

## 論文の内容の要旨

論文題目 PCMを用いた電気自動車向けヒートポンプサイクルの考案及び  
熱管理シミュレーションによる冬期の有効性分析

氏 名 金 洪碩

電気自動車の省エネ化を図るためには熱マネジメントが重要である。蓄電池システム、パワートレイン、客室の空調における熱の流れを総合的にマネジメントすることによって、省エネを図る次世代技術の確立が望まれている。そこで、本研究では蓄熱材(PCM)を利用した熱電池の概念を提案し、不要な熱は熱電池に蓄え、必要な時に熱電池から熱を取り出す技術の開発を目指している。潜熱蓄熱材を用いた熱電池のモデル実験装置を製作し、動的挙動を解析するシミュレーションを開発している。電気自動車全体のシミュレーションモデル（充電モデル、パワートレインモデル、空調モデル）に熱電池モデルを組み込み、特に冬季のエアコン除霜時の客室の暖房問題を解決することに成功し、省エネの実現に有効であることを示している。

### 1. 緒言

年々環境に関する規制が厳しくなる中、車両の排出する CO<sub>2</sub> の量は逆に年々増大してきた。そのため、車両における CO<sub>2</sub> 排出量の厳しい規制が欧米を始めに日本、アメリカのカリフォルニア州、中国といった世界各地までにどんどん広がっている。このような厳しい CO<sub>2</sub> 排出規制に対して、自動車メーカは電気自動車を持って乗り越えようとしている。図 1 に示すように<sup>(1)</sup>2012 年グローバルで 0.2%であった PHEV まで含んだ電気自動車の割合は 2019 年 2.5%までに拡張し、これから更に電気自動車の普及が加速することが予想されている。しかし、<sup>(2)</sup>電気自動車の普及のために大きな技術課題はバッテリー(蓄電池)とキャビン(客室)における温調のために電気エネルギーを用いることによる著しい走行距離の低下である。

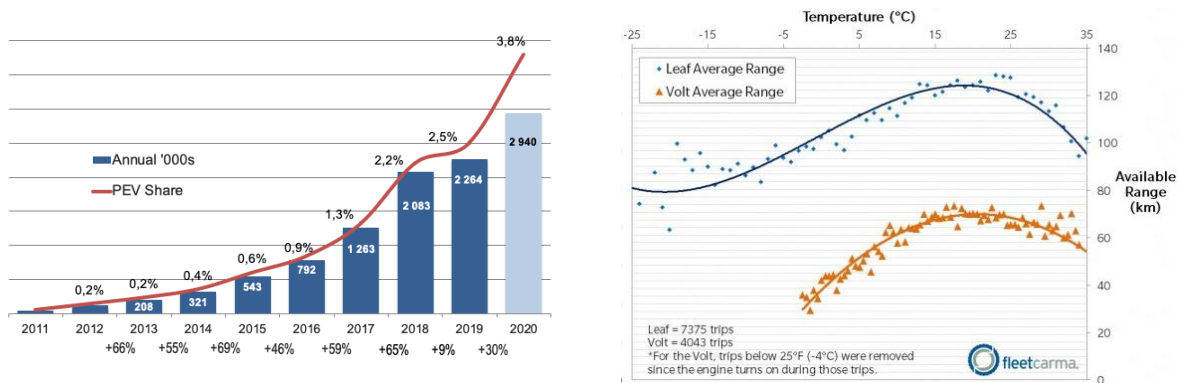


Fig.1 Global BEV&PHEV sales(Left) and EV mileage by ambient temperature(Right)

これは従来内燃機関車ではエンジンでの燃焼から生じた廃熱を用いてキャビンの温調を行ったことに比べて、電気自動車の場合は電気ヒータを用いてキャビンの温調を行うことに起因することである。そのため、特に冬期での走行距離が著しい。それに電気エネルギーを蓄えるバッテリーの場合、性能及び耐久・安全性の観点から冬期の低い気温では電気ヒータを用いて凡そ 0~10°Cまでに加熱する必要があるため、更に走行距離は減少することになる。このような現状において外気の空気から熱を奪って COP1 以上を持ちながら車両に暖房・加熱として供給できる省エネ技術であるヒートポンプが冬期における電気自動車の走行距離改善に期待されている。しかし、ヒートポンプにおいて外気温の低い冬期には外部の熱交換器に着霜が起これ、暖房能力と COP の低下及び霜取り運転時に電気ヒータを用いることによる熱管理システム効率の低下などが弱点である。<sup>(3)</sup>従来先行研究として着霜を防げるように外部の空気と直接熱交換せず、パワートレインからの廃熱を用いるようなサイクルの提案もされてきたが、従来のサイクルより構成部品が増え、複雑性が増すなど、車両における装備として

の必要な重量と装着空間に不利で、制御の複雑性がますますなる。その他、<sup>(4)</sup>PCM(Phase Change Material)を用いた先行研究としてはバッテリーの周りに PCM を用いて温度変化の少ないかつ温調に必要な熱源を保てるように提案された。しかし、逆に冷却もしくは加熱においてはバッテリーのみではなく周りの PCM にまで加熱や冷却の必要なことになり、別途そのために構造が必要になり、装着空間と重量として不利である。<sup>(5)</sup>他の先行研究として PCM を用いて 33 kgの重さを持つ熱電池に関する研究が行われた。車両の熱負荷の大きな最初の温調起動領域を PCM からの蓄えておいた熱源を用いるようにしている。しかし、PCM の蓄熱してから断熱が必要なことや蓄熱に必要な熱源の確保とその蓄熱時間と 33kg の重さが車両に適用するためには解決が必要であると考えられる。冬期において電気自動車にヒートポンプを適用するのにあたり、着霜による暖房能力低下及び霜取り運転でのヒータ使用を減らすことを目的として本研究では PCM を用いた熱電池モジュールを組み込んだヒートポンプサイクルを提案し、その車両レベルでの熱管理モデルを構築することにより、熱電池を用いた効果の有効性の分析を行うことにする。

## 2. PCMモジュールの構造及び実験評価

本研究で考案したPCMモジュールの構造に関して、図2に示すようにその放熱特性を明らかにするためにテストセクションを製作し、実験を行った。

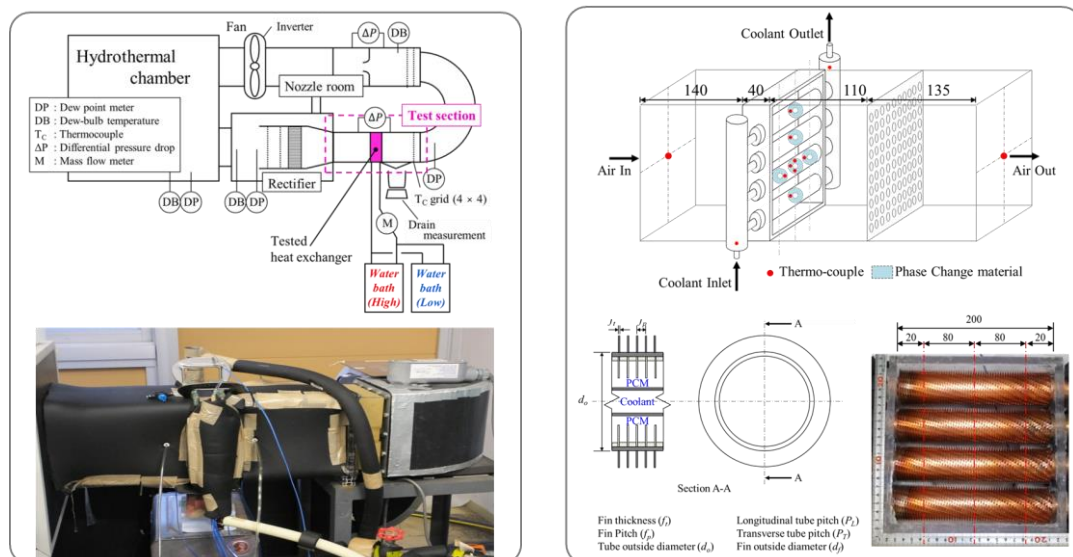


Fig.2 Schematic diagram and picture of test equipment(Left) and test section(Right)

一般的にPCMは熱伝導が低いため、熱時間が長くなり高い熱容量を持っても有効的な活用が難しい。本研究では、図3に示すようにPCM( $C_{20}H_{42}$ )のある内部空間にフィンを設けた構造を提案し、Fluentを用いて解析より放熱時間短縮について明らかにした。また、テストセクションを用いた実験結果からPCMモジュールの放熱性能及び特性をモデル化し、ヒートポンプサイクルを有する車両レベルでの熱管理シミュレーションにPCMモジュール有り無しの有効性の分析に用いるようにした。

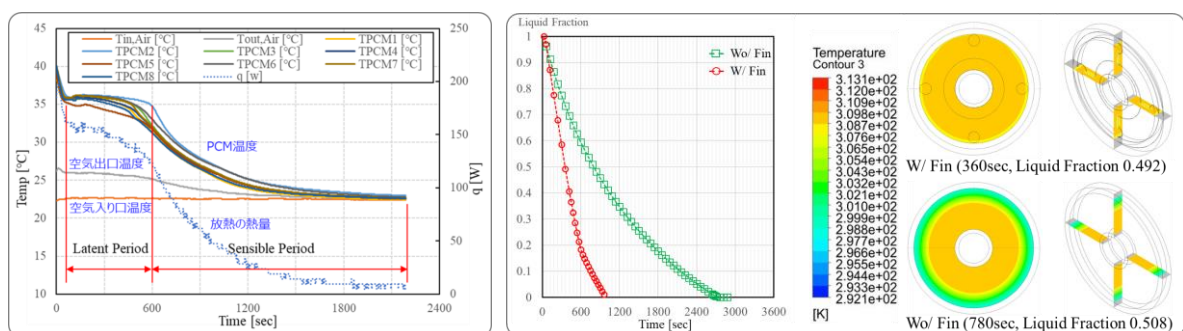


Fig.3 Test result of air22°C/2.4CMM(Left) and CAE results for effect of internal fin(Right)

### 3. 熱負荷計算モデル及び冬期における熱管理シミュレーション

車両の温調に必要な暖房量を定めるためには環境条件及び運転条件によるキャビンとバッテリーの熱負荷を定めることが重要である。そのため、本研究では式 (1) のようなキャビンへの熱負荷と式 (2) のような運転条件によるバッテリーの発熱量とそれによるバッテリーの温度を考慮したバッテリーへの熱負荷をそれぞれ求めるようにした。それぞれの負荷において設定した目標温度に温調できるように  $Q_{AC}$  と  $Q_{AC,bat}$  とした空調及び温調負荷が必要になる。

$$L_{Cabin} = Q_{Met} + Q_{Dir} + Q_{Dif} + Q_{Ref} + Q_{Amb} + Q_{Ven} + Q_{AC} \quad \dots \text{式(1)}$$

$$L_{Battery} = Q_{Gen} + Q_{Ref} + Q_{Amb} + Q_{Cond} + Q_{AC,bat} \quad \dots \text{式(2)}$$

( $Q_{Met}$ :代謝負荷,  $Q_{Dir}$ ,  $Q_{Dif}$ ,  $Q_{Ref}$ :日射による負荷,  $Q_{Amb}$ :大気負荷,  $Q_{Ven}$ :喚起負荷,  $Q_{Gen}$ :バッテリー発熱,  $Q_{Cond}$ :伝導負荷)

また、車両における熱管理シミュレーションでは図4に示すようにヒートポンプの暖房能力を計算しヒートポンプで賄えきれない熱負荷においてはPTCヒータやバッテリーヒータで賄うようなシミュレーションを構築し、ヒートポンプの霜取り運転時にはPCMモジュールから予め蓄熱しておいたPCMから放熱をさせることより霜取り運転時のヒートポンプサイクルの弱点である電気ヒータの使用を減少するようなサイクルを提案した。ある環境条件及び運転条件での車両レベルでの熱管理観点からのシミュレーション結果は図5のように示すことができる。

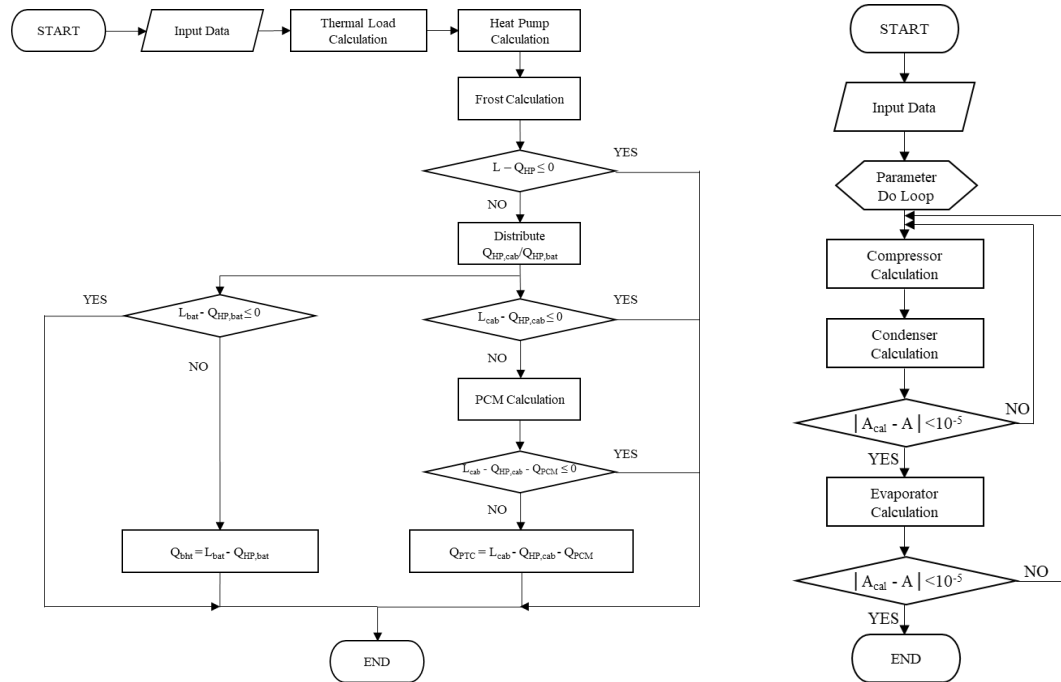


Fig.4 Flow chart for thermal management simulation(Left) and heat pump calculation(Right)

### 4. 結論

本研究では、ヒートポンプもしくはバッテリーからの廃熱について有効的に水を介して蓄熱しておいてキャビンの空気を効率よく温められるようにPCM空間の内側にフィンを設けた重さ8kgの熱電池構造を提案している。そして、その熱電池構造のテストセクションを製作し、実験を行い、蓄熱及び放熱におけるPCMモジュールの実力値として性能と挙動特性を明らかにした。また、その結果を持って車両レベルへの熱管理シミュレーションとして有効性の検討のできるように空気と水の流量・温度をパラメータとして予測できるようにモデル化を行った。その後、様々な環境条件と運転条件において車両レベルのキャビンとバッテリーの熱負荷を求められるように計算モデルを構築し、それに基づいて着霜時、本研究で考案したPCMモジュールを用いた場合の熱管理戦略及びその有効性の分析を行った。その結果、本研究で定めた環境条件と運転条件では従来のPCMモジュールの無いヒートポンプシステムでは0.9℃朝10時のように日射と気候条件で熱負荷の最も小さい条件では空調のための電気エ

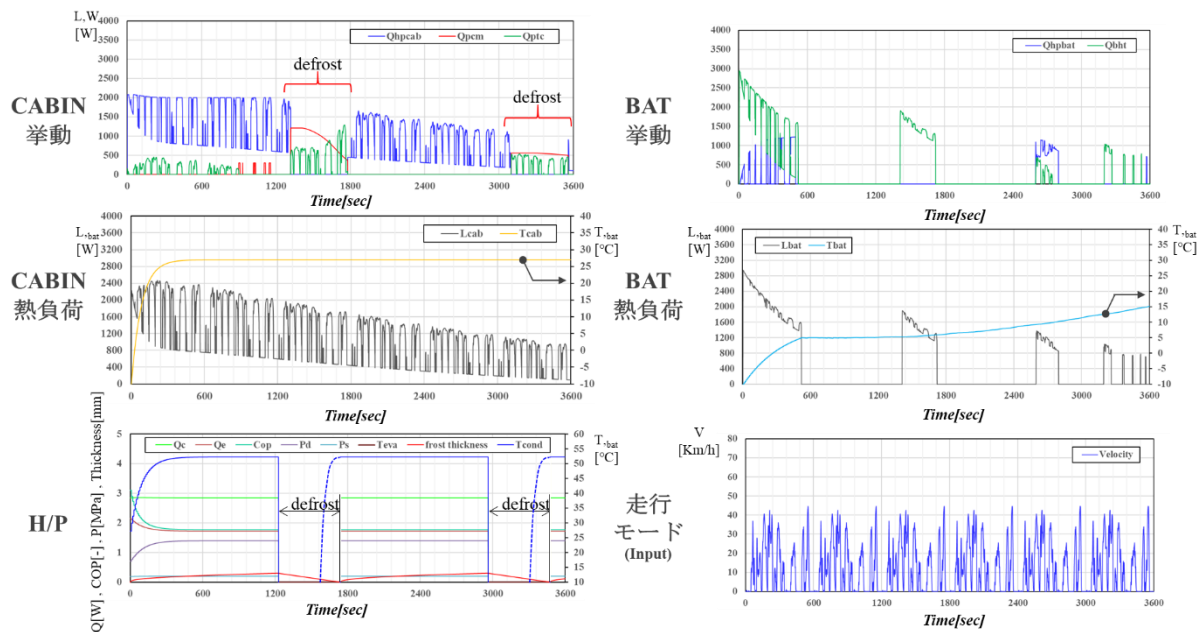


Fig.5 Thermal management behavior of cabin(Left) and battery(Right) on -10°C/RH50%/am7:30/NY City Mode

エネルギーは主にヒートポンプで賄えたことが分かった。更に、0.9°Cであっても日射の不十分である朝 7 時 30 分の場合と外気温-10°Cの熱負荷の大きな条件では、最大でヒートポンプの電気エネルギー 55.3%、PTC ヒータの電気エネルギー44.7%まで PTC ヒータの消費電力が増大し、悪化した。ここで、本研究で提案する PCM モジュールを用いた結果では 0.9°Cの気候条件では空調のための電気エネルギーは主にヒートポンプで賄えられ、-10°Cの気候条件であっても、日射条件 10 時の条件でも主にヒートポンプで賄えられる結果となった。更に、-10°Cの日射の不十分である朝 7 時 30 分の熱負荷の最も大きい場合のみ、ヒートポンプは 73.1%と PTC ヒータは 26.3%の電気エネルギー使用量の割合を示し、従来より PTC ヒータの使用量が減少した結果を示した。その結果、特に、外気温 0.9°C、朝 7 時 30 分、New York City Cycle モードの場合、従来の電気ヒータのみの場合と比べてヒートポンプと PTC ヒータを用いることで 25.6%も消費電力が減少する結果を示したが、更に、本研究で提案した PCM モジュールを搭載すると従来の電気ヒータのみの場合に比べ、35.3%も PTC ヒータの使用量が減少し、ヒートポンプと PTC ヒータを用いた場合と比べても更に 9.7%の PTC ヒータの電気エネルギーの使用量の節約になっていることが期待できる。本研究の結果を用いて、今後の future work として PCM 相変化温度の高い材料の適用のできるような工夫と PCM モジュールの軽量化及びバッテリーバックからの廃熱の回収及び更に連携した総合熱管理手法の提案で更に省エネが期待できる。

(文献)

- (1) Source : EV Volumes, <https://wattev2buy.com/global-ev-sales/>
- (2) Source : FleetCarma on Nissan Leaf and Chevrolet Volt battery range variation with temperature
- (3) "Development of waste thermal energy recovery heat pump", H. Ohno, J. Hatakeyama, M. Nagata, T. Maeda
- (4) "Thermal management of batteries in advanced vehicles using Phase-Change Materials", Gi-Heon Kim, Jeff Gonder, Jason Lustbader, Ahmad Pesaran, Sustainability-the future of transportation EVS23, Anaheim, California USA(2007)
- (5) "Design and testing of a thermal storage system for electric vehicle cabin heating", M. Wang, E. Wolfe, T. Craig, T.J. LaClair, Z. Gao, O. Abdelaziz(2016)