

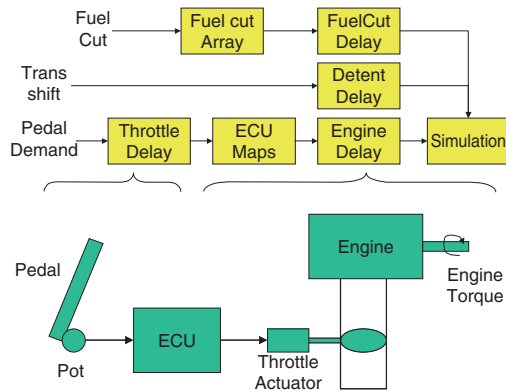


Figure 7

バイワイヤ方式を採用していることから、現在はこのエンジントルクマップのほかに、ペダルポジションからスロットル開度指令やトルク指令値を算出するマップと複合して運用している。このようなペダルマップは、車速やバッテリー充電状態、またはその他車両の制御系全体の最適化に必要な機能とされている。

エンジン慣性シミュレーション

駆動系試験では、仮想エンジンとなりうる動力計が、正しい慣性量でトランスミッションに対して実際のエンジン同等の負荷を掛けることを要求されている。多くの場合、動力計の機械慣性量はエンジンの慣性量よりも大きく、そのため慣性量の補正が求められる。これをエンジン慣性シミュレーションという。エンジン回転数のオブザーバーとフィードフォワード制御との組み合わせにより、エンジンとフライホイールの慣性をシミュレーションするために必要な動力計への印加トルク $[T_{el}]$ の再現を可能にしている。このようにして計算されたトルクは、エンジントルクマップシミュレーションにて算出されたトルクに印加される^[5]。

$$T_{el} = \frac{J_{el} + J_{FW}}{J_{sim} + J_{FW}} T_{eng} + \left(1 - \frac{J_{el} + J_{FW}}{J_{sim} + J_{FW}}\right) T_{trans}$$

$$= K * T_{eng} + (1 - K) T_{trans}$$

Figure 9では、スロットル／速度制御している仮想エンジン上で、スロットル開度を上昇させながら変速中になるべくトルクを一定に保持しようとする試験である。変速中の減速度は一定とする。この場合、エンジン回転は、3900 rpmから900 rpmの変化により、慣性によるトルクが発生する。仮に、動力計の慣性量がエンジン慣性量と同じである場合(上図)、特に慣性量補正は必要としない。しかしながら、下図のように動力計慣性量がエンジンの倍で

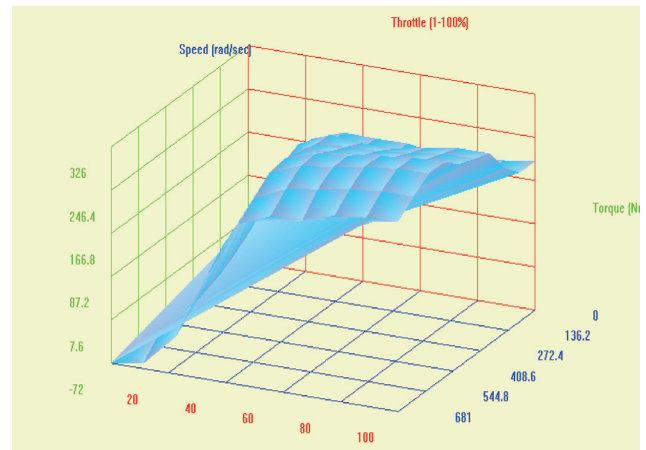


Figure 8

ある場合は、図示のようにトルクを印加して慣性の差を補正することが必要である。

エンジントルクパルスシミュレーション

Figure 10には、8シリンダーエンジンにて2000 rpm/118 Nm時に発生するトルクパルスを表したチャートを示す。ただし、平均トルク118 Nmはチャート上には表示されず、トルクパルスだけを示している。このチャートではエンジン2回転(720°)中に8個のシリンダーがそれぞれ異なったタイミングで燃焼している状態を示す。このシミュレーションでは、118 Nmの平均トルクを生み出すには、145 Nmの爆発トルク振幅が必要であった。

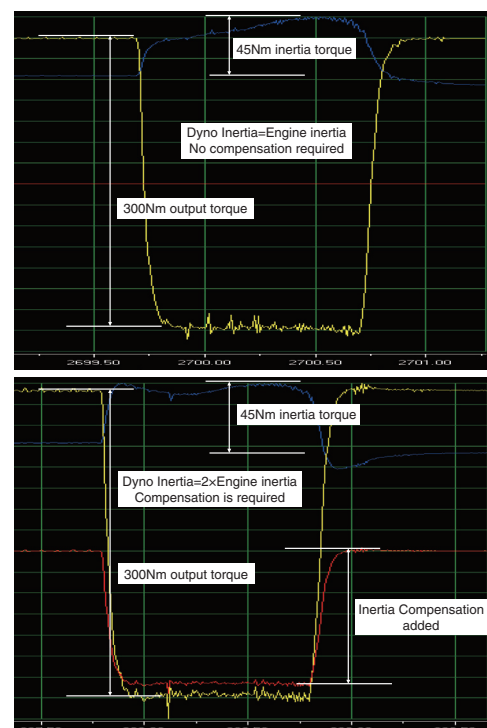


Figure 9

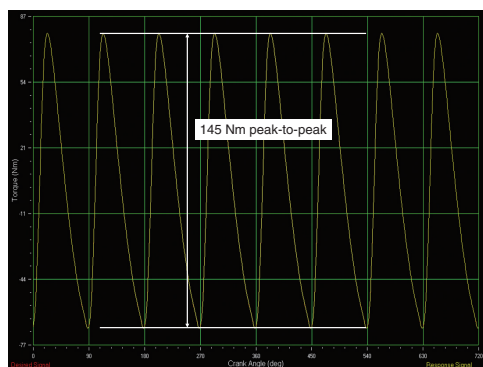


Figure 10

実エンジンデータとの比較検証

エンジンシミュレーションを検証することは、このシミュレーションアルゴリズムの受け入れする上で非常に重要なこととなる。Figure 11では、4気筒ガソリンエンジンのクランクシャフトで計測したトルク(下部チャート)と、エンジンシミュレーションによるトルクパルス波形(上部チャート)との比較を示す。この比較により、点火オーダー、パルス周波数、振幅などが非常に良く再現できることがわかる。Table 1に、エンジンのスペクトル成分の振幅と、エンジンシミュレーションによる振幅を示す。燃焼の再現性や、ねじり振動の影響により若干の差が生じることがあることがこの表からも見て取れる。

HEVを含むスタート・ストップシミュレーション

典型的なエンジンスタートのプロファイルをFigure 12に示す。エンジンスタートシミュレーションでは、アイドル回転、クランキング回転およびそれらの到達時間をコントロールする。一定時間のクランキング後、エンジン回転がアイドル回転まで上昇し、アイドル回転制御シミュレーションに移行する。トルク値はクランキング、アイドルそ

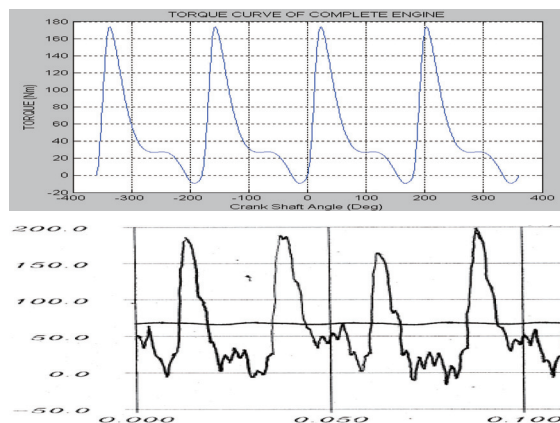


Figure 11

Table 1

	Real Engine	Simulation
40 hz	37 nm	37 nm
80 hz	23 nm	30 nm
120 hz	8 nm	15 nm
120 hz	8 nm	15 nm
160 hz	5 nm	7 nm
200 hz	3.7 nm	5 nm
240 hz	1.4 nm	2.5 nm
280 hz	1.1 nm	2 nm
320 hz	0.9 nm	1.5 nm

れぞれに設定されている。HEVの場合も、このようなエンジン始動シーケンスを非常に短時間になるように調整することで表現できる。エンジン停止・惰行シミュレーションでは、Figure 13の通り、イグニッションと、ゼロ回転近くのエンジンマップおよびStandStillSpeed値をコントロールする。エンジンマップ上で、どれくらいのトルク値がエンジン停止するかを決定付けている。StandStillSpeed値とは、動力計に対して回転停止を指令するタイミングを示す。

Figure 14では、エンジンスタートシミュレーションをEPTS(エンジントルクパルスシミュレーション)と組み合わせた波形を示す。このEPTS機能は使用する・しないが選択可能である。ETPS機能を使用しない場合は平均トルクのみの制御となる。エンジンは、まず短時間のクラ

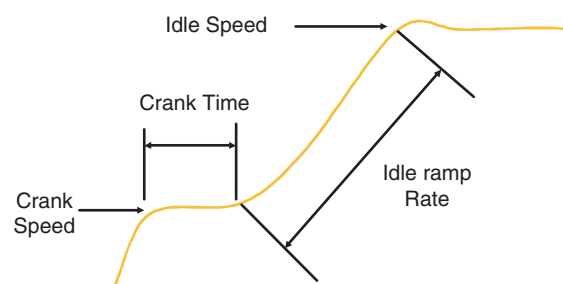


Figure 12

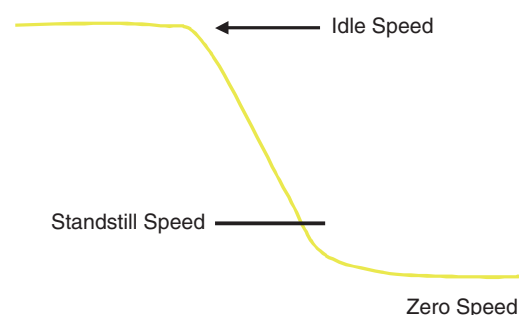


Figure 13

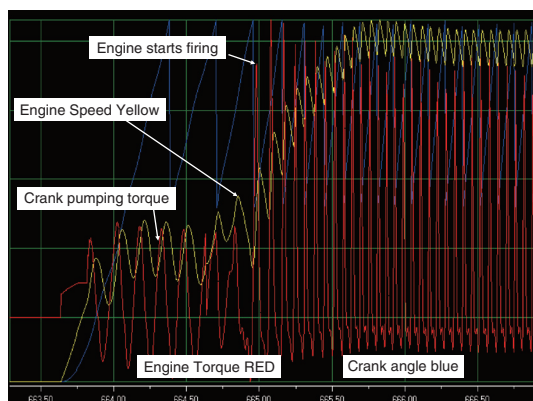


Figure 14

ンキングの後、着火し回転数はアイドル回転まで上昇する。クランク中の着火の直前にはポンピングによる脈動波形が発生していることが確認できる。

エンジンシミュレーションに必要な

動力計モータおよび電力盤の仕様

入力ダイナモとして、エンジントルクパルスシミュレーションをするには、50,000 rpm/secの回転加速度を実現するに十分なトルクと慣性量の比に加え、1 msec以下で応答する制御電流の応答速度が必要である。トランスミッションに接続された状態で、動力計ローターに求められる物理的な特性として、600 Hz以上の一次のねじり自然周波数を与えられる機械慣性や剛性が必要である。さらに、トランスミッションが車両に搭載されている状態を再現するために、出力軸に対して車載同等の高さや傾きをもった配置ができるようにする必要がある。Figure 15

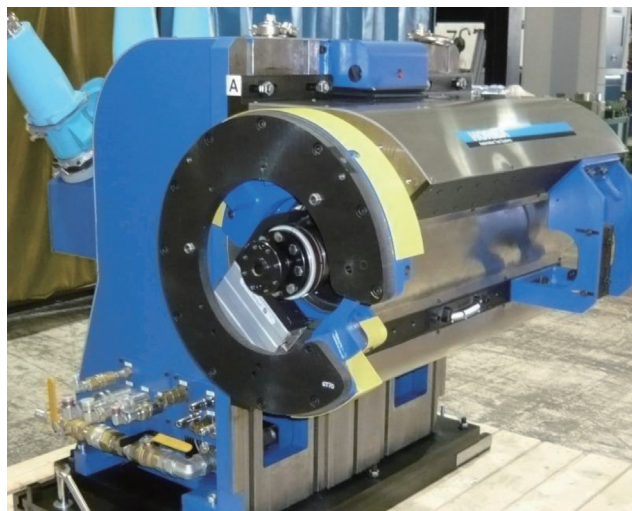


Figure 15

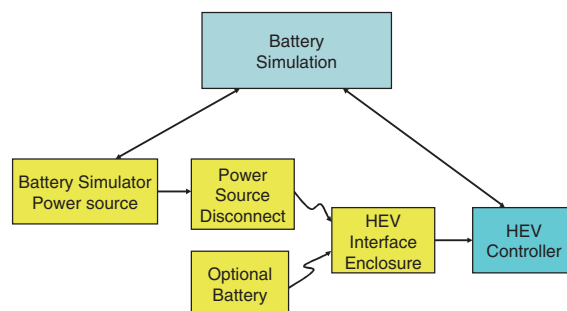


Figure 16

ジン用動力計の外観を示す。

ハイブリッド車両用駆動系システムへの バッテリーシミュレーション

ハイブリッド車両(以下HEV)の駆動系システムは、電動モータを試験するためのバッテリーまたはバッテリーシミュレータが必要である。HORIBAグループは、HEV用モータを操作するための電力源として、バッテリーシミュレータを供給している。バッテリーシミュレータとは、DC電源の供給装置と、バッテリー状態をシミュレーションし、供給電圧・電流を制御する機構から成り立っている。中継盤には、ユーザが使用するインバーターに接続されるケーブルの供給電源端子を用意している。バッテリー制御には、電力、電流、電圧、または電力+印加電流の指令値のいずれかをを用いる。バッテリーシミュレータでは、実際のバッテリーの出力である、電流、電圧、電力、充放電容量(SOC^[6])および電池パックの温度や電池セルそれぞれの温度の違いのほか、電力上下限值、内部抵抗や容量を模擬することが可能である。また、SOH(新品・5年経過・10年経過されたバッテリー状態)もバッテリー容量とスルーレートを設定することで模擬することが可能である。

電池セルの化学的特性と電池セルの配列(直列数と並列数)を定義することで、電池パック(車載のバッテリーユニット)の定義が可能である。電池セル一個当たりの特性として、起電力、出力や容量を個別に設定することが可能である。Figure 16にこれらバッテリーシミュレータシステム(以下VB=Virtual Batteryと略)のブロック図を示す。

異なるバッテリーのシミュレーション

バッテリーシミュレータシステムに用いるHEVのバッテリーパックモデルでは、リチウムイオン、LiFePO4、ニッ

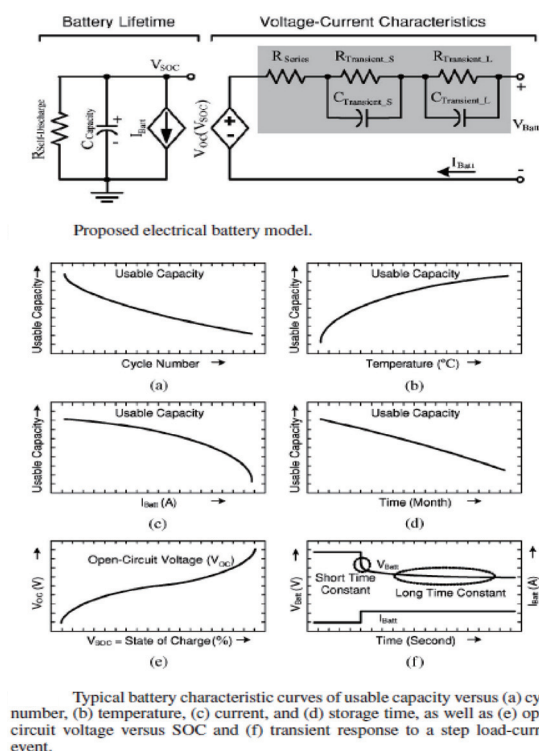


Figure 17

ケル水素やAGIM型鉛蓄電池^[7]の化学的特性をサポートしている。さらに、RLC (抵抗-コイル-コンデンサ)モデルをユーザが定義することでのカスタムバッテリーモデルも定義可能としている。HORIBAグループで製作したバッテリーのリアルタイムモデルは、Figure 17に示す論文掲載要綱(Min Chen, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.21, NO2 June 2006)を元にして製作した。

充放電容量(SOC)のシミュレーション

バッテリーシミュレータシステムでは、SOC (State of Charge = 充放電容量)やDOD (Depth of Discharge =

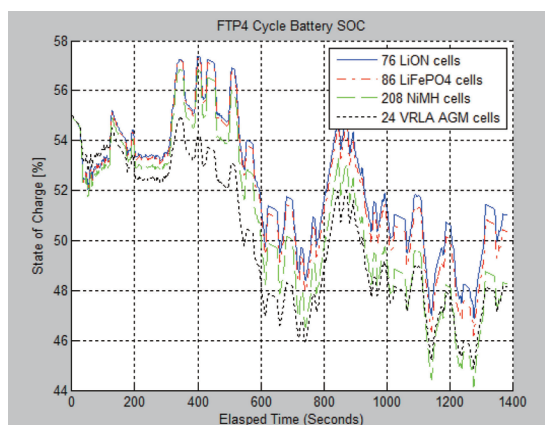


Figure 18

放電深度), および電力の上下限値をHEV/EV/PHEVのバッテリーパックシミュレーションに取り入れている。

Figure 18に示すグラフは、様々なバッテリーモデル上にて、北米FTPモード走行した際のSOCのシミュレーション結果である。

バッテリー温度影響のシミュレーション

バッテリーシミュレータシステムでは、バッテリーパックの温度をシミュレーションしている。Figure 19に示すグラフは、様々なバッテリーモデル上にて、北米FTPモード走行におけるバッテリー温度を模擬した結果である。バッテリーパック全体からの放熱量のほかに、バッテリーセルを構成する様々なパラメータへの温度影響を定義することが可能である。これらの電力が変化するように温度変化に応じて、バッテリーモデルのすべてのパラメータが変化するように作られている。

通信シミュレーション

バッテリーパックをより完全にシミュレーションするには、TCUやECUとの通信機能が必要である。たとえば、HEV上でモータ駆動かエンジン駆動かを判断するには、TCUがSOC情報を必要とする場合がある。HORIBAグループの駆動系システムコントローラーには、複数のCAN通信チャンネルを備えており、バッテリー制御CPUのシミュレーションとして、約200項目のCANによる入出力を可能としている。

バッテリーシミュレーションをサポートする製品群

バッテリーシミュレーションシステムを扱う上で非常に重要なことは実験室における電源ラインを安全に扱える環境である。モータコントローラーや電源からのケーブルを安全に扱うためのプラグイン型コネクタを備えた中継

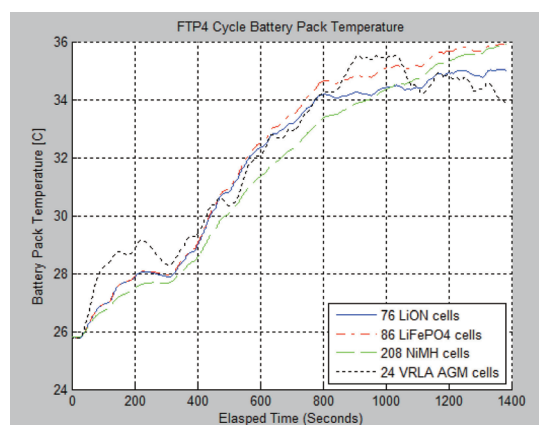


Figure 19

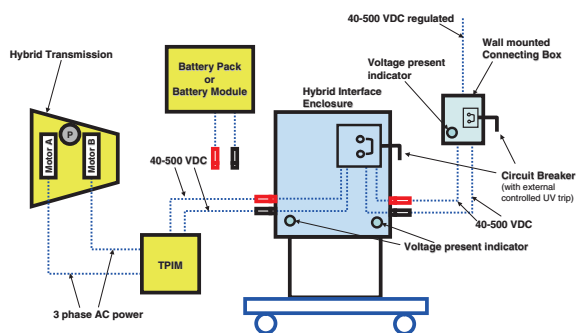


Figure 20

盤を用意している。電力源と供試体モータとの間には二つの中継盤があり、モータに近い位置にひとつの中継盤を配置している(Hybrid Interface Enclosure)。この中継盤が供試体モータと電源ラインとの中継を行っており、DC電源ラインには、バッテリーシミュレータ電源(DC電源)および実際のバッテリーが接続可能である。もうひとつの中継盤は、一般的に壁面に設置される(DC Power Disconnect)。この盤では、DC電源装置とHybrid Interface Enclosureとの中継盤で、主にDC電源ラインの遮断器を設けている。これらの中継盤は安全配慮と使いやすさを両立した設計を考慮している。Figure 20にはHybrid Interface Enclosureのブロック図と、Figure 21に外観図を示す。Figure 21正面には、遮断器と通電を示す表示灯がある。この装置には地絡感知器と遮断器を備えており、また設備全般の非常停止ボタンと連動し、供試体インバータの仕様にあわせた安全な遮断プログラムを設定することが可能である。この写真に示す中継盤は600 VDCまでの仕様であり、裏面写真に示



Enclosure front view

Enclosure rear view

Figure 21

ようなコネクタを使った安全な配線作業が可能である。

実バッテリーとの電圧・SOCおよび温度変化 比較試験

時系列でのバッテリー入出力電流の履歴がバッテリーの運転条件である。ニッケル水素電池やリン酸鉄リチウムイオンバッテリーのVBモデルについて、同じ入出力電流の履歴を与えて、主要な特性である電圧・SOC、および温度のシミュレーション精度を検証した。これらの試験パラメータは、バッテリーパックの仕様決めや、電動モータの性能を決定つける重要な要素である。Figure 22に実バッテリーとDC電源+VBによる時系列での電圧変化チャートを示す。これらの相関誤差は1% RMS以下であり、HEVパワートレインの開発には十分な性能であった。瞬時での誤差は、実バッテリーとVB電源それぞれの電流値の違いに起因するものであったことがわかった。エンジンは、しばしば低エミッションのために触媒温度を保持することを目的で作動するが、これらの動力は車載エアコンなどの負荷に用いられることがある。SOCはバッテリーパックの大きさやバッテリーマネジメントシステム(以下BMS)の適合には重要な要素である。Figure 23は

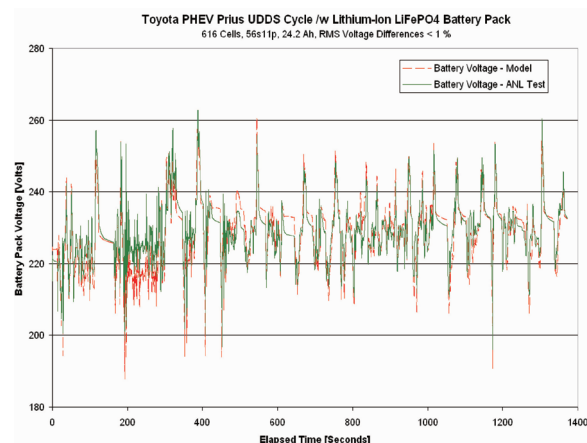


Figure 22

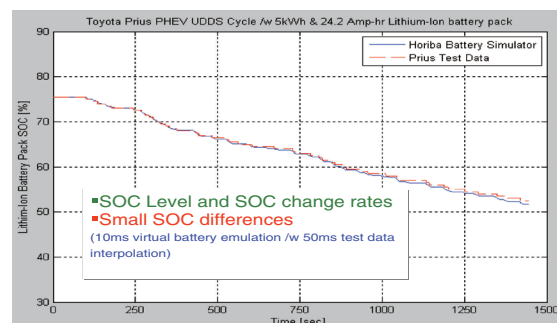


Figure 23

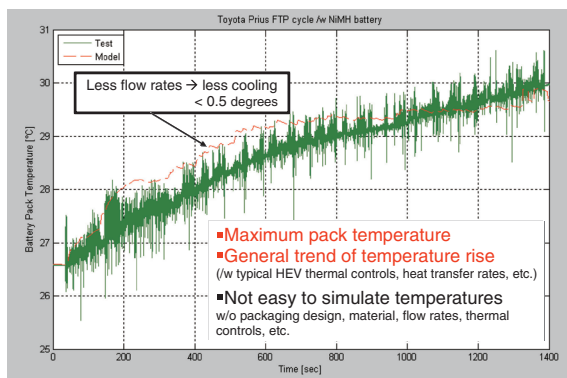


Figure 24

実バッテリーとVB上でのSOC変化の比較チャートを示す。いかなる環境や車両の出力条件であっても、車両に搭載されている大型バッテリーには常に安全な動作することを検証するのが非常に重要なファクターである。そこで、バッテリーパックの筐体設計や冷却システム、およびそれらの最適化には、電池の発熱を適切に予測することが重要である。Figure 24に、VBによる温度変化シミュレーションと実バッテリーの発熱量変化の比較チャートを示す。

おわりに

バッテリーシミュレーションシステム(VB)と、バーチャルエンジン(VE)によるHILシミュレーションの再現性の高さと精度は、自動車メーカーが電動パワートレインをエンジンとバッテリーを平行作業で開発することを可能にした。この技術を用いることで、HEVを市場に投入するまでの時間を短縮することが可能となり、エンジンとバッテリーを開発する上で、より精度の高い仕様決りを可能にした。VBとVEは、HEVの市場浸透^[8]を図るメーカーにとって典型的なツールとなりえるとともに、HORIBAグループにとっては車両のトータルテストソリューションを提供する礎になりつつある。今後、多様化するイオン化バッテリーを初めとし、乗用車から商用車にいたる様々な車両に適応したバッテリーのモデルをより充実していく。

参考文献

- [1] IDtechex.com “Hybrid and Pure Electric Cars 2010-2020” Research Report
- [2] HIL commonly referred to as hardware in the loop where something physical is used to create power, or run programs, or create a response but inputs and outputs are simulated from a mathematical model of their real end use condition.
- [3] 本文中の略号は以下の意味を示す。
ECU：エンジン制御ユニット
BMS：バッテリーマネジメントシステムおよびエネルギーマネジメントシステム
PCU/TPIM：電力制御ユニットまたはインバーターモジュール駆動制御ユニット
TCU：トランスミッション制御ユニット
ABS：アンチロックブレーキシステム
ESC：電子姿勢制御
- [4] Integrated Starter and Generator (ISG) is an electric motor attached to the crankshaft of the ICE that acts as motor to start the engine and as a generator of electricity when the ICE is running. Since it is directly on the crankshaft, this becomes a parallel hybrid vehicle. Electric motors used vehicle propulsion are called E-MOTORS to distinguish their unique construction and power output.
- [5] 本文中の計算式における略号は以下の意味を示す。
CYC：シリンダー数
DISP：エンジン排気量
 J_{TOT} ：エンジンおよびフライホイールの合計慣性量
 J_{ENG} ：クランクシャフト機構の慣性量
Mmean：エンジンの定格トルク
Peak：エンジンの燃焼プロセスにおいて発生する最大の瞬間トルク
- [6] SOC - State of Charge is a calculation of the BMS showing charge availability of the battery pack
- [7] AGM - Absorbed glass mat and Gel Batteries are classifications for low maintenance valve regulated lead acid (VRLA) battery
- [8] Various predictions from research institutes, auto analysts for HEV, PHEV, EV market volume by 2015 as part of total vehicle production in the USA.



Norm Newberger

Manager
Drivetrain Technology
Automotive Test Systems
HORIBA Instruments Inc.



Bryce Johnson

Principle Engineer
Automotive Test Systems
HORIBA Instruments Inc.



翻訳

鶴見 和也

Kazuya TSURUMI

株式会社 堀場製作所
営業本部 ATS プロジェクト
マネジャー