

車載情報通信制御機器における熱シミュレーションの精度向上手法

Accuracy Improvement Method of Thermal Simulation in In-vehicle Information and Communication Control Unit

花田 祥史
Yoshifumi Hanada

瀬戸 敦司
Atsushi Seto

尾籠 裕司
Hiroshi Ogomori

要 旨

車載情報通信制御機器は発熱量の増加に伴い、放熱性能が機器の基本構造を決定する主な要件になると考えている。熱シミュレーションは放熱性能の検証手法であるが、その検証精度は実機検証と比較して20 K以上の乖離（かいはり）があり単独での運用には課題があった。そこで乖離の発生要因であった実機検証のばらつき、熱シミュレーションの演算誤差、モデル要因の誤差について分析し、実機検証結果の安定化とモデルの限定的な高精度化により、熱シミュレーションの精度（実機検証との乖離）を ± 5 Kに向上させる手法を確立した。

Abstract

As the calorific value generated by in-vehicle information and communication control units increases, we consider that the heat dissipation performance becomes the main requirement which decides the basic structure of unit. Thermal simulation is a verification method of heat dissipation performance, and its verification accuracy differed from verification using an actual unit by 20 K or more, which was problematic. We analyzed the variance in verification using the unit, the calculation error of thermal simulation, and the error in modeling, which were the causes of the difference, and established a method to improve the accuracy of thermal simulation (Deviation from the unit validation) to ± 5 K by stabilizing verification using unit and improving the accuracy of the model to a limited extent.

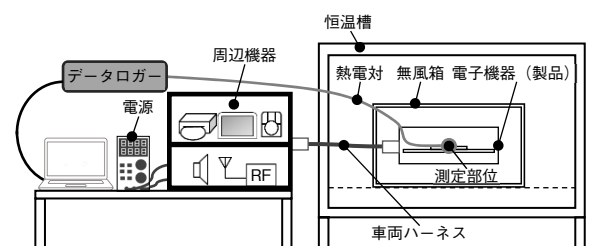
1. はじめに

次世代の車載情報通信制御機器は、新しいモビリティ社会に対応するため、マルチメディアシステムからコックピットシステムへの進化など、制御領域の拡大が予測される。この変化により機器の発熱量は大幅に増加し、放熱性能が機器のサイズや構造を決定する主な要件となり得ることから、開発初期段階から検証が必要になると考える。また、制御対象に重要保安部品が加わる場合には安全設計に対応するために、仮想条件などさまざまな条件での検証が必要になると想定される。現在、この放熱性能検証には実機を用いているが、検証機器とともに動作に関係する周辺機器も準備をする必要がある。多くの機器が接続される車載情報通信制御機器の場合、同時並行での開発となるため周辺機器も動作品がそろわないと実機検証の実施は難しい。

このように次世代の車載電子機器開発を見据えると、放熱性能検証には熱シミュレーションを用いるのが適切であると考えられる。

2. 従来の熱シミュレーション

車載電子機器の放熱性能は、第1図のような実験環境を用いて検証条件を再現し、測定した各ICの表面温度が目標温度以下となることを判定基準としている。



第1図 実機を用いた放熱性能検証

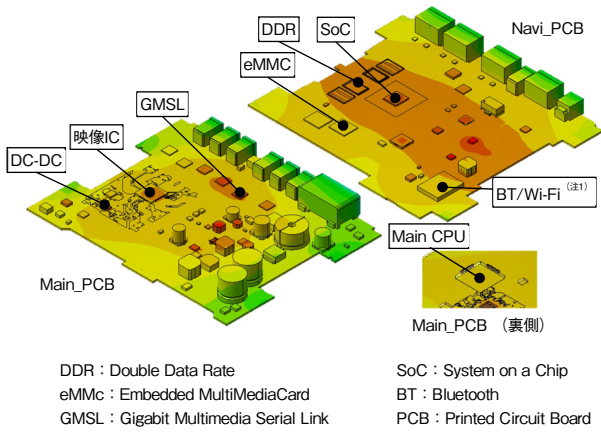
Fig. 1 Heat dissipation performance verification using an actual unit

一方で熱シミュレーションを用いた検証は、その結果が同一条件の実機検証と20 K以上の乖離が発生する精度であるため、主に部品や構造変更による影響を推定する目的で活用している。この実績値（実機検証の結果）に温度差の推定値（熱シミュレーションの結果）を加える手法は結果に誤差が含まれるため、最終的には実機検証を行い確実な放熱性能検証を実施している。しかし、今後は実験環境の準備が難しい条件での検証が想定されており、この誤差が成立性判断に影響を及ぼす懸念があるため、精度向上に取り組んだ。目標精度は、車載電子機器にて用いる部品の保証温度が $120^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ であるため、その約5%である ± 5 Kとした。

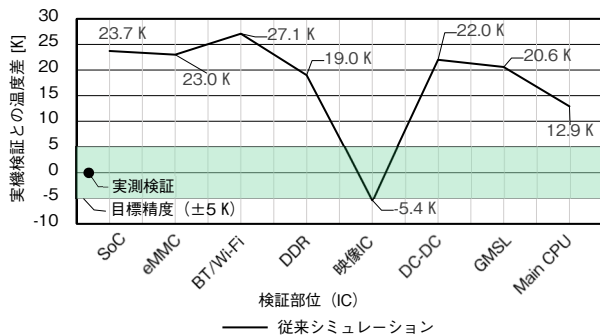
2.1 検証結果の乖離要因

第2図は本取り組みに用いた車載情報通信制御機器のPCBユニットにおける温度検証部位を示す。また各部位

の実機検証と熱シミュレーション結果との乖離(温度差)を第3図に示す。この20 Kを超える乖離は、他の車載電子機器に従来手法を用いた場合にも発生している。



第2図 温度検証部位 (IC)
Fig. 2 Temperature verification point (IC)



第3図 実機検証とシミュレーション結果の乖離
Fig. 3 Difference between verification using an actual unit and simulation

この乖離の発生要因は、関係要素から下記3項目に大別できると考え、詳細分析と低減に取り組んだ。

- 実機検証のばらつき (誤差)
- 熱シミュレーションの演算誤差
- モデル要因の誤差

2.2 実機検証のばらつき (誤差)

実機検証は第1図に示すように恒温槽や無風箱を用いて試験環境(条件)を再現し、測定部位の温度を熱電対とデータロガーを使用して測定する。そのため同一条件を狙った検証であっても環境や機材によって差が生じる可能性があり、各項目に対しばらつき量を検証した。その結果が第1表である。

(注1) Wi-Fi Allianceの登録商標。

第1表 実機検証のばらつき

Table 1 Variations in verification using an actual unit

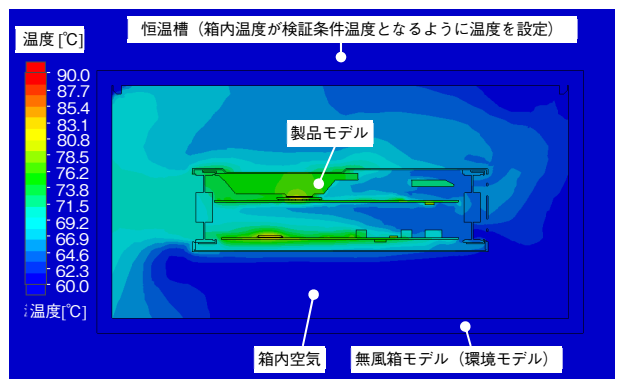
No.	ばらつき			備考
	要因	量 [K]	部位	
1	測定精度	0.6	主要熱源IC	同一条件の繰り返し比較
2	被測定機器	0.5	主要熱源IC	同一生産ロット品比較
3	恒温槽	0.1	主要熱源IC	(無風箱影響と推定)
4	熱電対	0.6	主要熱源IC	熱電対変更比較
5	データロガー	0.0	主要熱源IC	データロガー変更比較
6	無風箱	7.0	箱内温度	サイズ, 材質変更比較
7	雰囲気温度測定位置	3.8	箱内温度	位置変更比較
8	雰囲気温度測定(風)	1.0	箱内温度	熱電対防風構造の有無比較
9	雰囲気温度測定値	1.5	箱内温度	飽和後の測定値振れ

上記実機検証時に発生するばらつきに対し、本取り組みでは下記対応により安定化を図ることで、精度検証における不明値の縮小を図った。

- No. 1 熱電対の設置によるばらつき
⇒ 設置方法の安定化
- No. 2~No. 8のばらつき
⇒ 測定条件として実験環境を固定化
- No. 9 測定値の振れ:
⇒ 飽和後10分間の平均値を使用

2.3 熱シミュレーションの誤差

熱シミュレーションは製品や検証環境を3次元モデルで再現し、物性や動作負荷をパラメータで設定する。動作負荷から算出される熱が伝導・対流・放射により部品間を移動し平衡が取れる状態を物理式に基づいて演算し、算出された測定部位の温度を検証結果としている。一例として、製品における温度分布を示す結果が第4図である。



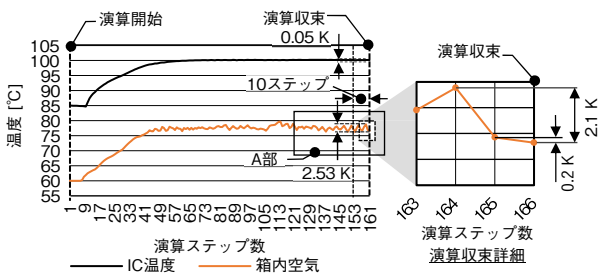
第4図 熱シミュレーションの結果 (温度分布)

Fig. 4 Results of thermal simulation (Temperature distribution)

第5図は、IC（製品モデル）と箱内空気（雰囲気温度）における演算開始から収束までの温度推移を示し、この収束時点の温度が検証結果である。この収束条件は、あるステップとその1ステップ前の演算結果の差が、すべての検証部位において閾（しきい）値を下回ることである。

本取り組みにて、同一条件で熱シミュレーションを繰り返して検証したところ、この収束タイミングのズレにより誤差が生じる事例が確認された。箱内空気の温度において、第5図A部のように2 K程度の差が繰り返される状態であっても、演算収束詳細部に示すように定常状態にあると判断して演算が終了する。そのため収束時点の結果のみを用いると収束タイミングによって、2 K程度の乖離が発生する可能性がある。

本取り組みでは、演算収束前10ステップの平均値を検証結果に用い、雰囲気温度からの変化量 ΔT に対する影響を低減した。



第5図 演算開始から収束の温度推移

Fig. 5 Temperature transition (calculation start-end)

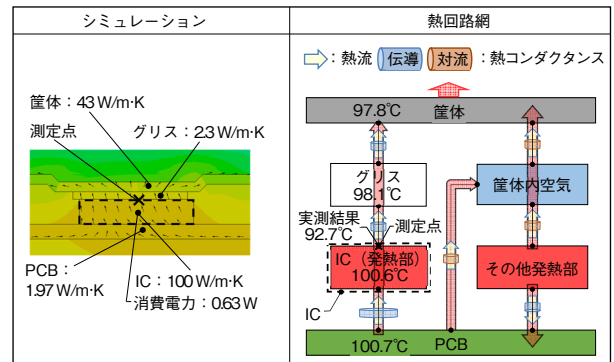
2.4 モデル要因による誤差

実機検証のばらつきと熱シミュレーションの誤差の分析により、乖離の主な要因はモデルにあると推測した。また、ICモデルを内部構造の細部までモデル化すると乖離が縮小した過去事例から、モデルの表現度合い（簡易表現／詳細表現）と結果との関係性を熱回路網にて分析した。

第6図は、従来の簡易表現モデル（左図）を熱回路網（右図）に落とし込んだ図である。簡易表現モデルはシミュレーションに要する時間の短縮を優先し、熱源ICの外形状のみを再現している。簡易表現モデルの熱源ICはPCB経由で周辺の熱を取り込みながら全体が発熱し、その熱がグリス・筐体（きょうたい）を経由して製品外へと伝熱される。温度測定点である熱源IC表面は100.6°Cとなり、実機検証との乖離は+7.9 Kとなっている。

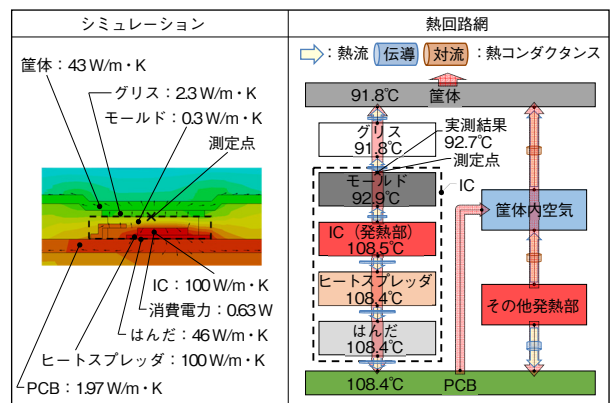
一方、詳細表現モデルでは第7図に示すようにICを内部構造まで再現し、位置・サイズともに詳細にモデル化されている。詳細表現モデルのIC（発熱部）に印加した

消費電力により発生した熱は、モールド・グリス・筐体を経由して製品外へと伝熱する経路と、ヒートスプレッタ・はんだを経由してPCBへと伝熱する2つの経路をもっている。また、温度測定点も実機検証と同様にモールド部表面（92.9°C）となり、実機検証との乖離は+0.2 Kに縮小する。



第6図 シミュレーションモデルの熱回路網（簡易表現モデル）

Fig. 6 Thermal network of a simulation model (Simple model)



第7図 シミュレーションモデルの熱回路網（詳細表現モデル）

Fig. 7 Thermal network of a simulation model (Detailed model)

このようにモデルの表現度合いを向上（詳細表現化）させると、発熱・伝熱の演算に関係する各モデルの構成要素やサイズが実機と同等となり、消費電力と熱伝導率も実際の状態に近づくことから結果の乖離が縮小する。これは詳細表現化モデルの熱回路網にて、熱の流れが正確に再現されていることから確認できる。

このことから目標精度 ± 5 Kの実現に高精度化が必要なモデルへのインプットは、発熱と伝熱に寄与する作動負荷（消費電力）とモデルの構成要素であるとの推論を立てた。

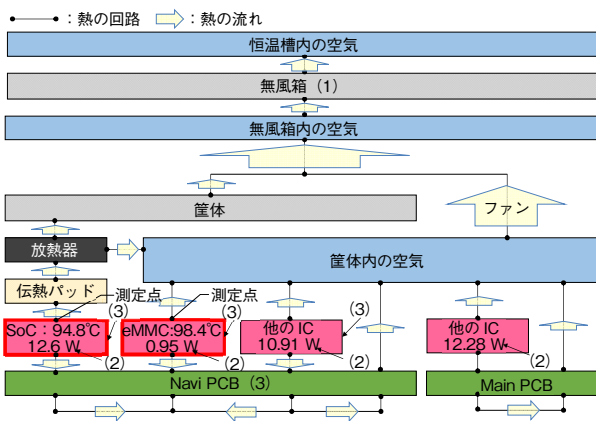
3. 熱シミュレーションの精度向上手法

熱シミュレーションの精度向上には、インプットする作動負荷（消費電力）の実負荷化と、モデルの詳細表現化が必要なことは確認できたが、目標精度 ± 5 Kの実現に必要な範囲（要素）は明確にできていなかった。

本章では、目標精度 ± 5 Kの熱シミュレーションを実現するモデル高精度化の範囲決定手法と高精度化の方法、および向上した精度について述べる。

3.1 高精度化範囲の決定手法

第8図は本取り組みの車載情報通信制御機器にて放熱性能判断に用いた主要熱源ICのSoCと、その近傍に配置された動作保証温度の低いeMMCを中心に作成した熱回路網である。



第8図 車載情報通信制御機器の熱回路網
Fig. 8 Thermal network of the in-vehicle information unit

2.4節で示したように、モデルを高精度化すると精度は向上するが、熱シミュレーションに要する時間も増加してしまう。そこで本取り組みでは第8図の熱回路網を用いて熱の経路を把握し、 ± 5 Kの精度を実現するモデルの高精度化範囲を、測定点に關与する発熱部品から箱内空気に至るまでの主要関係要素〔1〕～〔3〕とした。

- 〔1〕 環境モデル
- 〔2〕 作動負荷 – 消費電力
- 〔3〕 製品モデル – 温度測定するICモデル
– 近傍の熱源ICモデル
– 熱源IC周辺のGNDパターン

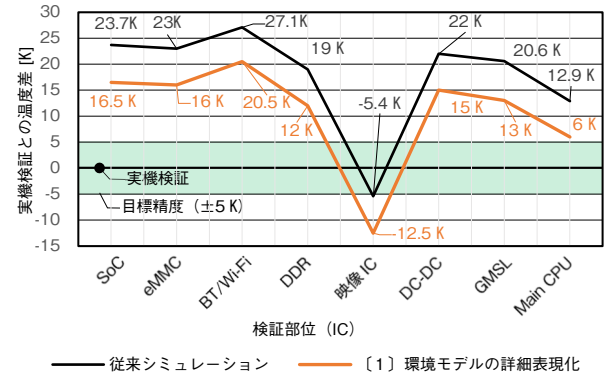
3.2 熱シミュレーションモデルの高精度化

〔1〕 環境モデルの詳細表現化

従来の熱シミュレーションは製品モデルの周囲温度を検証条件としてパラメータで設定しており、無風箱など

の検証環境はモデル化されていない。

そこで、熱回路網を用いた検討を基に無風箱をモデル化した結果、箱内空気温度の乖離が解消され、第9図に示すようにすべてのICにて7 K程度の温度低下を確認した。

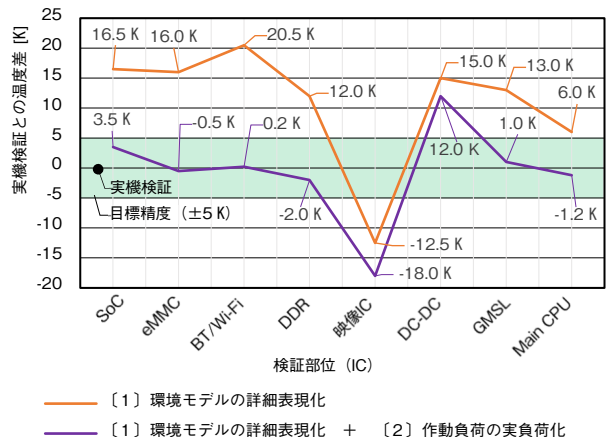


第9図 実機検証とシミュレーション結果の乖離 (1)
Fig. 9 Difference between verification using an actual unit and simulation

〔2〕 作動負荷（消費電力）の実負荷化

製品の作動負荷はモデルの発熱部に消費電力で設定され、発生する熱がすべての部位の温度に關与することは熱回路網から読み取れる。従来モデルにおいて消費電力は実機検証の作動負荷では発生しない定格値を用いており、合計値は36.74 Wであった。この値は実機検証の作動負荷とは差があり、実機検証と熱シミュレーションの結果に乖離を発生させる要因である。そのため、実負荷における各能動部品 (IC) や受動部品 (IC) の電流値や電圧値を実測し、電源設計書を基に算出した値を実負荷の消費電力として反映させた。

結果、消費電力の合計値は22.7 Wとなり作動負荷を実負荷化した熱シミュレーションの精度は第10図に示す



第10図 実機検証とシミュレーション結果の乖離 (2)
Fig. 10 Difference between verification using an actual unit and simulation

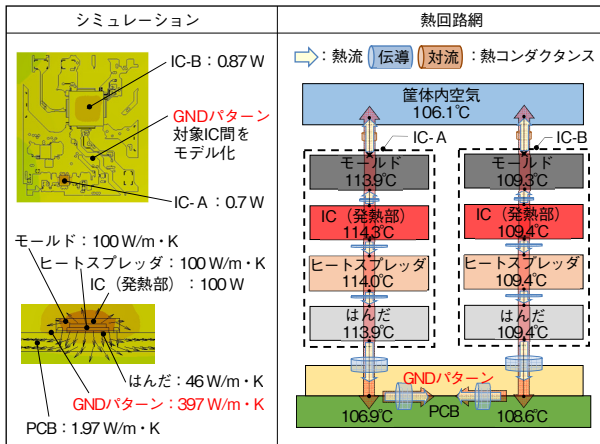
ように、製品全体の8割近い温度検証部位において目標精度を達成した。

〔3〕 製品モデルの詳細表現化

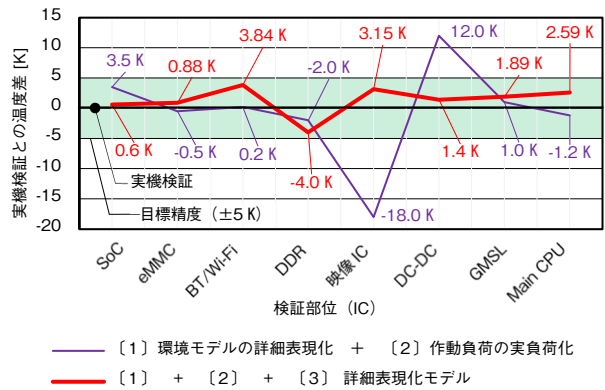
詳細表現化範囲として選定した、温度測定するICと近傍の熱源ICについては、部品図やCTスキャンを用いて内部構造の情報を取得し第7図のように詳細表現化した。さらに、発熱量が比較的大きく、放熱器や筐体接触などの放熱経路がない第11図のIC-A・BのようなICについては、主要放熱経路である周辺のGNDパターンを部分的にモデル化することにより、PCBを経由する熱経路が詳細表現化され、精度も目論見（もくろみ）どおりに向上することが確認された。

このようにモデルの詳細表現化という精度向上手法をすべて反映した熱シミュレーションの精度は第12図に示すように、全検証部位で目標精度の±5 Kを達成した。

さらに、他の車載電子機器の熱シミュレーションに本手法を用いた場合においても、目標精度の±5Kを満足することが確認されていることから、本手法は構造の異なる車載電子機器へも有効な手法であると考えている。



第11図 PCB GNDパターンによる詳細表現モデル化
Fig. 11 Detailed representation modeling with PCB GND pattern



第12図 実機検証とシミュレーション結果の乖離 (3)
Fig. 12 Difference between verification using an actual unit and simulation

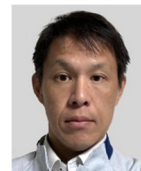
4. まとめ

熱シミュレーションの目標精度であった±5 Kに対し、検証箇所に関連する要素を限定的に高精度化することで達成した。これは、熱シミュレーションに要する時間（各モデルの情報収集時間、モデル作成時間、演算時間）を最小限にとどめながら、精度の大幅な向上を図ることができたということである。

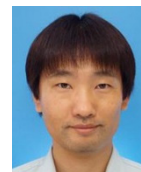
今後も、本取り組みと同様な活動を継続してデータを蓄積していくことで、さらなる向上に取り組みたいと考えている。

合わせて効率化の観点で、高精度化するモデル要素の特定手法と、作動負荷の実負荷化に用いる消費電力の算出手法についても、工夫と改善が必要であると考えている。

執筆者紹介



花田 祥史 Yoshifumi Hanada
オートモーティブ社
インフォテインメントシステムズ事業部
Infotainment Systems Business Div.,
Automotive Company



瀬戸 敦司 Atsushi Seto
オートモーティブ社
インフォテインメントシステムズ事業部
Infotainment Systems Business Div.,
Automotive Company



尾籠 裕司 Hiroshi Ogomori
オートモーティブ社
インフォテインメントシステムズ事業部
Infotainment Systems Business Div.,
Automotive Company