

特集 エジェクタ式クール BOX システム*

Ejector-type Cool Box System

五丁美歌

Mika GOCHO

山中康司

Yasushi YAMANAKA

押谷洋

Hiroshi OSHITANI

高野義昭

Yoshiaki TAKANO

武内裕嗣

Hirotsugu TAKEUCHI

This research paper describes a new automotive Ejector-type cool box system for cooling beverages especially when driving in hot regions. The ejector is an energy conservation technology/system and can be applied to almost all the equipment using the vapor compression refrigeration cycle. It effectively uses energy that is lost during the expansion process of the conventional cycle. Accordingly, we addressed development of an ejector-type cool box that cools beverages using the refrigeration cycle of the vehicle air-conditioning system. The greatest challenge we faced was how to develop a compact yet efficient cool box system using the ejector refrigeration cycle. However, we were able to realize a new cool box system that operates simultaneously with the cabin air-conditioning/refrigeration system, even under continuous operation, by developing a dual temperature cooling system using the pressure rising action of the ejector cycle. Consequently, significant performance improvements have been achieved for the whole vehicle refrigeration system.

Key words: Refrigeration cycle , Ejector, Air conditioner, Cool box

1. 序論

近年、地球環境保護の観点から、CO₂ 排出量削減、省エネルギー化のニーズは益々高まっている。我々自動車業界においても車の高効率化により CO₂ 排出量削減に取り組む中、車のエネルギーを消費するカーエアコンにおいても、サイクルを高効率化し省エネルギー化していくことが重要である。一方で、車両熱負荷の増大に対応し、乗員の快適性を維持するため、より一層の冷房性能向上が求められている状況もある。特に中近東に代表される酷暑地域では、冷房能力不足が顕在化しているが、コンプレッサや熱交換器等、機器の大型化という背反があり、車両によっては性能向上は困難な状況にある。今回我々は、主に酷暑地域で使用されるクール BOX システムの性能向上に取り組んだ。クール BOX は、カーエアコンの冷凍サイクルを利用して飲み物の冷却・保冷を行う車両用冷蔵庫であり、主に SUV や高級車に用いられている。とりわけ自動販売機やコンビニエンスストア等のない酷暑地域においては、車による移動時の利便性、快適性を維持する上での重要なアイテムとなっている。しかしクール BOX システムの難しさは、連続運転では一つの温度しか作り出せない冷凍サイクルを用いて、車室内の空調 (10 ~ 20 °C) とクール BOX 内の冷蔵 (5 °C 以下) の二つの温度を作り出すという点にある。空調と冷蔵の両立を図り、動力を増やすことなく大幅な性能向上を得るためには、従来の機能品の改良ではない新方式が求

められる。そこで我々は、従来膨張過程で失われていたエネルギーを有効利用することで冷凍サイクルを高効率化できる「エジェクタ」を用いて、連続運転しながら二つの温度帯を作り出すことで、この課題を解決した。また、カーエアコンに適したサイクル構成の開発、システム課題への対応を実施し、大幅な性能向上効果が得られるエジェクタ式クール BOX システムの実用化に成功したので報告する。

2. 従来のクール BOX 方式

クール BOX システムの特徴として、エアコン用、クール BOX 用の二つのエバポレータを持ち、一つのコンプ

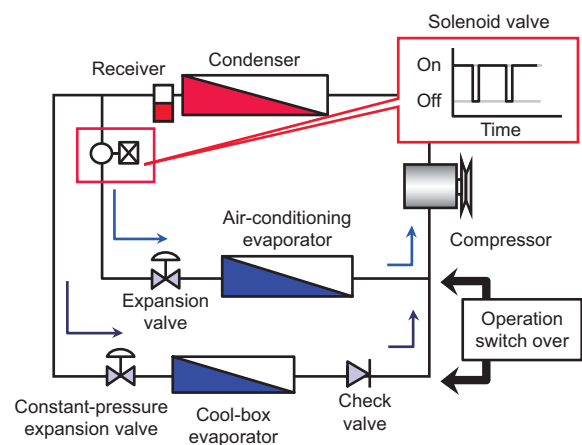


Fig. 1 FIR system

* 2010年7月30日 原稿受理

レッサで同時に異なる空間を冷却することが挙げられる。従来から用いられてきた方式として、FIR (Freezing by Intermittent Running) 方式がある。この方式では、エアコン用エバポレータの上流側に電磁弁を設置し、クールBOX 使用時には電磁弁を周期的に開閉させる制御を行っている (Fig. 1)。すなわちある時間に電磁弁が閉となると、低圧側回路に残った冷媒がコンプレッサに吸入されるとともに低圧が低下し、ある所定の低圧まで達した時にクールBOX 用エバポレータの上流に設置した定圧膨張弁が開き、クールBOX 側に低温の冷媒が送り込まれる。さらに所定の時間を経過すると再び電磁弁が開となりエアコン用エバポレータに冷媒が流れ出し、低圧の上昇により定圧膨張弁は閉じてクールBOX 側への冷媒供給は遮断される。この作動を周期的に繰り返すことで、空調・冷蔵の各エバポレータに適した異なる温度の冷媒を交互に供給している (Fig. 2)。

しかしながら FIR 方式では、切替に伴うエアコン側への冷媒供給の遮断により、空調性能がエアコン単独運転 (クールBOX 不使用時) に対し低下するとともに、吹出温度が変動し快適性を損なうことが課題となる。また、断続的に短時間でクールBOX を冷やす必要があるため低圧を大きく下げる必要があり、効率が低下する。そこで切替運転によるこれらの影響を排除するために、連続運転しながら同時に二つの温度を作り出す方式を考案した。すなわち、空調・冷蔵の各エバポレータ間に圧力を上昇させるポンプ機能を設け、クールBOX 側をエアコン側より低い圧力で運転することで、クールBOX を低い温度に保持することができる。このポンプとして、流体ポンプとして作動するエジェクタに着目し、クールBOX システムへの適用検討を行った。

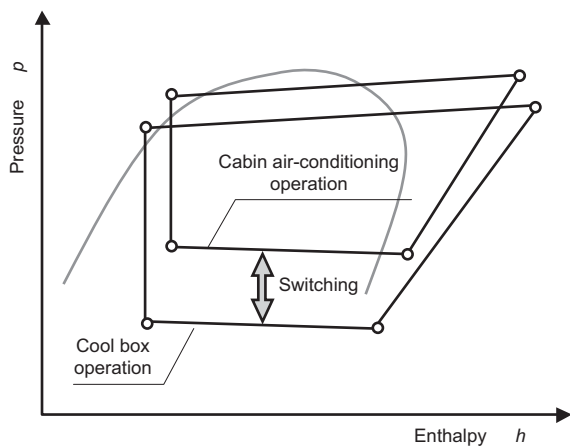


Fig. 2 P-h diagram of FIR system

3. エジェクタサイクルの概要

3.1 エジェクタ

エジェクタはノズル、混合部、ディフューザにより構成される (Fig. 3)。ノズルにおいて高温高压の冷媒を理想的に膨張 (等エントロピー膨張) させるとともに、圧力エネルギーを運動エネルギーに変換する。すなわち、従来の減圧過程では流れが乱れ渦が発生することで運動エネルギーは損失していたのに対し、エジェクタのノズルでは損失なく運動エネルギーに変換している。これにより速度が上昇したノズル出口の冷媒 (駆動流) は、圧力差により低圧側の冷媒 (吸引流) を吸引し、混合部にて駆動流と吸引流が混合する。その後さらにディフューザでの滑らかな断面積の拡大により徐々に減速し、運動エネルギーを圧力エネルギーに変換することでエジェクタ出口の圧力が上昇する。

従ってエジェクタは、減圧部品であるのみならず、駆動流が本来持っているエネルギーを利用して吸引流を昇圧させるポンプとして作用する機器であり、これによって二つの圧力帯を連続的に生み出すのに利用できる。

3.2 従来のエジェクタサイクル

エジェクタを用いた冷凍サイクル (以下、エジェクタサイクル) は、2003 年から輸送用冷凍機、家庭用 CO₂ 給湯機 (エコキュート) において当社が実用化している。サイクル構成を Fig. 4 に示す。先述したエジェクタの昇圧作用により、コンプレッサの入口圧力が従来より上昇し圧縮比が低減することで、コンプレッサの消費動力が低減し、冷凍サイクルを高効率化することができる。

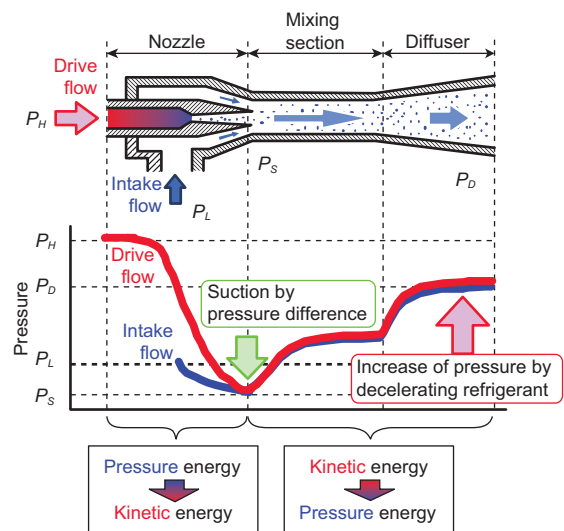


Fig. 3 Ejector operation principle

本サイクルの特徴は、エジェクタ下流に設置された気液分離器で冷媒を分岐する点である。コンデンサから流出した高圧の液冷媒は、流量調整弁およびエジェクタのノズルにて減圧され、気液二相の低压冷媒となる。低压冷媒はエジェクタを流出した後、気液分離器にてガス・液に分離され、ガスはコンプレッサに吸入、液はエバポレータに流入し蒸発したのちエジェクタに吸引される。従って気液分離器は、液冷媒を貯留することで「①負荷変動に対し冷媒量を調整する」機能と、二相冷媒をガス・液の二つに分岐することで「②液冷媒をエバポレータに供給しエジェクタの吸引流を作る」、「③コンプレッサへの液戻りを防止しガス冷媒を確実に供給する」という三つの機能を果たしている。

このように従来のエジェクタサイクルには、コンプレッサで駆動される高圧側の冷媒回路と、エジェクタで駆動される低压側の冷媒回路の二つの回路が存在しており、それらを分岐する気液分離器が重要な機能部品となっている。

4. 乗用車用エジェクタサイクルの開発

4.1 クールBOX へのエジェクタサイクル適用検討

エアコン用、クールBOX用それぞれにエバポレータを持ち、異なる二つの蒸発温度で運転するクールBOXシステムへのエジェクタサイクル適用を考える。従来のエジェクタサイクル (Fig. 4) は、エジェクタ吸引側にエバポレータを一つ有しているが、このエバポレータと異なる蒸発温度を同時に得るには、エジェクタ出口側にもエバポレータを設置すればよい。すなわち、気液二相状態における冷媒の温度は圧力に応じて変化することを考慮すると、二つの圧力を同時に形成できるエジェクタの昇圧作用が応用できる。つまりエジェクタ出口側にエアコン用エバポレータを設置し、吸引側にクールBOX用エバポレータを設置する構成 (Fig. 5) により、空調・冷蔵に適した二つの蒸発温度を同時に作り出すことができる。

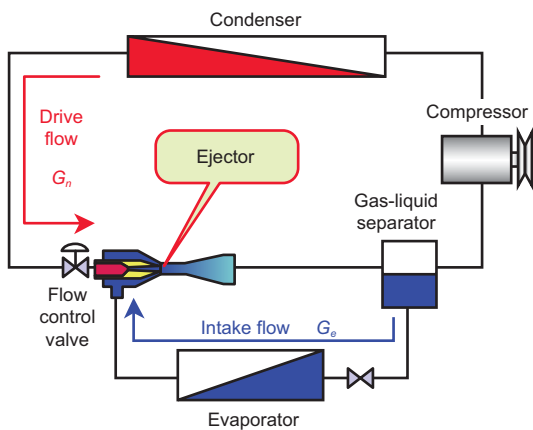


Fig. 4 Conventional ejector cycle

4.2 乗用車への適用課題

しかし一方で、このサイクルを乗用車用として実用するには大きな課題があった。一般にカーエアコンにおいては、前述の気液分離器の「①負荷変動に対し冷媒量を調整する」という機能は、サブクール (過冷却) 型コンデンサに一体化されたレシーバが担っている。Fig. 5 のエジェクタサイクルを適用するには、コンデンサの変更と気液分離器の新規搭載が必要となり、従来に対し大幅な変更となる。さらに、例えば冷凍機で用いられてきた気液分離器は、高さ約 300 mm と大型の部品である。カーエアコンにおいては車室内空間をより広くし乗員の居住快適性を向上させるニーズが高まる中、各部品の搭載スペースは限られたものとなっており、エアコンシステムの構成を大きく変更し、気液分離器の搭載場所を新規で確保することは困難である。そこで今回、これらの課題を解決するため、気液分離器を必要とせず、従来のカーエアコンからの変化点が少ないエジェクタサイクルを新たに開発した。

4.3 新エジェクタサイクル (エジェクタ式クールBOX)

新たに開発したエジェクタサイクルの構成を Fig. 6 に示す。考え方として、先述の気液分離器の機能のうち「①負荷変動に対し冷媒量を調整する」機能と、「②エジェクタの吸引流を作る」機能を低压側から高压側に移設する。すなわち、新サイクルにおける①の機能は、サブクール型コンデンサに一体化されたレシーバに持たせており、従来のエジェクタサイクルで用いていた気液分離器を廃止している。また、②の対応として、気液分離器からではなくエジェクタ上流側で冷媒を分岐し吸引流を形成している。さらに、エジェクタ出口に設置されたエアコン用エバポレータにより液冷媒を蒸発し、「③ガス冷媒をコンプレッサに供給する」機能が果たせる構成としている。

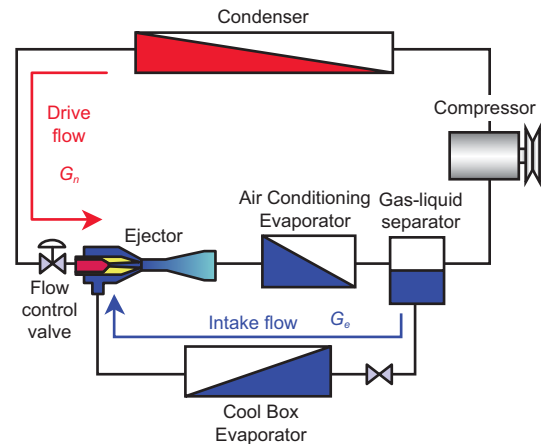


Fig. 5 Ejector cycle for cool box

冷媒の流れは次のようになる。コンデンサから流出した高圧の液冷媒は、エジェクタの駆動側と吸引側の二つに分岐され、それぞれ低圧に減圧されたのち各エバポレータに流入する。クールBOX用エバポレータで蒸発した冷媒（吸引流）はエジェクタに吸引され、エジェクタのノズルで減圧した冷媒（駆動流）は吸引流と合流し昇圧したのちエアコン用エバポレータで蒸発する。なおクールBOX不使用時のエアコン単独運転へ対応するため、クールBOX上流には電磁弁を設置し、ユーザのクールBOXスイッチ動作に連動させている。この際、製品構成としては固定絞りと一体となった電磁弁（固定絞り付電磁弁）を用いることでシステムを簡素化している。

本サイクルの作動を示す $P-h$ 線図を Fig. 7 に示す。図中の1～9は、Fig. 6の冷媒回路上に示した数字に対応している。コンデンサ出口の高圧冷媒は、エジェクタ（ノズル）にて減圧膨張（3→4）される。その際に生じる膨張損失エネルギー Δh を利用して、クールBOX出口から冷媒を吸引する（9→5）とともに圧力差 Δp に変換している（5→6）。すなわち、従来の減圧過程では流れが乱れ渦が発生することでエントロピーは保たれず等エンタルピー膨張となっていたのに対し、エジェクタのノズルでは等エントロピー膨張となるため、その差分のエントルピー（ Δh ）を入力エネルギーとして昇圧作用（ Δp ）を生み出している。この昇圧作用により、クールBOX用エバポレータの蒸発圧力（8→9）をエアコン用（6→7）よりも低い圧力で運転し、連続的に二つの温度を作り出すことで、空調と冷蔵を両立することができる。

本方式による主な効果を挙げると、以下の点となる。

- ① エジェクタによる膨張損失エネルギー回収による冷凍サイクル高効率化

- ② エジェクタ昇圧作用により二つの温度を連続的に作り出し、空調・冷蔵の性能両立
- ③ 切替運転から連続運転への変更による吹出温度変動防止、快適性向上

5. 開発上の主要課題

エジェクタ式クールBOXシステムの以下(1)～(3)に示す開発上の主要課題に対し、我々は数値解析および実験検討にて、その実用的な対応手段を決定した。

(1) エジェクタ高効率化

冷凍サイクルにエジェクタを用いる場合、その流れは二相流であり、一般に単相流に対し効率が低下する。その原因として気液の密度差が挙げられる。特にカーエアコンで使用している冷媒（R134a）は、気液密度差が非常に大きく、例えば0℃条件において、液はガスの約90倍の密度となる。このためノズルにおいては、液滴はガスに比べて重い分加速しにくく、逆に混合部・デフューザにおいては液滴の慣性力により減速しにくい。そこで密度比の影響を少なくするため、液滴を微粒化する手段に着眼し、二段膨張ノズルを採用した。一段目の絞りによって気泡核を生成させ、二段目の絞りでの沸騰を促進できる構造とすることで、壁面近傍のみでなく中心部からも沸騰するため液滴を微細化でき、単相流並の効率を達成している（Fig. 8）。

(2) 負荷変動対応

内外気温度の変化、コンプレッサ回転数の変動を常に伴うカーエアコンへのエジェクタ適用にあたっては、冷媒流量調整、能力制御手段が必要である。そこで、使用範囲全域に対応できるエジェクタの制御手段を検討し、Fig. 9の構成を採用した。すなわち、ノズル一段目は可変絞りとすることで、気泡核の生成に加え流量調整機能を持たせ、二

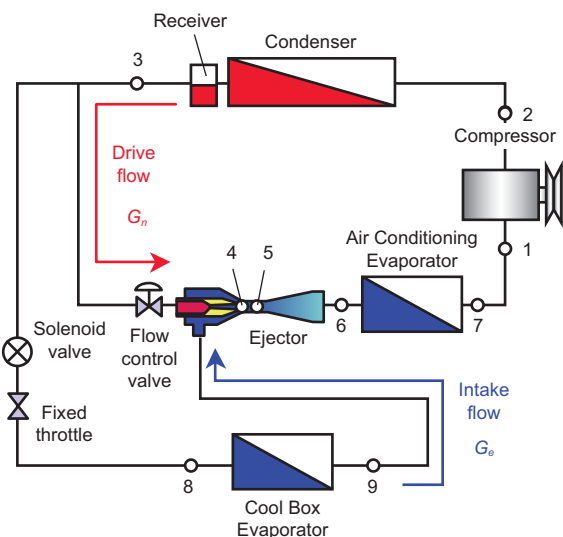


Fig. 6 New ejector cycle for ejector-type cool box

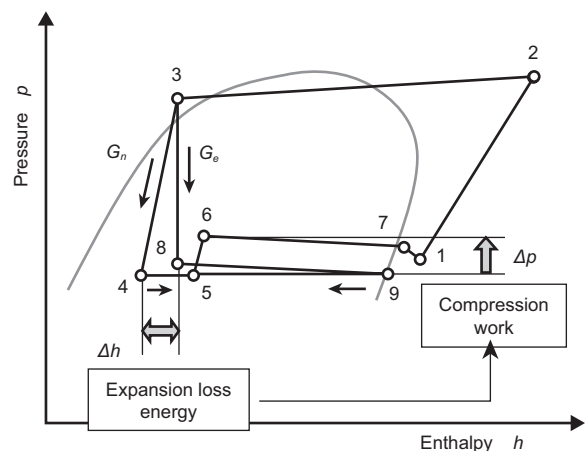


Fig. 7 $P-h$ diagram of ejector-type cool box system

段目は固定絞りにて膨張損失エネルギーの回収機能を持たせるよう構成した。具体的には一段目の可変絞りとして温度式流量調整弁を採用し、エアコン用エバポレータ出口のスーパーヒート（過熱度）を検知して開度を調整することで負荷変動への対応を図り、二段目は固定形状のノズルを採用している。これによって、高効率化と負荷変動対応を両立できる可変エジェクタを簡素に構成した。

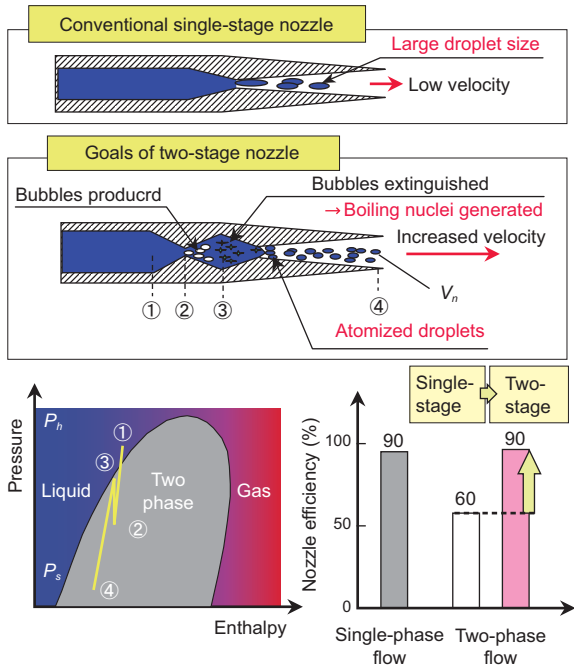


Fig. 8 Two-stage expansion nozzle

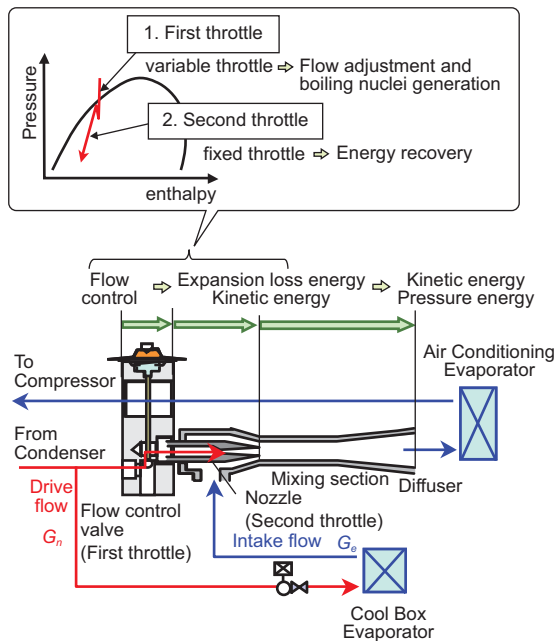


Fig. 9 Structure of variable ejector

(3) コンプレッサオイル戻しの確保

本システムでは、クールBOX 上流の電磁弁を閉じることでエアコン単独運転の機能を持たせている。このとき、クールBOX 側への冷媒流れは遮断され、クールBOX 回路は閉空間となる。そのため、車両への搭載上、クールBOX がエジェクタより下方に設置される場合、エジェクタ吸引回路、すなわちクールBOX 回路への重力によるオイルの寝込みが懸念される。コンプレッサの潤滑には、サイクル内に流出したオイルを確実に戻すことが必要であるため、エジェクタ吸引接続部を上方に立上げた構造を採用することで、吸引回路へのオイル流入を防止できるようにしている (Fig. 10)。

6. エジェクタ式クールBOX の効果

本方式の適用効果を Fig. 11 に示す。ここでは、外気 45℃、走行条件におけるエアコンの空調性能、クールBOX の冷蔵性能を従来方式 (FIR 方式) と比較した結果を示している。エジェクタ方式においては、エジェクタの昇圧作用を利用し連続的に二つの蒸発温度が両立する構成により、吹出温度変動をなくし乗員の快適性を向上できるとともに、空調性能は約 15% 向上している。同様にして、冷蔵性能でも大幅な性能向上を確認しており、25℃の水を飲み頃の 15℃まで冷却するために必要な冷却時間を比較すると約 10 分短縮できることが分かった。

7. 結論

(1) 従来、減圧過程で渦となって損失していた膨張損失エネルギーを回収することで冷凍サイクルを高効率化でき

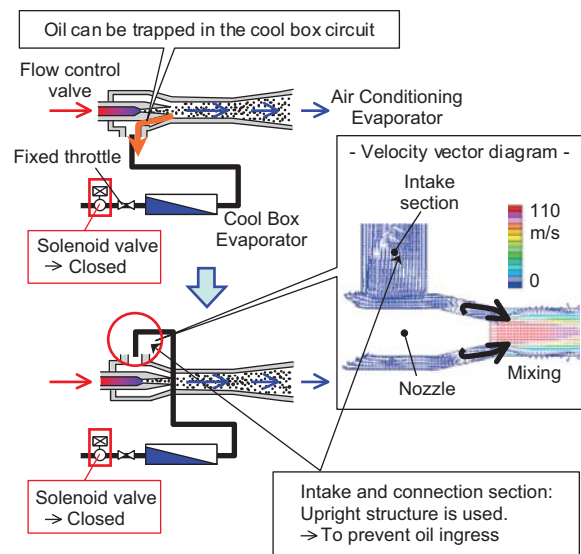
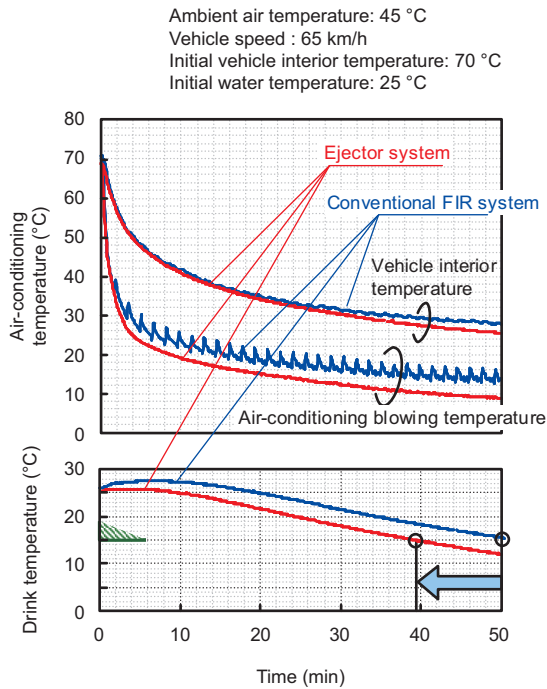


Fig. 10 Design of the return circuit for compressor oil



	Ejector system	Conventional FIR system
Blowing temperature fluctuation	None	6 °C at maximum
Air-conditioning performance (comparison with conventional system)	+15%	—
Cooling-performance (Time required to reach 15 °C, compared with conventional system)	-10 min	—

Fig. 11 Effects of the ejector-type cool box

るエジェクタサイクルの乗用車への適用に取組み、カーエアコンに適した新エジェクタサイクルを開発した。これによってエジェクタの昇圧作用を用いて連続運転で二つの温度を作り出し、空調と冷蔵を両立可能なエジェクタ式クールBOXシステムを実現、下記的大幅な性能向上を達成した。

- ・ 空調性能：+ 15%
- ・ 冷蔵性能：冷却時間- 10 min

- (2) 本システムは、2007年10月に量産化済。
- (3) エジェクタサイクルは、原理的に全ての蒸気圧縮式冷凍サイクルに適用可能な技術であり、益々省エネルギーが重要となる次世代の冷凍サイクルとして期待できる。今後、エジェクタのさらなる高効率化やサイクルの改良に取組み、さらに適用効果を向上していくとともに、一層の普及に向け、車両・定置式の空調・冷凍・給湯装置等への幅広い適用検討を進める。

<参考文献>

- 1) 武内, 他：“二相流エジェクタを適用した冷凍サイクル”, 空気調和・衛生工学会論文集, No.70 (1998), pp. 31-37.
- 2) 中川, 他：“冷凍サイクルに適用される二相流エジェクタの流動特性”, 日本機械学会論文集, B編 64巻, 625号 (1998), pp. 304-311.
- 3) H. Takeuchi et al.：“World’s First High-Efficiency Refrigeration Cycle With Two-Phase Ejector ‘Ejector Cycle’”, SAE Technical Papers, 2004-01-0916.
- 4) 武内, 他：“世界初エジェクタサイクルの実用化”, 日本機械学会年次大会講演資料集, 8 (2005), p. 355.
- 5) H. Oshitani et al.：“Ejector-type Cool Box”, SAE Technical Papers, 2008-01-0734.
- 6) 五丁, 他：“エジェクタ式クールBOXシステム”, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.45-08 (2008).

<著 者>



五丁 美歌
(ごちょう みか)
熱システム開発部
高効率冷凍サイクルの開発, 設計に
従事



押谷 洋
(おしたに ひろし)
熱システム開発部
高効率冷凍サイクルの開発, 設計に
従事



高野 義昭
(たかの よしあき)
熱システム開発部
高効率冷凍サイクルの開発, 設計に
従事



武内 裕嗣
(たけうち ひろつぐ)
技術企画部 工学博士



山中 康司
(やまなか やすし)
常務役員 熱機器事業部担当