接合温度

R_{th} : IPM パッケージ熱抵抗

I_m : PDU 出力電流

V_{sat} : 電力半導体オン電圧

P_{sw} : スイッチング損失

はんだの温度ストレスについては、IGBTチップ直下の温度を計測して用いる。

一方、電力半導体の単体寿命を決定する電流と温度については、PCT(Power Cycle Test)と TFT(Thermal Fatigue Test)の寿命データから検証する。

PCT : 大電流を流した時のアルミニウムワイヤの劣化を加速する寿命試験

TFT : 温度変化によるはんだ劣化を加速する寿命試験

5. 耐久信頼性評価結果

5.1. 電流に対する信頼性評価

エンジン始動時の環境における影響として、エンジンオイルの種類や低温時の粘性特性を考慮して始動電流のテスト条件を定めた。

ト条件を定めた。

通電時間は、エンジンクランク角度位置により乗り越しトルク値が変わり、同時に通電時間が変化するので、各要素の特性と完成車データにより設定する。実車での始動時のテスト結果を Fig.8 に示す。

始動時の電流通電が最も長い時間は、Fig.8 の t_1 である。車両生涯使用回数は、イグニッションキーを回した時と、アイドル停止後の始動があり、従来のガソリン車に比べ始動回数が多い。PCT 寿命特性に実車データをプロットし、車両生涯寿命点 A と同条件で行ったワイブルチャートから、車両生涯寿命到達時点での信頼度を求めると、99.915%であった。また、IMA に搭載した IPM の試作品は、ほぼ量産ラインと同一ラインで試作したものであるが、この時の故障形態もワイブルチャートより、形状パラメータ(m)が1より十分に大きい値($m = 6.2$)であり、耐久劣化型であることが確認できた。

5.2. 温度に対する耐久信頼性評価

車両使用環境温度については、気温や車体あるいは路面からの輻射熱、他の部品からの熱、および自己発熱の影響を受ける熱に分類できる。市場での使用を考慮して、実車テストでは、環境シャシダイナモを使って、日射量など酷暑地を想定した設定で実施している。気温や日射量などは販売仕向け地により異なる環境であるが、全世界仕様を考慮して、中でも厳しい環境を抽出し設定している。更に、実際に酷暑地域や寒冷地に実車を持ち込み、データを収集して寿命検証も行っている。

Fig.9は、シャシダイナモ上での一般走行時の電流、温度及び車速を示す。同じく走行条件のみを過酷状態で走行した場合を Fig.10 に示す。一般走行、過酷走行とも外気温度よりケース温度(ベース板温度)が 10℃から 12℃高くなっ

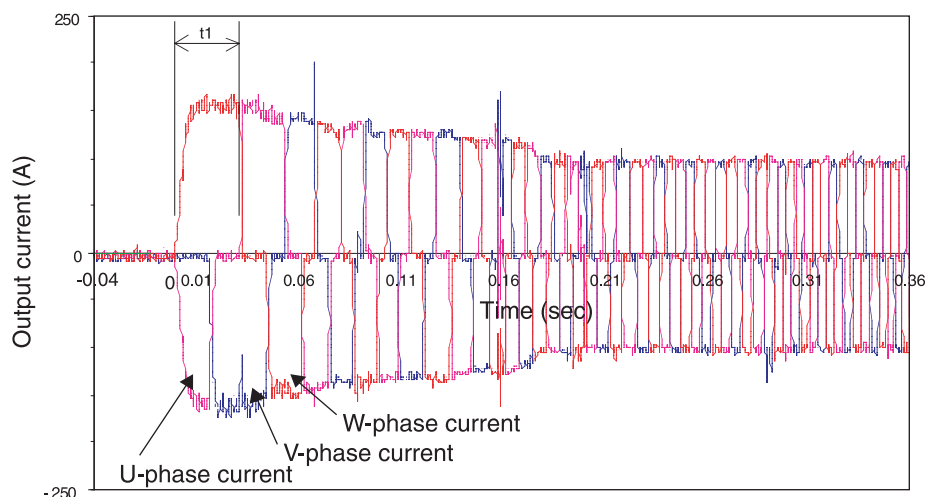


Fig.8 Starter current waveform

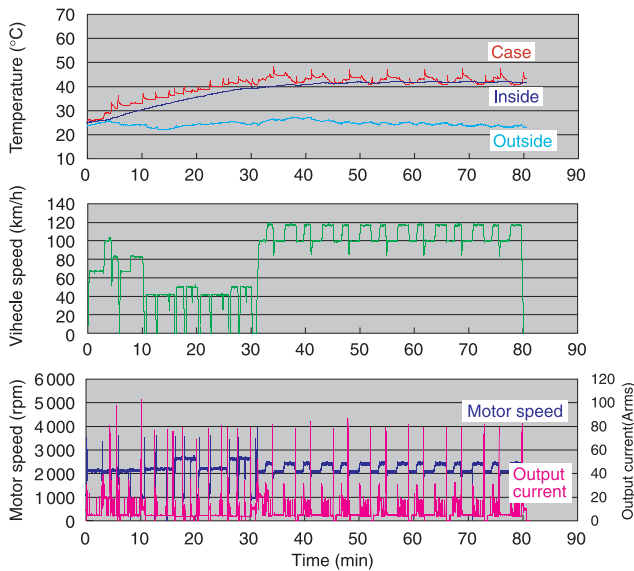


Fig.9 General driving test on dynamo bench

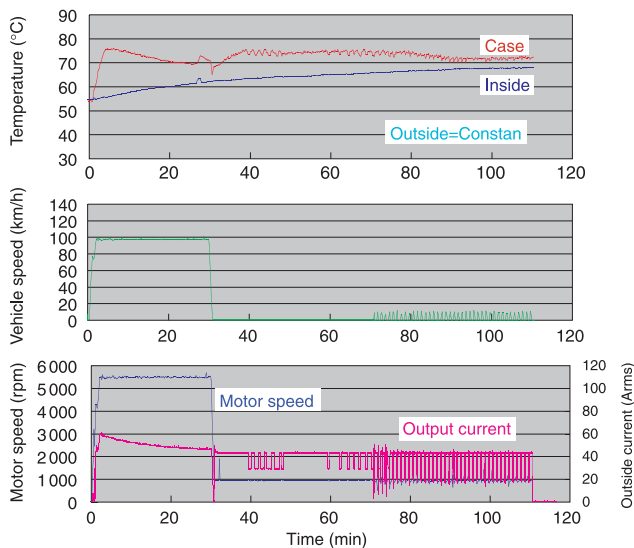


Fig.10 Hard driving test on dynamo bench

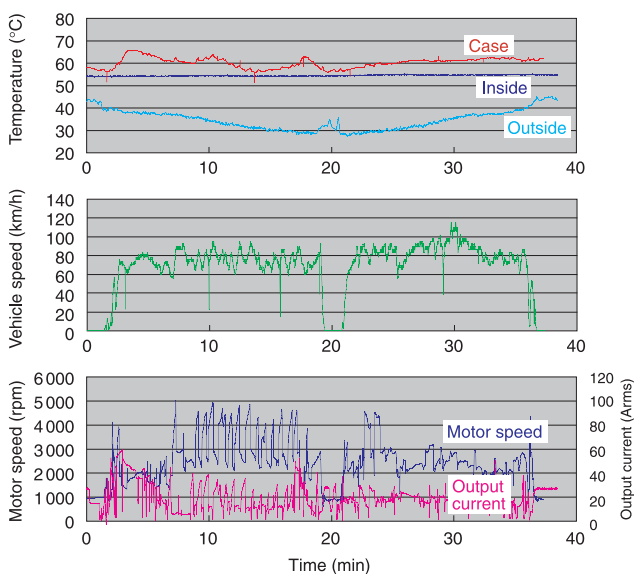


Fig.11 General driving test in U.S.

ている。次にアメリカ現地で走行テストを行い、一般走行した時のデータをFig.11、過酷状態で走行したデータをFig.12に示す。シャシダイナモ上のデータと比較して30℃から32℃の上昇値となり多少高めである。また、寒冷地でのテストデータを Fig.13 に示す。寒冷地では、冷却方式が空冷のため、ファン作動温度までの温度差が大きくなり、約45℃まで高くなる。以上の結果より、TFT寿命特性に各種走行テストデータをプロットし、車両生涯寿命点Aと同条件で限界テストを行った結果により得られたワイブルチャートから、車両の生涯寿命到達時点での信頼度を求めると、99.97%から99.99%の値を得ることができた。更に、電流に対する信頼性評価と同様にワイブルチャートから形状パラメータ(m)値を求めると 5.5 で、耐久劣化型であることの確認ができた。

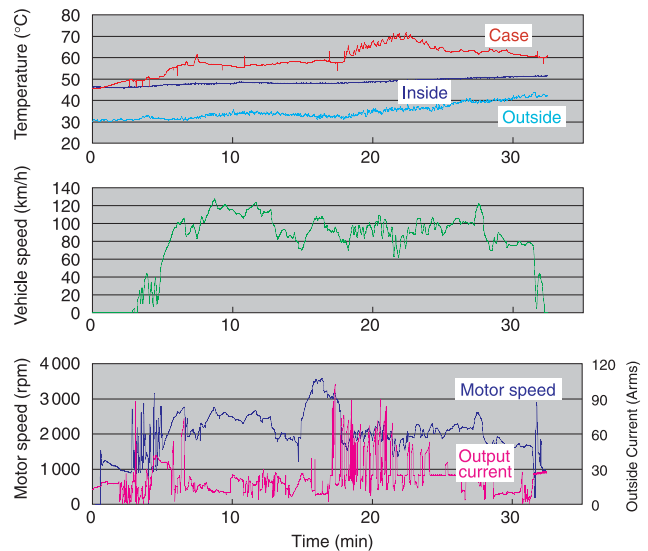


Fig.12 Hard driving test in U.S.

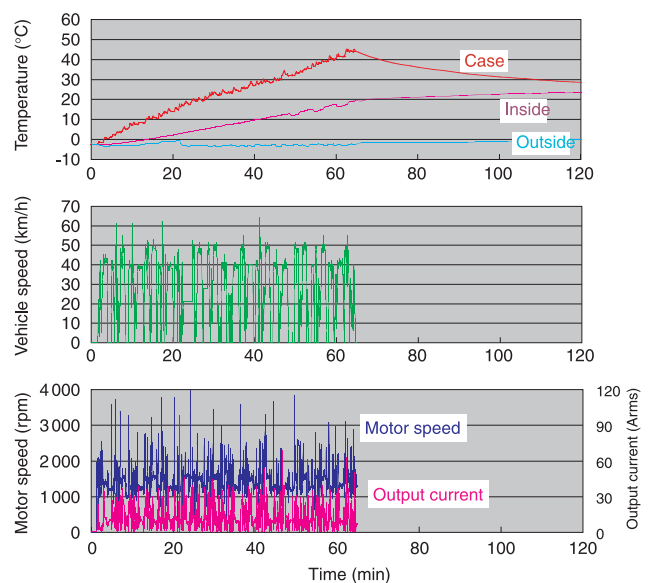


Fig.13 Cold-climate region driving test

6. まとめ

電力半導体の寿命に影響する電流と温度に着目して耐久信頼性評価をおこなった。車両の各種走行と環境試験データと電力半導体の単体寿命試験データからワイブルチャートを用いて信頼度を求めた。その結果、信頼度は 99.9%以上、形状パラメータ(m)は 5.5 から 6.2 の値となり耐久劣化型であることの確認ができた。また、ハイブリッド車に搭載したモータ駆動用大電流負荷および高温環境下の耐久信頼性評価手法が確立できた。

参考文献

- (1) 大澤 直:電子材料のはんだ付け技術, 東京, 鉱業調査会, 1998, 304p.

■ 著 者 ■



篠原 貞夫



加藤 修司



鷹鷲 弘明



安楽 文雄