

PHEV/BEV 用高効率ヒートポンプシステム*

Efficient Heat Pump System for PHEV/BEV

小林 寛幸

Hiroyuki KOBAYASHI

As vehicle emission regulations become increasingly rigorous, the automotive industry is accelerating the development of electrified vehicle platforms such as Battery Electric Vehicles (BEV) and Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEV). Since the available waste heat from these vehicles is limited, additional heat sources such as electric heaters are needed for cabin heating operation. Use of a heat pump is a solution to improve EV driving range at cold ambient. In this study, an efficient heat pump system has been developed, which achieves high cabin heating performance at low ambient temperature and dehumidification operation without the assistance of electric heaters.

Key words :

Electrified vehicles, Fuel economy, Power saving, Heat pump

まえがき

近年の環境規制強化に伴い、プラグインハイブリッド車や電気自動車などの電動車の開発、市場導入が加速している。これらの車両はエンジン廃熱が無く、暖房熱源として効率の良いヒートポンプシステムの採用が進み始めているが、カーエアコンとしての必要機能を達成するためには補助熱源として電気ヒータの併用が一般的である。しかし、補助熱源として電気ヒータを使うことで航続距離が大幅に低下するため、効率のよいヒートポンプサイクルの機能向上により電気ヒータに頼らない技術開発が車両メーカーの期待であった。今回開発したヒートポンプシステムは低温時の暖房能力向上技術であるガスインジェクションサイクルと中間期のリヒート機能を向上する2系統除湿サイクルを搭載し、従来技術である電気ヒータに対し、約60%

の省電力効果があり、これにより約20%のEV航続距離を向上することができる。

1. 背景

近年の環境規制強化に伴い、自動車業界ではプラグインハイブリッド車(PHEV)や電気自動車(BEV)などの環境対応車の開発が加速している。これらの車両ではエンジン廃熱が無く、暖房するための熱創出技術が必要となる。特に冬季の暖房エネルギーは、車の全消費エネルギーの50%以上になる場合もあり、実走行距離が大きく低下する。Fig. 1に示すように空調の消費電力がEV航続距離に大きな影響を与えることが知られている¹⁾。したがって、省電力な空調システムが必要とされており、効率の良い熱創出技術としてヒートポンプシステムが注目されている。ヒートポンプシス

* (公社)自動車技術会の了解を得て、「2017年春季大会学術講演会前刷集」No.91, 434より一部加筆して転載

テムはコンプレッサ動力に加えて外気から吸熱した熱量も暖房に使用出来るため効率良い熱創出技術として注目されている (Fig. 2).

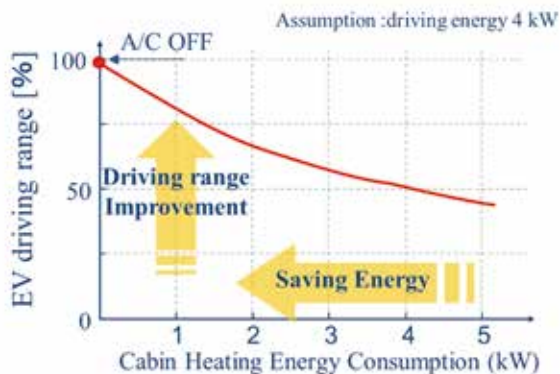


Fig. 1 Impact of air conditioner energy consumption on EV cruising range

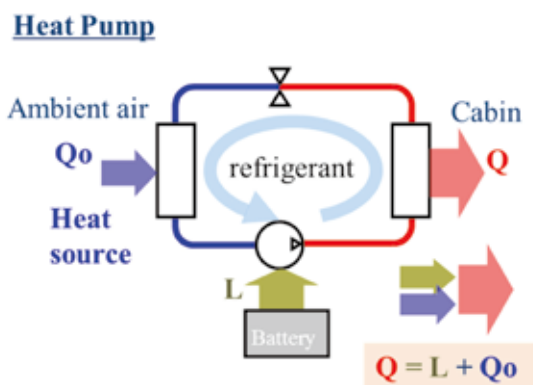


Fig. 2 Energy consumption reduction technologies for air conditioner

2. 環境対応車用の空調システムに求められる機能

車両用空調システムにおいて、中間期（春秋）の快適性の確保と低外気温度での防曇性の確保のために車室内の湿度をコントロールすることが必要である。その手段は、吸込空気をエバポレータで露点以下に冷却し除湿する。除湿するために冷却された空気を車室内に吹き出す時には、温熱感が最適となる温度まで再加熱（リヒート）する。そのためこの冷却量と再加熱量のコントロールが必要となる。また0℃以下のような低外気温度では車外の空気を取り込む（換気）ことで車室内の湿度を調整する。車外の低温の空気を車室内に取り込むため大きな暖房能力が必要となる。内燃機

関の車両では暖房熱源としてエンジン廃熱を使用しているが、環境対応車においてはエンジン廃熱が利用出来ないため、前述のリヒート方式での温熱感の最適化や低外気環境下での大能力暖房を空調システムで達成する必要がある。

2.1 低温大能力技術

外気温度0℃以下のような低温環境化では、吸入冷媒の密度が低下することにより冷媒の質量流量が低下する。その結果、室外熱交換器での吸熱量やコンプレッサでの仕事量が低下し暖房能力が低下する。それに対応する技術としてガスインジェクション暖房サイクルがある。ガスインジェクション暖房サイクルは高圧の冷媒を2段階に膨張させ、その中間圧で気液分離してガス冷媒をコンプレッサへ戻す（インジェクションする）サイクルである。室外器にて吸熱に寄与しないガス冷媒を中間圧からコンプレッサに戻し、液冷媒を蒸発器へ流すことで室外器での吸熱量が増大する。また密度の大きいガス冷媒をコンプレッサへインジェクションすることにより冷媒流量が増加し、暖房能力が増加する。Fig. 3に一般的な暖房サイクルとガスインジェクション暖房サイクルのモリエル線図を示す。

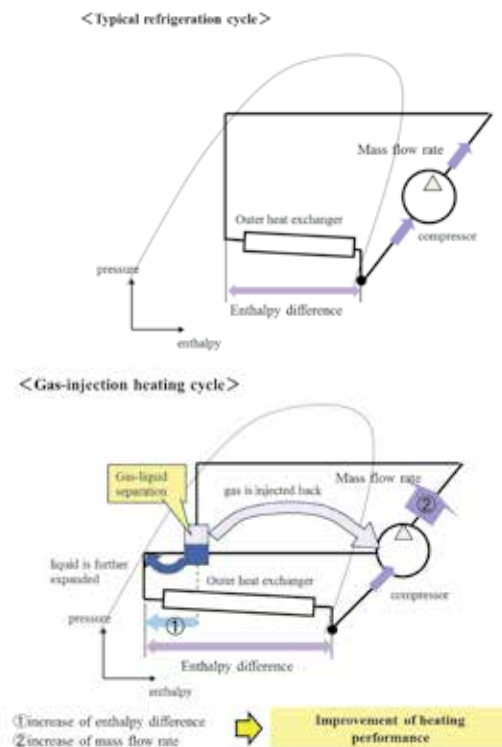


Fig. 3 P-h diagram of typical and gas Gas-injection heating cycle

本システムにおいてはガスインジェクションサイクルにおける気液分離機能と2段階目の絞り機能，流路切替え機構を備えた統合弁を用いることで，ガスインジェクションサイクルを簡素なサイクル構成で達成している。

Fig. 4 に統合弁の概略図を示す。気液分離方式として遠心分離方式を用いて，液だめ部を設けないことで小型化を実現している。ガスインジェクションサイクル時には，室内コンデンサを出て膨張弁で減圧された冷媒は統合弁に入ると遠心分離され，ガス冷媒は上部からコンプレッサへインジェクションされる。液冷媒は下方にある固定絞りを通してさらに減圧されたのち室外熱交換器へ流れる。ガスインジェクションサイクル以外のサイクルでは統合弁へ入った冷媒はすべて下方へ流れ，固定絞りをバイパスして室外器へ流れる。このようにサイクルに応じて統合弁の上部のガスをインジェクションするための流路開閉弁と統合弁の下部の絞りをバイパスするための開閉弁の2つの弁をコントロールする必要があるが，上部の弁は固定絞りの差圧を利用して駆動する差圧弁とすることにより1つのアクチュエータで2つの流路を切り替えることが可能となっている。

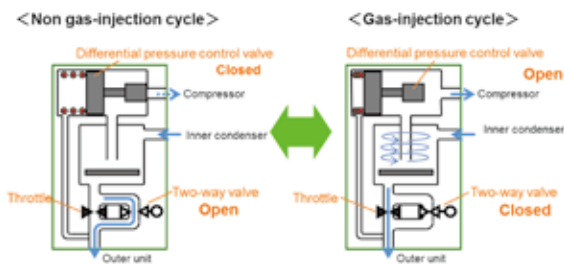


Fig. 4 Compact gas-liquid separator

2.2 リヒート技術

エンジン廃熱を利用できるカーエアコンにおいて，除湿のための冷却量は冷凍サイクルのコンプレッサ回転数でコントロールして，温熱感を最適にするためのリヒート量はヒータコア風上エアミックスドアでコントロールして，余った熱はラジエータから室外に放熱する。一方，ヒートポンプエアコンにおいては，冷却量を冷凍サイクルのコンプレッサ回転数でコントロールした場合，リヒート量は冷凍サイクルの原理上，

冷却量と動力で一義的に決まってしまう。ここで，リヒート量を調整するためには，室外器に能力調整機能を持たせることがキー技術となることが知られている²⁾ (Fig. 5)。

リヒート量が小さい場合には，Fig. 6 に示すように室外熱交換器の温度（圧力）を外気よりも高くすることで室外熱交換器を放熱器として作動させる。その反対にリヒート量が大きい場合にはFig. 7 に示すように室外熱交換器の温度（圧力）を外気よりも低くすることによって室外熱交換器を吸熱器として作動させる。

Car type	Conventional Available	BEV None
Waste heat	Available $Q_2 = Q_1 - Q_3$	None $Q_c = L + Q_e \pm Q_3$
System		
Dehum.	Refrigerant cycle (mass flow control by Comp.)	---
Reheat	Coolant circuit (Radiation control by A/M door)	Refrigerant cycle (Outer HE Performance Q_3)

Fig. 5 Capacity control of dehumidifying heating

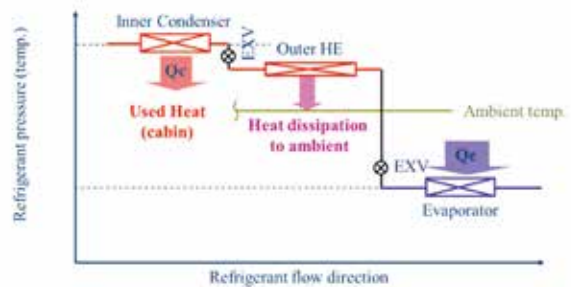


Fig. 6 Pressure operation of outer HE in low heating performance

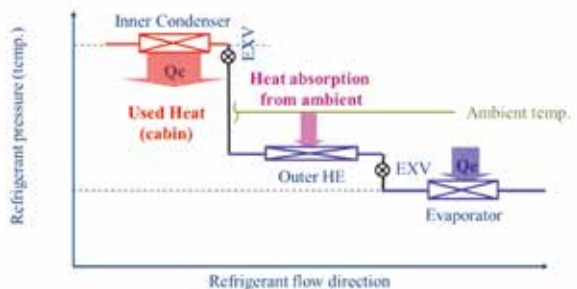


Fig. 7 Pressure operation of outer HE in high heating performance

空調・熱マネ

さらに大きなヒート量が必要な場合には室外器熱交換器の温度をさらに下げて、室外熱交換器での吸熱量を大きくする必要がある。しかしながら、エバポレータを凍結させないために0℃以上にコントロールする必要があるためエバポレータの上流にある室外器も0℃以下にはコントロール出来ない。そのため、本システムでは Fig. 8 に示すように室外熱交換器とエバポレータを並列に配置することで室外熱交換器の温度（圧力）をより低くすることが可能となる。またエバポレータの下流にエバポレータ圧力を一定圧でコントロールする定圧弁を配置し、エバポレータの温度（圧力）を凍結しない温度で保持したまま、室外熱交換器の温度（圧力）だけを低減することで室外器での吸熱量を増大することができ、より大きなヒート量を得る事ができる。

これまで述べたように本システムでは室外熱交換器とエバポレータを直列、並列に配置した2つのサイクルモードを使用して室外熱交換器の圧力を調整することで広範囲の外気温度に対応できるヒート機能を達成している (Fig. 9)。

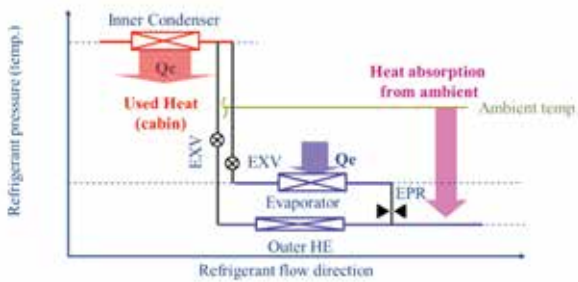


Fig. 8 Pressure operation of outer HE in very high heating performance

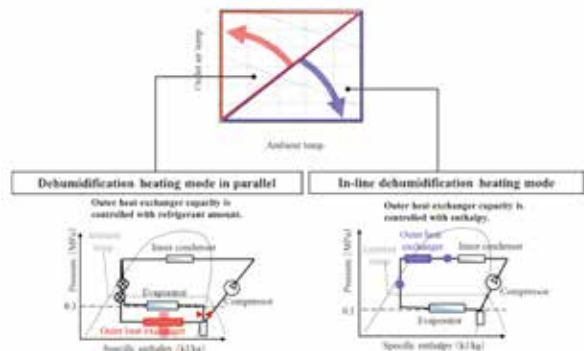


Fig. 9 Cycle control of dehumidification heating mode

3. システム構成

Fig. 10 に今回開発したヒートポンプシステムの構成を示す。

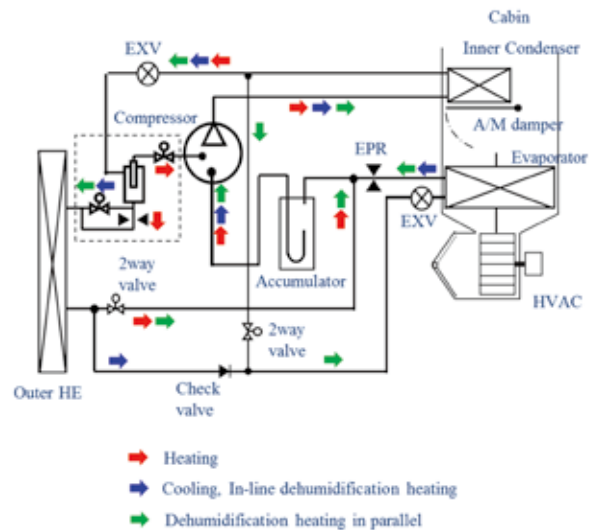


Fig. 10 System Configuration

4. 実験結果

4.1 暖房能力

Fig. 11¹⁾ にガスインジェクション暖房サイクルによる暖房能力向上効果 (ベンチ試験結果) を示す。ノーマル暖房サイクルに対して26%の暖房能力向上効果が確認できた。Fig. 12¹⁾ にガスインジェクション暖房サイクルと電気ヒータ (効率1.0を仮定) の消費電力の比較 (ベンチ試験結果) を示す。電気ヒータと比較して63%の消費電力低減効果が確認できた。

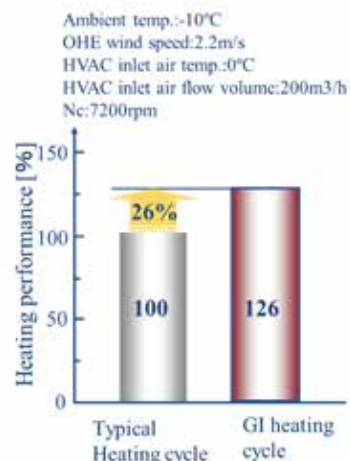


Fig. 11 Heating performance of Gas-injection heating

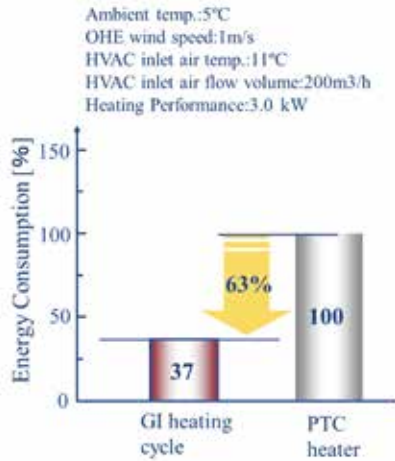


Fig. 12 Energy consumption of Gas-injection heating

4.2 リヒート運転の温度コントロール性

Fig. 13 に室外器とエバポレータを直列に配置した直列除湿暖房時の温度コントロール性を確認したベンチ試験結果を示す。室外熱交換器の圧力をコントロールすることで熱交換量を調整し、エバポレータの温度と吹出空気温度をそれぞれ制御可能である。結果として、エバポレータ後空気温度を10℃に保持しながら吹出温度を10℃～50℃にまで制御可能であることが確認出来た。

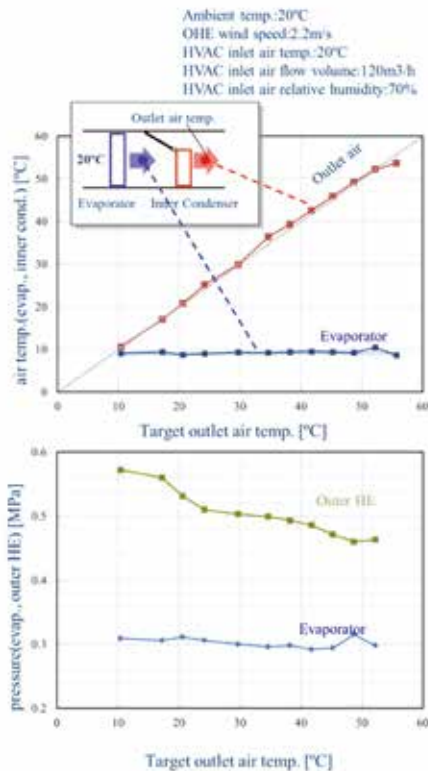


Fig. 13 Outlet air temperature control with in-line dehumidification heating mode

Fig. 14 に室外器とエバポレータを並列に配置した並列除湿暖房時の温度コントロール性を確認したベンチ試験結果を示す。コンプレッサ回転数増加に伴い、EPRによりエバポレータ蒸発圧力は一定に保たれたまま室外器の蒸発圧力のみが低下する。これによりエバポレータ吸熱量（除湿能力）は一定に制御されたまま室外器吸熱量が増加している。その結果、エバポレータ後空気温度を1℃に保持しながら吹出温度を30℃～60℃まで制御できることを確認できた。また Fig. 15 に示すように吹出温度45℃での消費電力は電気ヒータ+冷房サイクルの場合と比較すると60%低減する。

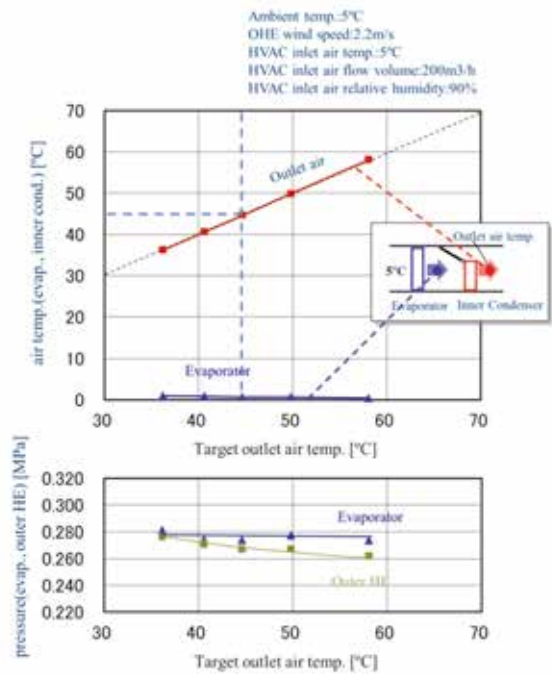


Fig. 14 Outlet air temperature control and energy consumption with dehumidification heating mode in parallel

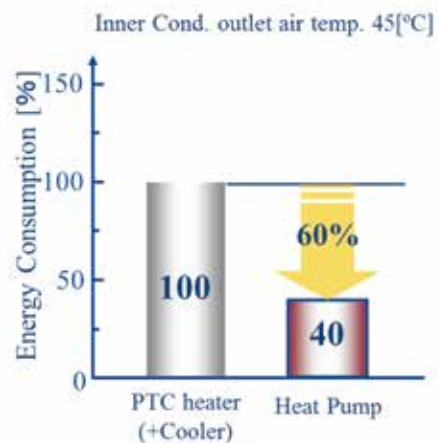


Fig. 15 Energy consumption of dehumidification heating mode in parallel

4.3 EV 航続距離への効果

Fig. 16 にヒートポンプシステムと電気ヒータとのEV航続距離の比較を示す。これは Fig. 12 と Fig. 15 のベンチ試験結果を用いて Fig. 1 に示すEV航続距離への影響を見積もったものである。

暖房運転時については、外気温度5℃条件において63%の電力低減効果が、除湿暖房運転時には61%の電力低減効果が確認できた。これを車両のEV航続距離に換算すると Fig. 16 に示すようにそれぞれ21%航続距離が増加する。

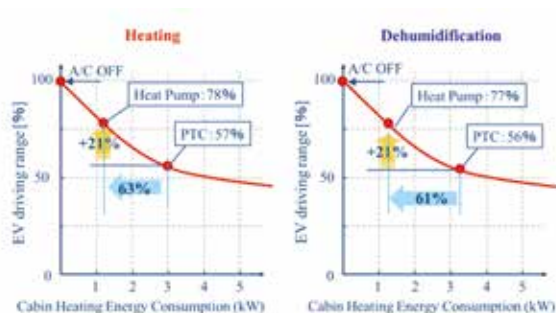


Fig. 16 Impact of heat pump system on EV driving range

5. おわりに

- ・PHEV, BEVのEV航続距離向上のために空調システムの省電力化が必要で、ヒートポンプシステムが有効な熱創出技術として期待できる。
- ・車両用空調システムでヒートポンプのうれしさを出すためには、低温大能力技術と広範囲の外気温度に対応できるリヒート技術の開発が必要。
- ・低温大能力技術は、ガスインジェクションサイクルを気液分離機能統合弁を開発することで簡素に達成。
- ・広範囲の外気温度に対応できるリヒート技術は、室外器とエバポレータを直列、並列に配置し、室外器に能力調整機能を持たせることで達成。
- ・今後も省電力技術を適用し、地球環境に貢献していきたい。

参考文献

- 1) Y. Higuchi, H. Kobayashi, Z. Shan, M. Kuwahara, Y. Endo and Y. Nakajima : "Efficient Heat Pump System for PHEV/BEV" , SAE Technical papers, 2017-01-0188
- 2) Hagiwara, Y., Ito, K., Sakai, M. and Ioi, N., Feature and trend of an air-conditioning system for Electric Vehicles, Dec. 2011, DENSO Technical Review vol.16, pp. 83-89

著者



小林 寛幸

こばやし ひろゆき

サーマルシステム開発部

ヒートポンプシステムの開発に従事