

# 博士論文審査報告書

## 論文題目

Analysis and Proposals for Advance of  
Automobile Air Conditioning System from  
the Perspective of Energy Saving and  
Thermal Comfort

車載用パーソナルエアコンの省エネルギー性と快適性側面  
からの分析と提案

申請者

曾	楊
Zeng	Yang

環境・エネルギー研究科  
環境・新エネルギー研究

2013年 12月

我が国における最終エネルギー消費を第一次オイルショック当時(1973年度)と現在を比較すると、輸送部門において約 1.9 倍となっている。この削減のため、いわゆる車両の燃費低減競争時代に入り、ハイブリッド、EV、FC 車両(次世代自動車)などに期待が寄せられている。閣議決定はされていないが内閣府のグリーンエネルギー大綱では、新車販売に占めるこれら次世代自動車の割合を 2030 年には 70%までに引き上げる目標が示されている。このように内燃機関(エンジン)から電動方式に変貌をとげるなか、車載用の空調方式も今後転換を迫られるものと予測される。エンジンを用いる現行方式は夏期の冷房をエンジン直結のコンプレッサーを駆動源とする冷凍サイクル、冬期の暖房はエンジン排熱との熱交換(ヒーターコア)による方式である。エンジンを持たない次世代自動車では、空調方式は家庭用と同様に電動ヒートポンプ方式が期待されるが、空調器の負荷は、一般の家庭用(2.8kW)よりも大きく車両の航続距離が半減すると言われている。また、暖房においてはさらに厳しく寒冷地等で結露、着霜問題が顕著に現れ、ヒーターとの競合になると予想される。

このような問題に対する解決の一助となるべく、本論文ではいわゆる車室の中のパーソナル空調の効果を検討している。ここでパーソナル空調方式は、車室内のシート内に埋め込まれたペルチェ素子による冷気をモーター駆動のファンによって個別に供給する形式をさしている。同時に、このような空調による熱的な快適性 PMV (Predicted Mean Vote) と 3D 数値熱流体計算による室内流速や乱流特性と関連付ける試みを行っている。

本論文は 6 章から構成されている。

第 1 章は序論であり、本研究の対象となる車載用の空調機について原動機の変遷によるヒートポンプ化が求められているが、その課題の整理が行われている。中でも研究の中心に位置付けられたパーソナル空調方式について関連する過去の研究成果を概観し、その実用例について言及し、その将来性について議論している。同時に本空調方式に関する課題の抽出ならびに研究の位置付けを明確し、車室内の CFD 熱流動解析の確立が新しい空調方式の設計に対して重要であることを指摘している。

第 2 章では、特に夏期など炎天下で長時間にわたり駐車した際に車室内の温度が 50℃以上に上昇する事実を基に、この閉鎖された車室内への伝熱とそれに伴う熱流動現象を数値計算によって解析している。具体的には、キャビン形状が箱形に近い車種を計算対象に選定し、実寸法に基づき簡易型三次元形状を作成、夏期における熱放射と対流による熱負荷考慮して車室内の支配方程式をたてこれを数値的に解いている。同時に実験的な検証も行っている。例えば、車両の中央垂直断面と水平断面上での温度および流速の時間変動においては、フロント側と車両の両側において最も高い温度を記録し、車室内

空気は、時間経過が進んでも本質的に停滞すること、特に車室中央部は他の領域に比べて流速が低いことを示している。計算で得られた各部の温度は実験による測定結果と一致している。また、初期の空調負荷となる熱流入量は計算においては概ね 7.5 kW と予測され、現行の実験をベースとした経験値と一致している。以上から、本計算モデルは妥当であることが示された。

第 3 章は現行の車載空調方式による夏期冷房効果について、第 2 章と同様なモデル対象車種を用いて実験的、数値解析的に検証している。実験はある安定状態を初期状態として車室内の様々な位置での温度変化とエネルギー消費を 15 分間にわたり計測している。解析も同様に、この冷房期間内の車室内空気流動と熱移動について行っている。支配方程式は第 2 章と同様で、実験条件からの境界条件を設定して Implicit time marching finite volume numerical method（時間進展に関して陰解法を用いた有限体積法）より解析を実行している。

結果として、実験と解析の良好な一致を見出すとともに、車室内の構造にもよるが前方より後方の気温が依然高く、全ての乗員が快適性を満足していないことを明らかにしている。

第 4 章では、従来および現行方式とは異なり、EV 車両の乗員に対する温熱快適性確保を目的に、座席埋め込み型ペルチェ方式の個別空調を提案して、これを同様に実験および数値解析によって議論している。なおペルチェ素子は前座席と後ろ座席の乗員腰部と首部に設置（計 8 点）している。加えて温熱的な快適性を PMV（Predicted Mean Vote）で評価するため、これを詳細に検討し冷房温度をパラメーターとして、冷気流速と PMV の関係を導いている。実験によれば、本システムは稼働後 4 分間で乗員の快適性を一応確保することができ、また消費電力も現行方式に比べて 338.8W と省エネルギー性が高いことを認めている。しかしながら、乗員の身体部位による快適性の偏在が顕著であることを確認している。一方この状況を数値解法によって簡易三次元モデルにより分析している。この結果は実験結果を合理的に説明するものの、座席以外の車室空間の温熱環境は 15 分間全く変化しないことが明らかになった。このことから、冷気吹き出しを促進する何らかの計算手法を必要とすると結論付けている。

第 5 章では、第 4 章で見出された身体部位による快適性の偏在についてこれを克服するため、現行方式と同様に前方パネル部 4 か所の冷気吹き出し部を設け、これに対処している。本章では、この新方式について車室の中の流動と熱移動について数値解析的に検討している。本方式の採用は車室内の流動を促進するとともに、座席に設けた素子を十分補助しており、省エネルギー性を保ったまま、初期の 15 分間で車室内温度を 5℃ 低下することに成功し

ている。以上の修正により、快適性の偏在もなくなり、将来の EV 車両に適用可能であると結論付けている。

第 6 章は、結論として本論文に関する成果を改めて概観し、総括するとともに今後の技術開発の方向として、車室側と空調サイクル（ヒートポンプサイクル）の連成解析の必要性と、個別空調の温熱快適性の更なる追究が必要であるとしている。

以上要するに本論文では、車両の電動化によるヒートポンプ化への対応、環境規制による冷媒の変更など、大きな変革期を迎えているカーエアコンを対象に、現行方式のエンジン直接駆動型空調に対してペルチェ素子による冷却方式を提案し、実験及び確立した数値解析によって車室内の温熱環境を議論している。この成果は、開発現場における伝熱工学、加えて数値計算による設計法に多大の示唆と貢献をなすものであり、高く評価できる。よって、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2013 年 12 月

(主査) 早稲田大学教授 工学博士 (早稲田大学) 勝田 正文  
早稲田大学教授 博士 (工学) (早稲田大学) 関谷 弘志  
早稲田大学教授 博士 (工学) (早稲田大学) 草鹿 仁  
早稲田大学准教授 博士 (工学) (早稲田大学) 小野田弘士