

車室内環境のシミュレーション技術を用いた オートエアコン制御開発の効率化

Improvement in Development of Automatic Air Conditioning Control Using the Cabin Environment Simulation

登坂 淳*
Jun Tosaka

宮下 徳英*
Norihide Miyashita

要 旨

車室内環境モデルの演算パラメータに湿度を追加し精度向上を図った。この車室内環境モデルを使用してオートエアコン制御の MILS (Model In the Loop Simulation) 環境を作成した。これらによりオートエアコンの制御性を実車試験の前に机上で検討できるようにした。ここでは車室内環境モデルとオートエアコン制御モデルを適合させる手段と適合結果について述べる。開発ツールにはモデルベース開発では標準的に使用される MATLAB[®]/Simulink[®]** を使用した。

Abstract

To improve the accuracy of the cabin environment model, humidity has been added to the calculation parameters. Using this cabin environment model, the MILS (Model In the Loop Simulation) environment for controlling the automatic air conditioner has been created. This enables us to conduct theoretical study of controllability of the automatic air conditioner before actual vehicle testing. This paper describes the means and results of the adaptation of the air conditioning control model to the cabin environment model. For a development tool, MATLAB[®]/Simulink[®] has been used as a standard tool for model base development.

Key Word: MBD, MATLAB/Simulink, Simulation, Software, Control/

1. はじめに

従来、カーエアコンの性能予測に使用されているモデルは、“オートエアコン制御モデル”⁽¹⁾ (以下制御モデル)、“車室内環境モデル”⁽²⁾ (以下室内モデル)がある。制御モデルは実車の制御検討に、室内モデルは HVAC モデル、AC サイクルモデルと組み合わせて冷房性能予測に使用されている。

また、オートエアコン制御の開発は、上記の性能予測検討結果に基づいた制御をプログラミングしたオートエアコンを搭載した実車を使用して行われている。実車を使用した開発作業は準備、設備において多くの時間と費用を必要としている。その為、実車試験以前に作り込まれたプログラミングの間違い(定数、ロジック)が実車試験で発見、または間違いに気が付かず実験が継続された場合は、プログラミングおよび実験の手戻りが発生し、多大な時間と費用の損失を伴うことがある (Fig. 1)。

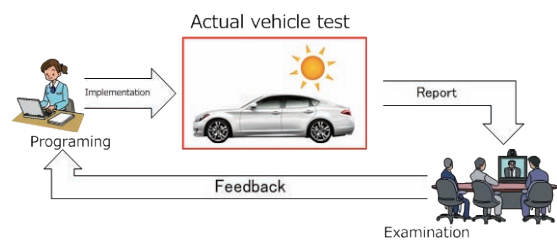


Fig. 1 Current job flow

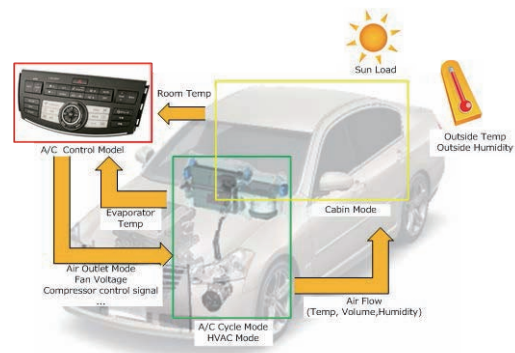


Fig. 2 Simulation model

* 空調事業本部 空調システム開発グループ

**MATLAB[®], Simulink[®]は、米国The MathWorks社の登録商標です。

そこで制御モデル、室内モデルを統合し車両が無い状態でも開発が行える様にし、実車試験の前に制御の妥当性を確認出来るオートエアコン制御の MILS 環境を作成した (Fig. 2).

2. オートエアコン制御モデル

オートエアコン制御とは車室内の環境を快適に維持するために、HVACを制御するものである。主に制御する対象として、風量を制御するブローア、風温を制御するMIX ドア、風の吹き出し口を制御するモードドア、エバポレータの温度を制御するコンプレッサ、外気導入量を制御するインテークドアがある。これらを制御するための入力として室温センサ、外気温センサ、日射量センサ等がある (Fig. 3).

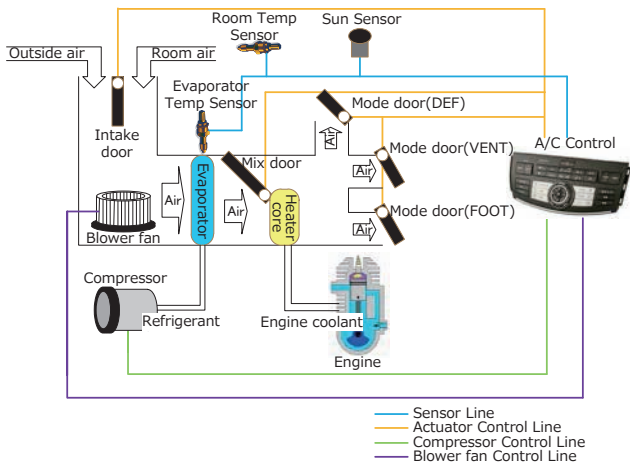


Fig. 3 HVAC System

これらはモデル内では別々の機能ブロックとして表現されシステムの機能要求により制御を変更できるようになっている。たとえば左右独立温調の機能要求であればMIX ドア制御用のブロックをシングル温調用ブロックから左右独立温調用ブロックに変更することで仕様変更が可能となり、シミュレーション環境 (Fig. 4) にて動作確認をすることが可能となっている。

また、この制御モデルは車両環境 (Fig. 5) への適合が容易に出来る様になっている。両環境の制御モデルは同一で制御モデルに CAN 信号の入出力ブロックを追加することで実車の HVAC を制御することが出来る。これによりシミュレーションによる効果確認の実施後、すぐに実車で確認する事が出来る。実車搭載の為の機器として MicroAutoBox[®] を使用している。

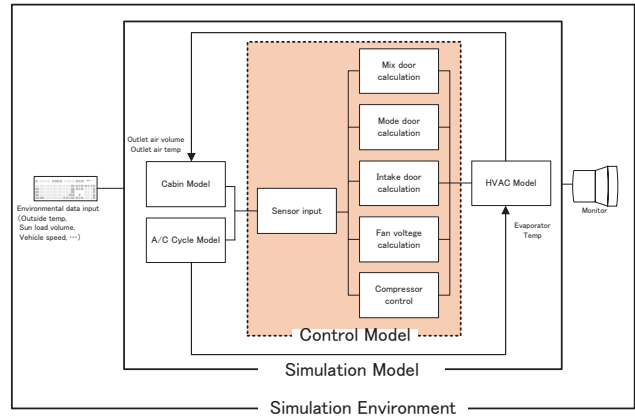


Fig. 4 Simulation system

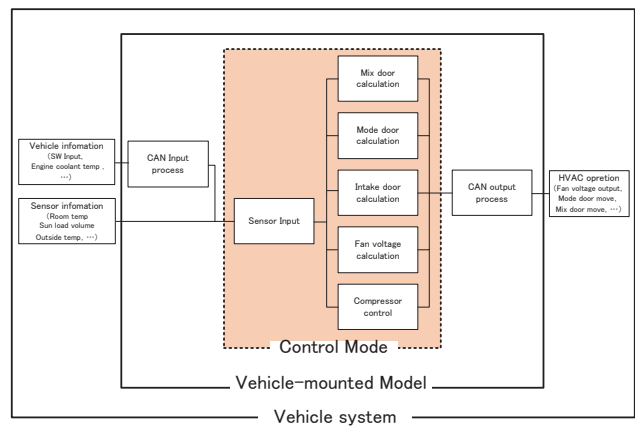


Fig. 5 Vehicle-mounted system

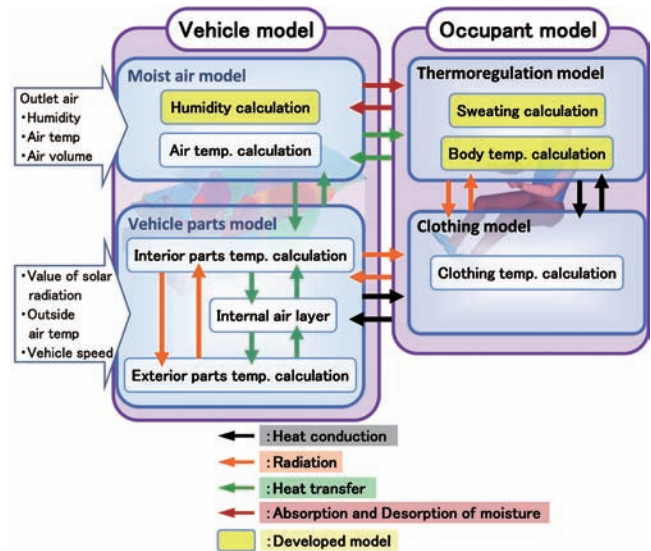


Fig. 6 Overview of the vehicle compartment environment Simulation

3. 室内環境モデル

文献⁽²⁾にて報告されている室内モデルには湿度計算モデルの追加, 人体温熱感モデルの追加といった課題が残されていた。本稿ではその課題を解決したモデルを開発した。開発した室内モデルの概要は Fig. 6 となる。これにより車室内の温度, 湿度, 風速の変化が乗員に及ぼす影響および乗員の呼気, 放熱および発汗が車室内環境に及ぼす影響の計算が可能となった。開発したモデルについて以下に示す。

3.1. 室内の温度および湿度計算モデル

文献⁽²⁾では車室内空間を 12 エリアに分割し熱収支を計算している。本稿では分割した各エリアをさらに乾き空気, 水蒸気, それらを統合する湿り空気の 3 つの要素にわけたモデルを開発した。このモデルは気流の影響による熱収支と空気質量の収支を計算し温度, 圧力, 湿度, 密度を算出する。開発したモデルの概要を Fig. 7 に示す。

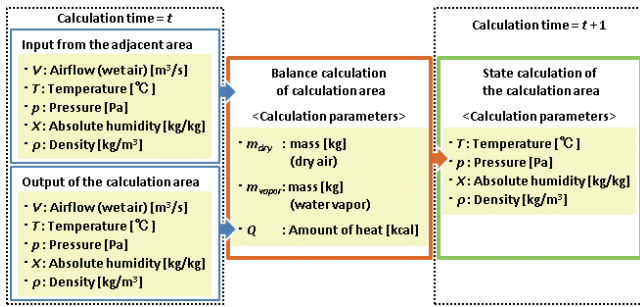


Fig. 7 Overview of balance calculation of air

車室内空気の収支計算は気流による変化以外に乗員, 車両内装品の影響を考慮する必要がある。そのため空気質量の収支計算は気流による質量の変動以外に乗員の呼吸や発汗の影響を加味し計算する。熱収支計算は気流による変化以外に乗員と内装品からの放熱を加味し計算する。これにより湿度変化を考慮した車室内の温度および湿度分布の計算が可能となった。開発した質量収支の状態方程式は式 (1) となり, 熱収支の状態方程式は式 (2) となる。

$$m_{air} = \int \dot{m}_{dry} dt + \int \dot{m}_{vapor} dt \quad (1)$$

$$Q = \int \dot{Q} dt \quad (2)$$

$$\dot{m}_{dry} = \sum_j f_1(T_j, X_j, V_j, p_j, \rho_j) + \sum_{i,j} f_2(T_i, T_j, X_j, V_j, p_j, \rho_j)$$

$$\dot{m}_{vapor} = \sum_j f_1(T_j, X_j, V_j, p_j, \rho_j) + \sum_{i,j} f_2(T_i, T_j, X_j, V_j, p_j, \rho_j)$$

$$\dot{Q} = \sum_{i,j} f_5(T_i, T_j, X_j) + \sum_j f_6(T_j, X_j, V_j, p_j, \rho_j)$$

- m : Mass [kg]
- \dot{m} : Mass balance per unit time [kg/s]
- Q : Amount of heat of air [kcal]
- \dot{Q} : Heat balance per unit time [kcal/s]
- f_1 : Amount of movement of the dry air [kg/s]
- f_2 : Effects of breathing [kg/s]
- f_3 : Amount of movement of the water voper [kg/s]
- f_4 : Effects of breathing and sweating [kg/s]
- f_5 : Heat transfer per unit time by convection [kcal/s]
- f_6 : Transfer of heat per unit time by airflow [kcal/s]
- T : Temperature [°C]
- X : Absolute humidity [kg/kg]
- p : Pressure [Pa]
- ρ : Density [kg/m³]
- V : Airflow [m³/s]
- t : Time [s]
- i : 1...n (interior parts, exterior parts, Occupant)
- j : 1...l (Vehicle compartment, Outlet air)
- air : Wet air
- dry : dry air
- $vapor$: Water vapor

3.2. 人体体温調節モデル

これまで利用していた人体モデルは環境温度, 風速および輻射による人体温度の変化とその時の放熱量を計算するモデルであった。このモデルの代わりに山本ら⁽³⁾⁽⁴⁾により開発された発汗蒸発が考慮された人体体温調節モデルを利用することで湿度が乗員へ及ぼす影響が計算可能となった。

3.3. 有効性の確認

本稿で開発した室内モデルと実車実験を Table 1 に記載する夏季を想定した条件にて比較し有効性を確認した。Fig. 8 に室内モデルによる計算結果と実験結果の比較を示す。その結果, 室内モデルは最大誤差 1.5°C で計算可能であり, 机上検討に十分使用できると判断する。

Table 1 Experiment conditions

Lab hour	30 min
Outside air temp.	35 °C
Value of solar radiation	760 W/m ²
Vehicle speed	40 km/h
Air conditioner	ON (Full cool)

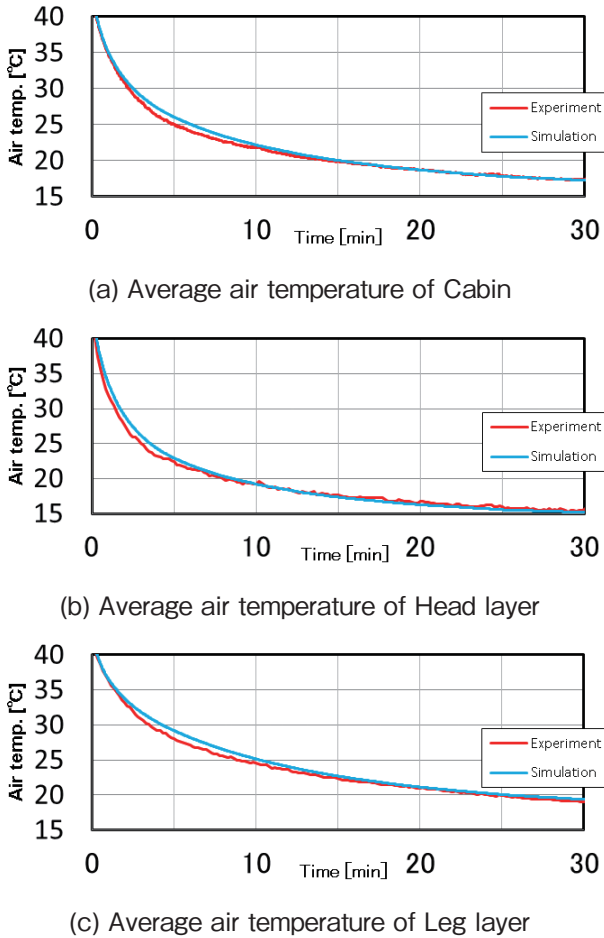


Fig. 8 Comparison between simulation result and experiment result

4. モデルの統合

4.1. 環境の統一

リアルタイム性を重視する制御モデルと演算効率を重視する室内モデルではシミュレーションの演算方法が異なる為、同じモデル内で動作させるには環境を統一させる必要がある。

それぞれモデルの演算ステップは制御モデル (2.5ms) と室内モデル (1000ms) では異なる演算ステップとなっていた。今回は制御性を検討する為の演算ステップ (50ms) に統一した。

モデルベース開発の利点の一つとして実機を使用しない環境での Try & Error が出来る所にある。その特性を十分に発揮するにはシミュレーション時間はなるべく短いほうが望ましいが、今回の演算ステップの統一によって室内モデルの演算量が増加し演算時間が悪化することになった。これに対し変更頻度の低い室内モデルの一部のモデルに対し S-Function 化 (C 言語化) を行った。これによって 1 時間分のシミュレーションが約 10 分程度で終了するようになった。

4.2. そのほかのモデル

制御モデルと室内モデルの結合だけではモデルベース開発を行うことは出来ない。Fig. 2 で示される HVAC モデルと AC サイクルモデルが必要となる。これらのモデルは車両ごとのユニットにより性能が大きく変わるため車両、又は仕様単位 (アイドルストップ車、ハイブリッド車等) にモデルを作成する必要がある。

4.2.1. HVAC モデル

HVAC モデルを物理モデルとして解くには、HVAC 内の風流れや温風、冷風の混合等を演算することになり複雑なモデルになってしまう。MILS 作成の目的は制御開発が中心であるため、ここでは制御に必要な物理量を算出するマップを作成し簡易化した。マップ化する内容として、MIX ドア開度に対する各吹き出し口からの風温度、ブロー電圧に対する各吹き出し口からの風量等となる。これらの値はシミュレーションの使用目的によって変わる。例えば、現行車に対する制御ロジックの変更に使用する場合は、実際の HVAC から台上実験により取得した値を使用し、HVAC の性能をオートエアコン制御込みで検討する場合はこれから作成する HVAC の目標値を使用するのが良い (Fig. 9)。

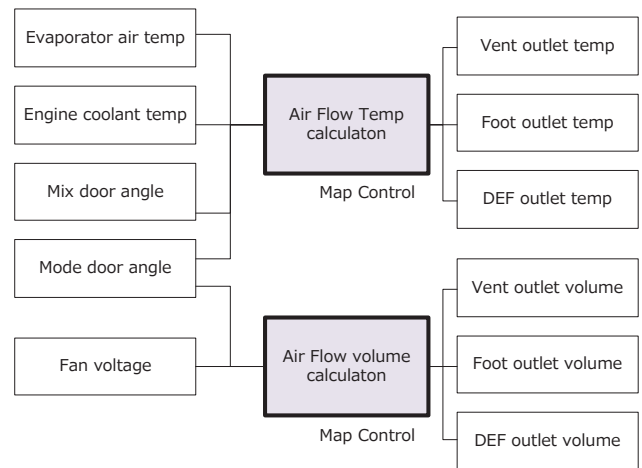


Fig. 9 HVAC model

4.2.2. AC サイクルモデル

AC サイクルモデルは物理モデル化するための要素が多く特に冷媒の状態変化なども考慮すると複雑になってしまう。そのため AC サイクルモデルもマップ作成で簡易化を行っている。外気温と車両への全面風速 (= 車速)、エンジン回転数を基に冷力を求め、エバポレータ前の湿度によってエバポレータ後の空気温度と湿度を演算する。冷房能力は基準となるサイクルの能力を基に熱交換器のサイズ等によりゲインを調整している。

また、AC サイクル以外にヒータコアの温度予測も行う。通常であればエンジン水温で構わないがエンジンが

停止した際の温度変化を外気温やブロー電圧などで推定する。これによりアイドルストップ時の制御検討も可能とした (Fig. 10)。

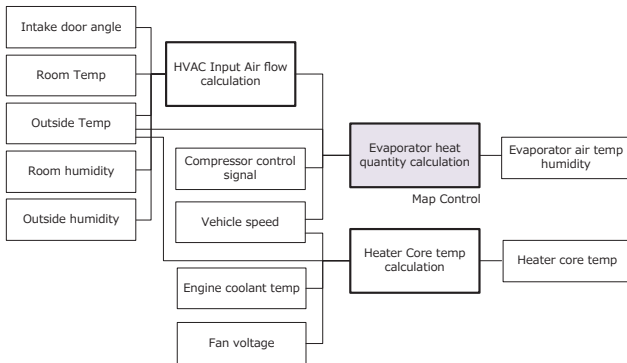


Fig. 10 A/C cycle model

5. シミュレーションの検証

今回作成したモデルの精度の検証を行う為、実車結果と比較する (Fig. 11)。比較対象のデータは夏季の市街地走行データを使用した。車両は日産 FUGA(Y50) を使用し入力データとして、“外気温”、“日射量”、“車両速度”、“エンジン水温”は実験時の車両データを使用している。

シミュレーション結果と実験結果を比較するとクールダウン中の車速低下時の吹出し温度の上昇や、室温安定時の日射量による室温の変化などが再現されている事が解る。また、過渡期から安定期に至る間にシミュレーションでは室温のアンダーシュートが見られる。これは過渡期において室温センサのシミュレーション精度不足の為に今後の改善の対象となる。

6. まとめ

今回オートエアコン制御のモデルベース開発環境を整え精度よく実車環境を再現できていることを確認した。本開発の成果はすでに新しいエアコンのシステム制御の検討に用いているが今後は製品開発で行っている定数検討の妥当性チェック等にも活用していく予定である。

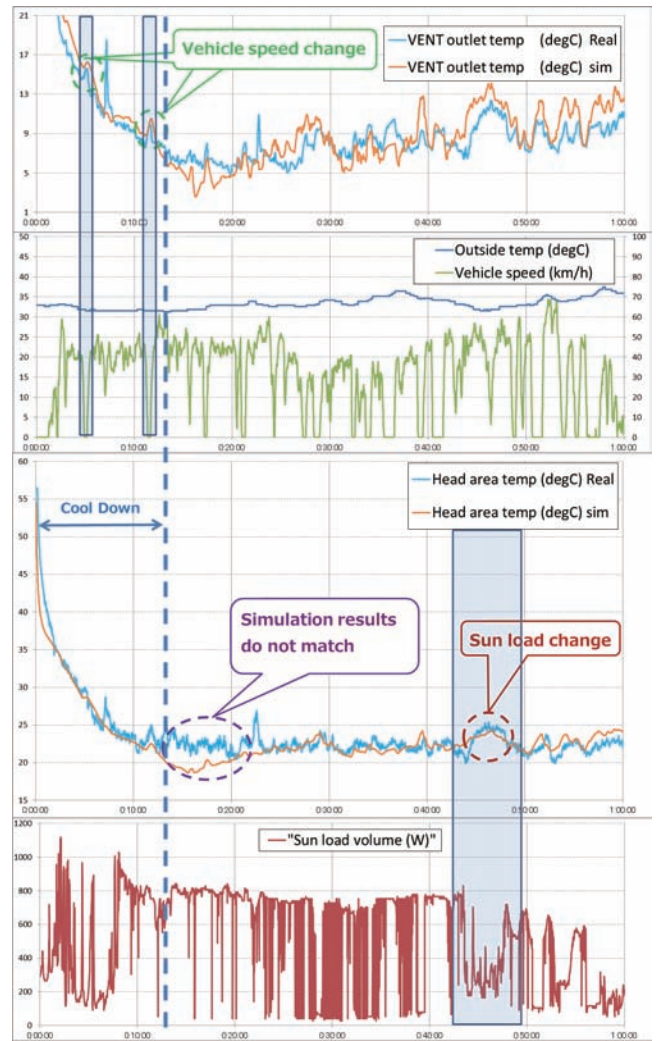


Fig. 11 Simulation results

参考文献

- (1) 登坂 淳：Calsonic Kansei Technical Review vol.4, p.15-18, 2007
- (2) 江崎 浩他：Calsonic Kansei Technical Review vol.6, p.34-37, 2009
- (3) 山本 哲史：自動車空調制御系の設計と評価に用いる乗員の人体体温調節モデルについて，早稲田大学大学院 先進理工学研究科電気・情報生命専攻渡邊研究室，修士論文，2008
- (4) 山本 哲史他：自動車空調制御系の設計と評価に用いる乗員の人体体温調節モデルについて，第8回計測自動制御学会制御部門大会資料，2008



登坂 淳



宮下 徳英