

B バッテリーパックの熱マネジメントシステムにおける1Dモデル化の取り組みとHILSへの展開

従来のガソリンエンジン車などでは、二酸化炭素等の温室効果ガス排出や窒化酸化物、PM2.5などの大気汚染が問題視されてきた。そのため、近年では電気のみを動力として走行する電気自動車EV(Electric vehicle)の開発が盛んとなっている。リチウムイオン電池LIB(Li-ion battery)は、他の電池に対して高エネルギー密度、高出力密度、高寿命、自己放電が少ないという特徴があり、多くのEVの動力源として採用されている。EV開発において、LIBの出力、安全性、寿命の各特性には温度による影響が大きいことから、熱管理システムBTMS(Battery thermal management system)による適正な温度制御が重要となっている。

近年、制御システムは複雑化する傾向にあり、物理現象を考慮した数値解析モデルの適用が進められている。数値解析モデルとしては有限要素法FEM(Finite element method)等の連続体モデルもあるが、リアルタイムにおける応答といくつかのパーツの連成現象を取り扱うことが必要であることから、1D(One-dimensional)モデルが活用される。ここで、1Dモデルとは、各要素が等価回路で接続されたモデルであり、1次元の連続体モデルを指していない。この1Dモデルをもちいたモデルベース開発MBD(Model based development)の設計手法が自動車開発に有用であることが示され、近年において特に注目を集めている。MBDにおいて、対象のハードウェア以外のパーツ動作を1Dモデルのリアルタイムシミュレーションで模擬し、全体の組付け時に正しく動作するかを試験する方法であるHILS(Hardware in the loop simulation)¹⁾²⁾に着目し、当社でもこれを活用した試験メニューの開発を行っている。本稿では、バッテリーパックへのBTMSを例とした1Dモデルの応用とその有用性について記載する。さらに、バッテリーパック冷却に関するHILSの実施内容とその結果について記載する。



技術本部 計算科学センター
やまなか たくみ
山中 拓己



技術本部 EV・電池プロジェクト室
きほら だいき
木原 大城



技術本部 計算科学センター
やまもと たつや
山上 達也

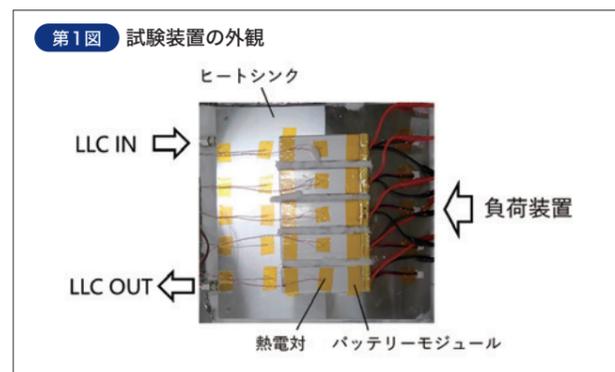
B-1 バッテリーパックBTMSの1Dモデル構築

1.1 バッテリーパック試作

- 以下に示すバッテリーモジュールを対象とする。
- ・ラミネート型バッテリーセルが2つ直列接続されている。
 - ・作動電圧は6.0 Vから8.4 Vまでである。
 - ・容量は3.0 Ahである。

試験装置の外観を第1図に示す。対象バッテリーモジュールを5つ並列接続し、ヒートシンク上に設置する。接続された5つのバッテリーモジュールおよびヒートシンクの集合体をバッテリーパックと定義する。ヒートシンクの内部には流路が設けられ、ここを冷却液が通過することでLIBから発生した熱が外部へ流出する。冷却液として、EVの冷却系で使用されることが多いLLC(Long life coolant)を使用する。バッテリーパック周囲は断熱材で覆い、外気への放熱の影響を低減する。ヒートシンクにいくつかの管を接続し、チラーを介してLLCを循環する。チラーの設定温度は25℃とし、LLCの流量が1.0 l/minとなるように圧力を上昇する。その後、次の条件でバッテリーパックに電流を印加する。

- (i) 0.2C(3A)のCC-CV放電により、パック電圧6.0 Vまで放電し、1時間電圧を維持する。
 (ii) 2C(30A)のCC充電により、パック電圧8.4 Vまで充電する。
 (iii) 2C(30A)のCC放電により、パック電圧6.0 Vまで放電する。
 (iv) (ii)、(iii)の工程を2サイクル繰り返す



第1図 試験装置の外観

1.2 1Dモデル

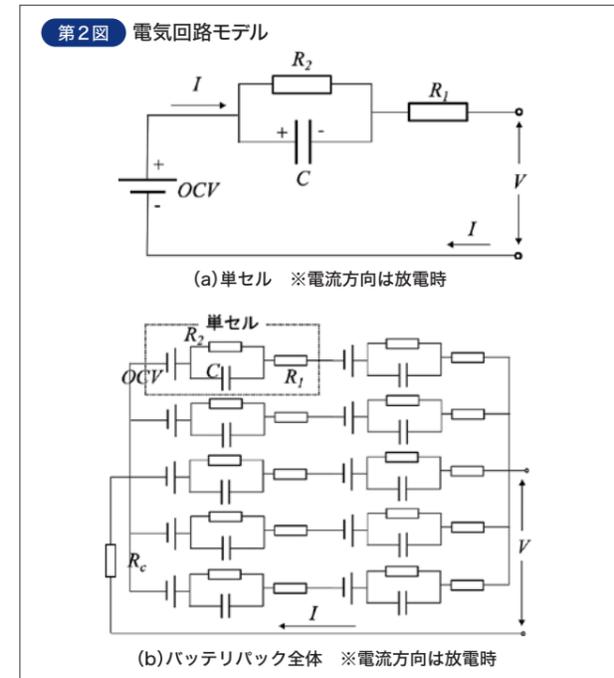
1.2.1 電気回路モデル

LIBの電気回路モデルを第2図に示す。LIBの内部抵抗は主に(i)電解質のイオン抵抗、(ii)活物質-電解質間の反応による抵抗、(iii)活物質のLi拡散による抵抗の要因が考えられている³⁾。この電気回路モデルでは、(i)、(ii)をR1(応答遅れが小さい抵抗)で、(iii)をR2(応答遅れが大きい)で表現し、R2の遅れの程度をCで表現している。また、バッテリーモジュール単体に対しいくつかの充放電試験の電圧時間履歴を最も再現するR1、R2、Cをそれぞれ求める。これにより、複数の温度、電流、充電状態SOC(State of charge)におけるR1、R2、Cのデータベースを構築し、電気回路の計算時にはデータベースに基づいた値を使用する。

発熱量として電位回路から得られる電位降下と印加電流により求められるジュール熱の他に、電池内部反応のエントロピー変化による発熱も考慮する。

1.2.2 熱回路モデル

伝熱現象を想定し、熱回路を構築したモデルを第3図に示す。ヒートシンクはアルミ合金のため熱伝導性が高く、熱抵抗そのもの



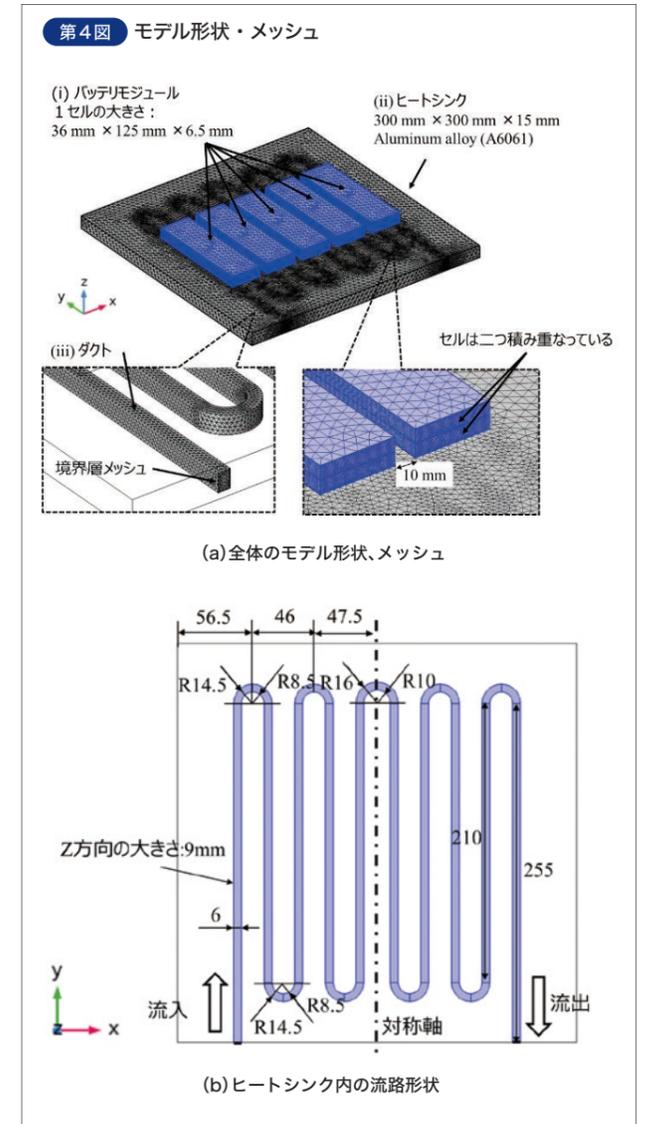
第2図 電気回路モデル

第3図 熱回路モデル

が小さいと考え、一つの熱抵抗、熱容量として、また冷却液との熱交換も一つの熱抵抗(熱伝達率の逆数)としてモデル化する。このモデルと電気回路モデルを連成した数値解析モデルをMATLAB Simulink R2019aにて構築する。

1.3 3Dモデル

1Dモデルとの比較のため、3D(Three-dimensional)モデルをもちいた連続体モデルを構築する。第4図にモデル形状と要素分割図(メッシュ図)を示す。外寸は測定値、ヒートシンクの流路寸法は設計寸法をもちいる。メッシュはテトラメッシュとプリズムレイヤーメッシュを組み合わせて、総要素数は992,623である。ヒートシンク流路のLLC流れ場を連続の式およびナビエ・ストークス方程式、全領域の温度場を熱伝導方程式とし、FEMをもちいて連成解析する。電気回路モデルを3次元解析と同時に解き、発熱量は各セルで均一に与えられるとして、バッテリーパックの冷却現象を再現する。これらのモデルはCOMSOL Multiphysics 5.4[®]をもちいて構築、計算を実行する。

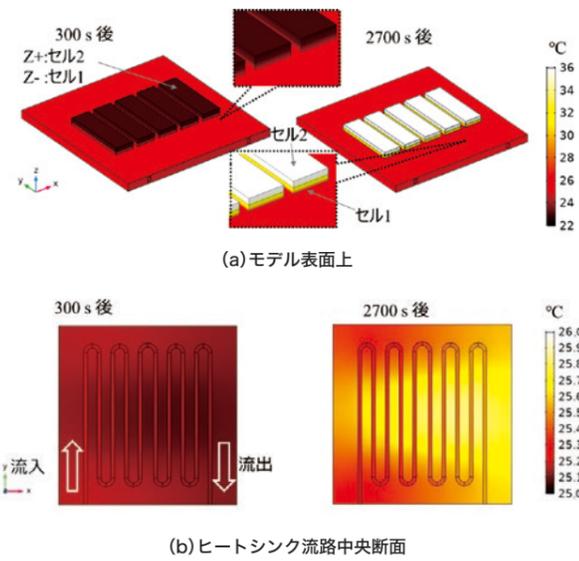


第4図 モデル形状・メッシュ

(a) 全体のモデル形状、メッシュ

(b) ヒートシンク内の流路形状

第5図 各時刻の温度分布

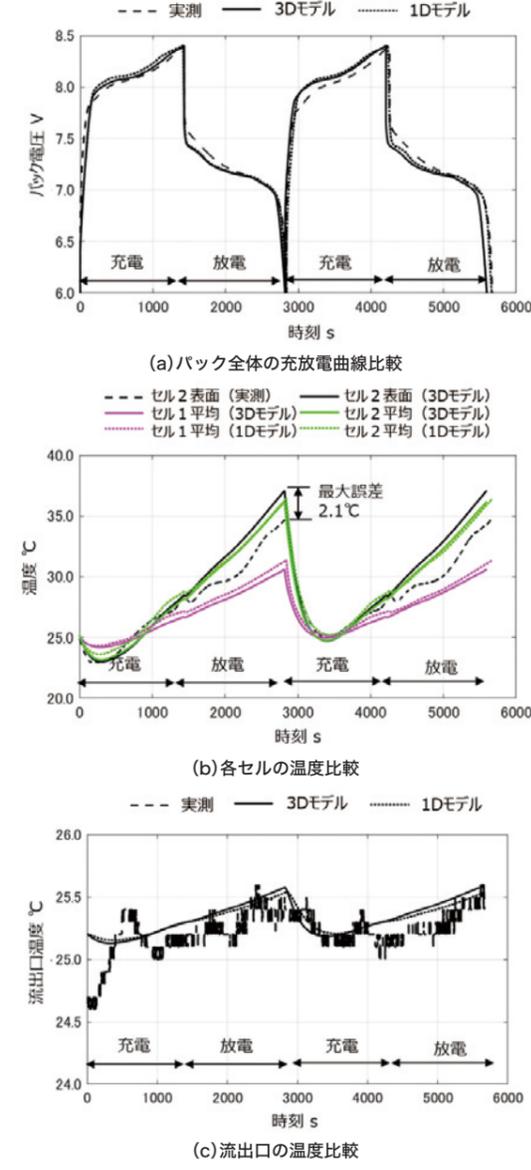


第5図に300s後および2700s後の温度分布を示す。300s後にはヒートシンクよりセルの方が約3°C低温となり、Z方向に温度勾配が生じている。これは、エントロピー変化による吸熱反応により、冷却液、ヒートシンクからセルへ伝熱していると考えられる。また、X方向、Y方向の温度勾配はほとんど生じない。2700s後では、特にヒートシンクと接していないセル(例えばセル2)で約36°Cの高温となり、ヒートシンクとの間にZ方向に大きな温度勾配が生じる。この時刻では放電となり、エントロピー変化による発熱およびジュール熱によりセルは急激に温度上昇したと考えられる。また、流路断面の分布から、流路下流側で冷却液の温度上昇が生じ、流出口では約0.5°Cの温度上昇となる。

1.4 解析結果とモデル比較

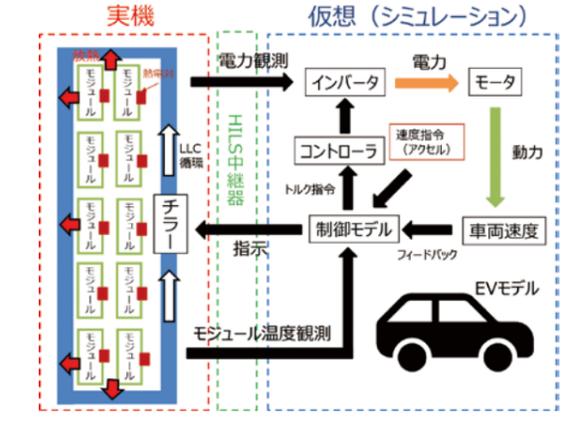
第6図に各計算結果と実測との比較を示す。充放電曲線、セル表面の温度、流出口の温度それぞれ実測とおおむね一致していることが確認できる。温度時間履歴について、特に放電時には差異が大きくなり、最大2.1°Cの誤差が生じている。これは、モデルではLLCの流れによる放熱のみを考慮するが、実際には空気や電極端子、ヒートシンクに接続されたLLC流路のパイプからの放熱の影響があるためと考えている(空気への放熱は断熱材で覆うことで影響を低減しているが、完全にゼロにはできない)。しかしながら、2サイクル目における充電時には良好に一致していることから、その誤差がサイクル毎に蓄積されておらず、モデルとして妥当と考える。

第6図 計算結果と実測との比較

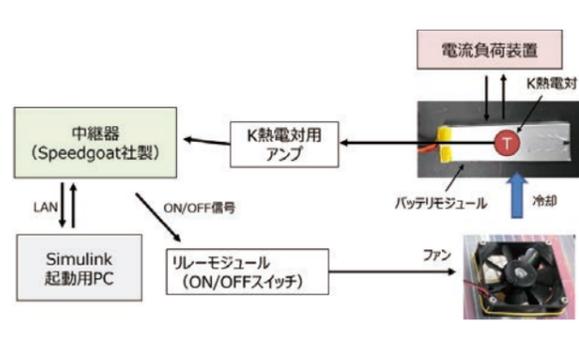


1Dモデルの温度は3Dモデルの平均温度に対応すると考えると、1Dモデルは3Dモデルの結果に対して極めて良好に一致する。このことから、1Dモデルは3Dモデルの縮退モデル(モデルの自由度を低減して主現象を捉えるモデル)となっていることがわかる。また、計算にかかった時間はこの2サイクルの計算で約5分であり、3Dモデルの140分に比べて計算負荷が96%低減できることが確認できる。

第7図 バッテリー冷却システムへのHILS適用例



第8図 システム構成図



2.2 試験内容

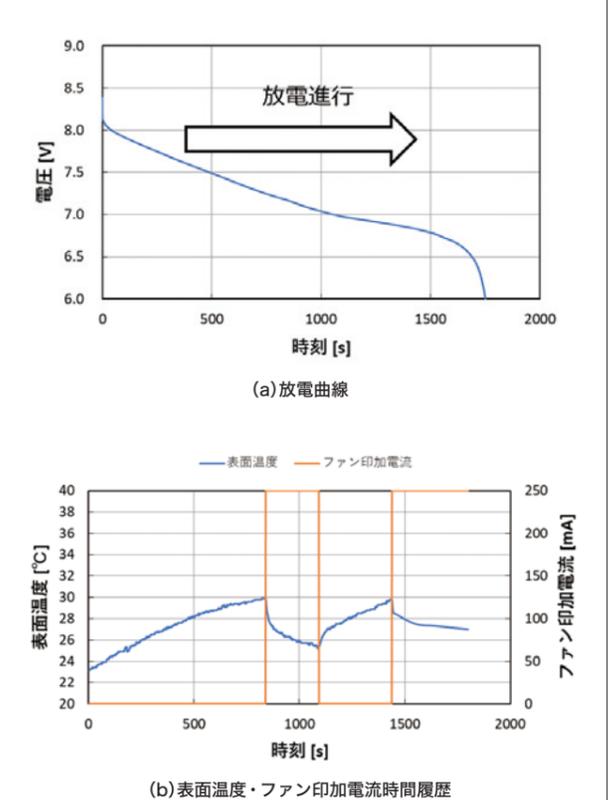
システム構成図を第8図に示す。前節で紹介したバッテリー冷却試験と同じバッテリーモジュールを用意し、表面に熱電対を設置し、中継器を介して数値解析を行うPCへ信号を送信する。バッテリー温度が運用に適している25°Cから30°Cの間を保つように、PCには以下に示す制御アルゴリズムをMATLAB Simulink R2019a®にて構築し、Simulink Real-Time Toolbox®をもちてリアルタイムシミュレーションを行う。

- (i) 温度30°C以上の入力でファンのスイッチ ON
- (ii) (i)の処理後、温度25°C以下の入力でファンのスイッチ OFF
- (iii) (i) (ii)の工程を続ける

本稿では、熱回路と電気回路を組み合わせた1Dモデルが、バッテリー冷却試験の実測と3Dモデルの結果を良好に再現し、縮退モデルとなり得る事例、および1DモデルをHILSへ展開しバッテリー冷却制御を行う簡易な事例について紹介した。当技術はバッテリー冷却のみならず、モータの負荷制御などへの応用についても検討している。特に電子制御が複雑化している自動車業界に対してタイムリーな提案であると考えており、今後も開発を続ける予定である。

参考文献 *1) J. Yang et al. : Robomech J, Vol.5(2018), p. 19.
 *2) W. Grga : 29th ASEE/IEEE Frontiers in Education Conference (1999), p. 12b6.
 *3) Y. Takagishi et al. : Batteries, Vol.5(2019)Issue 3, p54.

第9図 試験結果



満充電したバッテリーを2C(6A)放電し、上記制御を行った結果を第9図に示す。放電進行に伴い、電圧8.4Vから瞬時に約8.1Vまで低下した後、さらに低下を続け、約1750sで6.0Vとなり放電が終了する。初期の瞬時の電圧低下は過電圧によるものであり、その後はOCV(Open circuit voltage)の変化にともなう電圧低下と考えられる。表面温度は初期温度から徐々に上昇し約800sで30°Cに到達するとファンに印加電流250mAが通電し、ファンが回転して温度低下する。これを2回繰り返すことで、表面温度は25°Cから30°Cの間に保たれていることが確認できる。

B-2 バッテリー冷却システムに対するHILS適用の検討

2.1 概要

バッテリー冷却システムへのHILS適用例として第7図を考える。EVを実際に運用する際に想定される負荷をバッテリーに付与し、さらにチラーを制御することでより効率的な運用が可能となる。これ

を実現するためにはリアルタイムシミュレーションを実現するための中継器、EV全体を表現する1Dモデル、実際のEVと同程度の負荷を掛けられる負荷装置をそれぞれ制御する必要がある。ここでは、検討段階としてこれらの要素を最も簡易化し、中継器をもちいたバッテリーのファン冷却制御を行う。