

博士論文審査報告書

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

2014年2月

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に加え、ガラス表面の結露解消という安全性の面からも自動車にとって必要不可欠な装備である。その一方、空調システムが冷暖房で消費するエネルギーが多大であ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は、走行用のバッテリーを空調システムのエネルギー供給源として使用するため、空調使用時に走行可能距離が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重要な課題となっている。

上述の課題を解決するために、自動車室内を複数の区域に分割し、各区域を独立に制御するマルチゾーン空調システムが提案されている。このシステムは乗員のいない区域の過度な冷暖房を抑え、乗員それぞれの快適性を独立に制御することを意図したものである。その一方、マルチゾーン空調システムは従来の空調システムと比べて温熱環境に対する入力自由度が高く、さらに区域間の干渉が存在するために複雑な多入出力システムとなる。現在の空調システム開発では、実験や経験則に基づいて制御系の設計が行われていることから、マルチゾーン空調システムに対して従来の設計アプローチを直接適用するのは困難である。

以上の背景の下、本論文はマルチゾーン空調システムに対するモデルベース制御系設計について考察している。モデルベース制御系設計では、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設計が可能となる。実験には環境試験設備が必要で、また、温度変化の時定数が長いことから、設計に多大なコストと時間を必要とするが、モデルベース設計は数値計算で行われるため、大幅な生産性の向上も期待できる。本論文はモデルベース制御系設計を、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つの手順から構成し、快適かつ省エネルギーな空調システムの合理的な設計を試みている。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述べている。

第2章では、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、(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つの要素から構成される温熱環境のモデル化について述べている。多くの先行研究では数値流体解析や有限要素法を用い、温度や風速などの分布を詳細に表現可能な分布定数系として温熱環境をモデル化している。分布定数系のモデルは実験の代用としては非常に有効である一方、その解析には膨大な計算を要することから、空調制御系設計に直接用いることは困難である。そこで、本論文では計算量と精度のバランスを鑑みてコンパートメントモデルを採用している。この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。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分布再現の解像度は低い、制御系設計には十分な精度を持つことに加えて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の各ノードをつなぐ熱流は、伝導、対流、放射、蒸発、発熱、日射が考えられており、これらの内、対流、放射、日射について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っている。対流は、あらかじめ3Dモデルに基づく数値流体解析の結果をコンパートメントモデルに組み込み、放射と日射は、その到達面と壁面での反射を考慮している。日射はガラスの分光特性を反映するために日射強度分布モデルと組み合わせ、その影響を評価している。

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から構成されるネットワークが存在する。そこで、このネットワーク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が分離した形式で状態方程式を導出する手法について議論している。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ムティックにモデル化することが可能となる。

乗員の快適性については、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)を総合した定量的な評価指標である標準新有効温度(SET*)を採用している。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している。

コンパートメントモデルで表現した温熱環境モデルの有効性は、シミュレーションと実験との比較により検証されている。これにより、本姓で構築した温熱環境モデルは制御系設計に十分な精度を持つことを示している。

第3章では、冷房時を対象に乗員の温熱的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最適な空調運転モードの定常状態を、最適化問題の枠組みで考察している。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、これにより、最適な空調運転モードの特徴を明らかにしている。

最適化で得られた結果より、最適な空調運転モードは、1)乗員のいる区域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示している。また、車室内を区域に区分しない従来空調との比較をおこない、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している。

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ている。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、本章では乗員の快適性(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試みている。乗員はドライバー1名、制御入力是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としている。

制御系の設計手順は以下の通りである。最適化で求めた定常状態におけ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、外部環境の変動に対してロバストな制御系とするために、日射量と外気温でスケジューラされるフィードバックコントローラを定数スケーリング行列付き H_{∞} 制御理論を用いて設計する。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、ゲインスケューリング型のアンチwindアップ手法を導入して制御入力の飽和に対する補償を付加する。以上の手順で得られた制御系が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、シミュレーションによって示している。

第5章では、提案制御系の実現に必要な快適性の推定方法について、オブザーバを用いた状態推定によるアプローチを検討している。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となりオブザーバを構成することは不可能である。本章では、快適性推定に必要な個々の要素に注目、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、快適性が推定可能となることを示し、構築した快適性推定器の有効性を第4章の制御系と組み合わせたシミュレーションで検証している。また、先行研究で提案されているニューラルネットワークによる快適性の推定も検討している。

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制御系設計の有効性と今後の展望について述べている。

本研究は、マルチゾーン空調システムを対象に、モデルベース制御系設計の観点から制御系設計に直接適用することを前提とした自動車室内の新しい温熱環境モデル、および乗員快適性と省エネルギーを実現する制御系の合理的な設計手法を提案している。本論文の成果は、従来経験と実験に基づいておこなわれてきた空調制御系の設計において、モデルに基づく合理的で新しい方向を拓くもので、自動車用空調に対する制御系設計法の発展に寄与するところが大きい。本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認められる。

2014年1月

審査員

主査	早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	渡邊亮
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	松本隆
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	内田健康
	早稲田大学教授	博士（工学）東京大学	村田昇
	早稲田大学教授	博士（医学）京都大学	井上真郷