

# 博士論文概要

## 論文題目

マルチゾーン自動車空調システムに対する  
モデルベース制御系設計

Model-based Control System Design of  
Multi-zone Automotive HVAC System

申請者

久保田	拓也
Takuya	KUBOTA

電気・情報生命専攻 アドバンス制御研究

2013年12月

(受理申請する部科主任会開催年月を記入)

自動車における空調システムは、乗員の温熱的快適感の実現やガラス表面の結露を解消する役割を担っており、快適性や安全性の面から自動車にとって必要不可欠な装備となっている。一方で、空調システムが冷房や暖房に非常に大きなエネルギーを消費することが問題となっており、特に、近年注目されている電気自動車においては、走行用のバッテリーから空調システムにエネルギーを供給するため、走行可能距離が空調使用時に顕著に減少することが指摘されている。このことから、本来の目的である乗員快適性の確保と同時に省エネルギーを実現する空調システムの開発が課題となっている。

本論文では上述の課題を鑑みて、自動車室内を複数のゾーンに区分し、それぞれを独立して制御するマルチゾーン空調システムに注目する。マルチゾーン空調システムはゾーンを区分することで、乗員のいない領域の過度な冷房と暖房を抑え、乗員快適性を個々に制御することを意図したシステムで、その可能性に注目が集まっている。

しかし、マルチゾーン空調システムは従来のゾーンを区分しないシステムと比べて温熱環境に対する入力自由度が高く、さらにゾーン間の干渉が存在するために複雑な多入力システムとなる。現在の空調システム開発では、実験や経験則に基づく試行錯誤によって制御系の設計/評価が行われていることから、マルチゾーン空調システムを採用した場合に、従来の制御系設計/評価に対するアプローチを直接適用するのは困難である。

そこで、本論文ではマルチゾーン空調システムに対するモデルベースの制御系設計について検討する。モデルベースの制御系設計を採用することで、温熱環境の特性を考慮した上で乗員快適性やエネルギー消費量の定量的な評価が可能となる。また、実験では走行環境を再現する設備が必要であり、温度変化が比較的緩やかであることから、設計/評価に多大なコストと時間を必要とする。一方、モデルベースの設計/評価は数値シミュレーションで行われるため、コストと時間の大幅な削減が期待できる。

以上の背景のもと、提案するモデルベースの制御系設計手法を、1)温熱環境のモデル化、2)乗員快適性とエネルギー消費の最適化、3)快適性を制御量としたロバストな空調制御系設計と快適性推定、の3つのステップから構成することを考える。上記の1)~3)の手順に基づいた設計により、快適でかつ省エネルギーな空調システムの実現を目指す。以下、本論文の構成と概要を示す。

第1章では、本研究の背景や先行研究、マルチゾーン空調システムに対する制御系設計の特徴を記す。

次に、第2章では温熱環境のモデル化について議論する。マルチゾーン空調システムを搭載した4人乗りセダン車を対象に、その温熱環境を(1)空調システム、(2)車体外装温度、(3)車体内装温度、(4)自動車室内空気温湿度、(5)乗員、(6)日射、の6つのモデルから構成する。(2)~(5)のモデルでは温湿度のダイナミクスを考慮

する。先行研究では温熱環境のモデル化において数値流体解析や有限要素法に代表される分布定数系のモデル化手法を適用することが多く見られる。分布定数系のモデルは温度や風速などの分布を詳細に表現できることから、実験の代用としては非常に有効である。しかし、その解析には膨大な計算量と時間を要することから、空調制御系設計に直接用いることが困難なモデルであると言える。そこで、計算量と精度のバランスに優れたコンパートメントモデルの採用を考える。コンパートメントモデルは対象を複数のノードに分割し、それぞれのノードを熱流や水蒸気の流れでつなぐことで全体を表現するモデルである。コンパートメントモデルは分布定数系のモデルと比べて再現性は劣るが、制御系設計には十分な精度があり、計算量を大幅に削減できることから、制御系設計に適していると言える。

コンパートメントモデルにおける各ノードをつなぐ熱流として、伝導、対流、放射、蒸発、発熱、日射を考える。このうち、対流、放射、日射は自動車の形状に大きく左右されることから、3Dモデルに基づいた定式化を行う。対流は、あらかじめ3Dモデルに基づく数値流体解析を行い、その結果をコンパートメントモデルに組み込むことで考慮する。放射と日射は3Dモデルとモンテカルロ・シミュレーションを用いることによってその到達面を明らかにし、壁面での反射も考慮する。日射は上述のモンテカルロ・シミュレーションに加えて、ガラスの分光特性を考慮するために日射強度分布モデルと組み合わせ、その影響を評価する。

コンパートメントモデルのノード間には多数の熱流や水蒸気の流れにから構成されるネットワークが存在する。そこで、熱流と水蒸気の流れに対してグラフ理論を適用し、ネットワーク構造とパラメータの分離を試みる。さらには、分離したネットワーク構造とパラメータに基づいて状態方程式を導出する手法について議論する。これにより、ネットワーク構造を陽に表現することができ、モデルの規模が大きくなった場合でもシステマティックにモデル化することが可能となる。

温熱環境モデルでは乗員の快適性も定量的に評価する。乗員の快適性評価には標準新有効温度(SET\*)を採用する。SET\*は快適性に影響する温熱の6要素(気温、湿度、風、放射、衣服、代謝)を総合して評価できる指標である。自動車室内は一般的に熱的偏りが生じやすいことから、身体部位ごとにSET\*を求めることで局所的な快適性を評価する。

上述のコンパートメントモデルで表現された温熱環境モデルの有効性を実験とシミュレーションとの比較により検証する。これにより、構築した温熱環境モデルは十分な精度を持つこと、及び制御系設計に十分適用できることを示す。

第3章では、乗員快適性と空調システムのエネルギー消費をバランスさせる冷房時の最適な空調運転モードの定常状態について考察する。最適化問題として、快適性(SET\*)とエネルギー消費の重み付き和からなる目的関数を考え、この目的関数をアクチュエータの制約条件下で最小化する。これにより、快適性とエネルギー消費のバランスをさせた制御入力(吹出し温度、吹出し風量)を決定し、最適

な空調運転モードの特徴を明らかにする。なお、最適化はマルチゾーン空調システムとゾーンを区分しない一般的な空調システムの両者に対して行い、マルチゾーン空調システムの有効性を検証する。

最適化から得られる結果より、最適な空調運転モードには、1)乗員のいるゾーンに対してのみ送風する、2)冷房時はヒーターコアを使用した温度調節を行わずにエヴァポレータで最大限冷却する、3)吹出し風量で快適性を制御する、という特徴を有することを述べる。また、ゾーンを区分しないシステムとの比較により、マルチゾーン空調システムは快適性を維持しながら、エネルギー消費をおよそ25%削減できることを示す。

第4章では、マルチゾーン空調システムの制御系設計について述べる。乗員はドライバー1名とし、最適化の結果に基づきドライバー席に対する吹出し風量を制御入力に選ぶ。また、一般的な空調制御系は室温を目標温度に維持することを目的とするが、本論文では乗員の快適性(SET\*)を推定できるものとして快適性を直接制御することを考える。

制御系の構造は以下の通りである。まず、最適化で得た定常状態に対する最適入力をマップ化し、フィードフォワードコントローラとして利用する。また、日射量や外気温度の変動に対してロバストな制御系とするために、スケジューリングフィードバックコントローラを設計する。フィードバックコントローラの制御パラメータは外気温度でスケジューリングされるものとし、その設計には定数スケーリング行列付き  $H_{\infty}$ 制御理論を用いる。制御入力である吹出し風量には制約が存在することから、コントローラの性能が十分に発揮できなくなる場合が存在する。そこで、ゲインスケジューリング型のアンチワインドアップ補償器を導入し、制御入力の飽和に対する補償を行う。制御系の性能はシミュレーションによって評価し、外乱の存在する環境下で快適性を一定に維持できることを示す。

第5章では、第4章における制御系を実現させるために、快適性の推定方法について議論する。ここではオブザーバを用いた状態推定によるアプローチと学習によるアプローチの2つを検討する。温熱環境全体のモデルはIRセンサ等で計測可能な一部の内装温度だけでは不可観測なシステムであるため、システム全体に対するオブザーバを構成することができない。しかし、快適性推定に必要な個々の要素に注目すると、日射モデル、乗員体温調節モデル、自動車内装及び空気温湿度に対するオブザーバを組み合わせることで、快適性が推定できることを示す。また、先行研究ではニューラルネットワークを用いた学習により快適性を推定する手法が提案されていることから、ニューラルネットワークによる快適性推定も試みる。構築した快適性推定器の有効性は第4章の制御系に推定器を組み合わせたシミュレーションにより検証する。

第6章では結言として本論文を総括し、マルチゾーン空調システムのモデルベースの制御系設計の有効性と今後の展望について述べる。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 久保田 拓也 印

(2014年2月 現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	1) ○ <u>久保田拓也</u> , 渡辺亮: マルチゾーン空調システムのためのモデルベースによるエネルギー消費と乗員快適性の最適化, 自動車技術会論文集, Vol.44, No.2, 2013年3月 2) ○ <u>久保田拓也</u> , 渡辺亮, 江崎浩: 自動車空調制御のための温熱環境および乗員快適性の動的モデルの構築, 自動車技術会論文集, Vol.42, No.6, p.1315-1320, 2011年11月 3) ○ <u>久保田拓也</u> , 渡辺亮, 宮下徳英: 自動車室内における乗員への車室内長波放射と日射の影響, システム制御情報学会論文誌 Vol.23, No.6, p.115-127, 2010年6月
講演 (査読あり)	1) <u>T. Kubota</u> , R. Watanabe: Model-based Optimization of a Multi-zone HVAC System for Cooling, The 7 <sup>th</sup> IFAC Symposium on Advances in Automotive Control, p.207-212, Tokyo, September, 2013 2) <u>T. Kubota</u> , R. Watanabe: Thermal Environment Modeling of Automotive Passenger Compartment and Model-Based Optimization of Multi-zone HVAC system Considering Passenger's Comfort, 9th International Meeting for Manikins and Modeling, ref.47, Tokyo, Japan, August, 2012 3) <u>T. Kubota</u> , R. Watanabe, N. Miyashita: Effects of Thermal Radiation and Insolation on Passenger Compartments of an Automobile, 2010 IEEE International Conference on Control Applications Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, pp541-548, Kanagawa, Japan, September, 2010
講演 (査読なし)	1) <u>久保田拓也</u> , 渡辺亮: 温熱環境の動的モデルの構築と空調制御のモデルベース最適化, 自動車技術会シンポジウム No.2-13, 2013年11月, p. 9-14, 東京都 2) <u>久保田拓也</u> , 渡辺亮: マルチゾーン空調システムに対するゲインスケジューリング制御, 2013年度自動車技術会秋季大会, 学術講演前刷集 No.119-13, p.13-18, 2013年10月, 愛知県 3) <u>久保田拓也</u> , 渡辺亮: 冷房時の最適化に基づいたマルチゾーン空調制御の消費エネルギーと快適性に対する評価, 2013年自動車技術会春季大会, 学術講演前刷集 No. 51-13, p.15-20, 2013年5月, 神奈川県 4) <u>久保田拓也</u> , 渡辺亮: エネルギー消費と快適性の最適化に基づいたマルチゾーン自動車空調制御, 計測自動制御学会第13回制御部門大会, SY002/13/0000-1075, 2013年3月, 福岡県

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<p>5) <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮: マルチゾーン空調システムのためのモデルベースによるエネルギー消費と乗員快適性の最適化, 2012年自動車技術会秋季大会, 学術講演会前刷集 No.137-12, p.5-10, 2012年10月, 大阪府</p> <p>6) <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮: 自動車空調における乗員快適性と消費エネルギーのバランスに関する最適化, 第41回制御理論シンポジウム, p. 135-140, 2012年9月, 大阪府</p> <p>7) <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮: マルチゾーン空調制御器設計に向けた自動車温熱環境のモデル化, 計測自動制御学会第12回制御部門大会, SY003/12/0000-P0007, 2012年3月, 奈良県</p> <p>8) <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮: グラフ理論による温熱環境の状態空間表現, 計測自動制御学会第40回制御理論シンポジウム, p.15-20, 2011年9月, 大阪府</p> <p>9) <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮, 江崎浩: 自動車空調制御のための温熱環境および乗員快適性の動的モデリング, 自動車技術会2011年春季大会, 学術講演前刷集 No.47-11, p.29-34, 2011年5月, 神奈川県</p> <p>10) <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮: 自動車空調制御系設計のための局所 SET*による定量的快適性評価, 計測自動制御学会第11回制御部門大会, SY0004/11/0000-16231, 2011年3月, 沖縄県</p> <p>11) <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮: 自動車空調の制御系設計に用いる温熱環境モデル-快適性評価指標についての考察-, 計測自動制御学会第39回制御理論シンポジウム, p.135-140, 2010年9月, 大阪府</p> <p>12) <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮, 宮下徳英: 自動車室内の乗員に与える日射の影響, 計測自動制御学会第38回制御理論シンポジウム, p.379-384, 2009年9月, 大阪府</p> <p>13) <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮, 宮下徳英: 自動車室内空調評価のための人体体温調節モデルと人体外部環境モデル-車室内輻射と太陽光の評価-, 計測自動制御学会第9回制御部門大会, SY0003/09/0000-FC54, 2009年3月, 広島県</p> <p>14) <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮, 宮下徳英: 自動車室内空調設計・評価のための人体体温調節モデル-モンテカルロ法を用いた形態係数の算出-, 計測自動制御学会第9回システムインテグレーション部門講演会(SI2008), p.1103-1104, 2008年12月, 岐阜県</p>

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
その他 (論文)	<p>■学位論文には直接関係のない業績</p> <p>1) 末木智大, <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮: デフォッガー設計に向けた結露モデルの構築と車室内の結露シミュレーション, 自動車技術会論文集 Vol. 44, No.5, p.1295-1299, 2013年9月</p>
その他 (講演)	<p>1) 末木智大, <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮: デフォッガー設計に向けた結露モデルの構築と車室内の結露シミュレーション, 2013年自動車技術会春季大会, 学術講演前刷集 No.51-13, p.9-14, 2013年5月, 神奈川県</p> <p>2) 末木智大, 吉田友毅, <u>久保田拓也</u>, 渡辺亮: デフォッガー設計に向けた結露の定量的観測とモデリング, 計測自動制御学会第12回制御部門大会, SY003/12/0000-P0008, 2012年3月, 奈良県</p>