

# 特集 世界初 エジェクタサイクルの製品化\*

## The World's First Ejector Cycle for DENSO's Transport Refrigerator

武内 裕嗣

Hirotsugu TAKEUCHI

松 永 久 嗣

Hisatsugu MATSUNAGA

西 嶋 春 幸

Haruyuki NISHIJIMA

柚 原 博

Hiroshi YUHARA

池 上 真

Makoto IKEGAMI

池 本 徹

Toru IKEMOTO

The EJECTOR CYCLE is a highly efficient brand-new refrigeration cycle; a first in the world. By using kinetic energy in the expansion process, DENSO's new transport refrigerator has improved efficiency by 50% and achieved a system weight reduction of 40%.

**Key words** : Ejector, High efficiency, Refrigeration cycle, EJECS, Ejector cycle

### 1. まえがき

近年、地球環境保護の観点から京都議定書の発効が正式に決定するなど、地球規模での温暖化抑制が急務となっている。各機器の省エネが特に求められており、当社も早くから冷凍空調機器の省エネ、高効率化に取り組んできた (Fig. 1)。例えば、車載型冷凍機分野においては、積荷の積降し時の冷気流出を防ぐエアリターンシステム、除霜時の冷凍性能低下を抑制する逐次除霜システム等、数多くの省エネアイテムをお客様に提案してきた。しかしながら、冷凍サイクルそのものの高効率化に関しては未着手であり、大幅な高効率化を図るためには冷凍サイクルの高効率化が必須である。

このエジェクタサイクルは、蒸気圧縮サイクルの膨張弁で失われていた膨張エネルギーをコンプレッサの動力に変換できる動力回収サイクルであり、今まで机上の空論とされていたこの技術に着目した。エジェクタサイクルを冷凍機に搭載した場合、約50%の冷凍サイクルの高効率化が可能な画期的な省エネ技術である。さらに、原理的にほとんどすべての蒸気圧縮式冷凍・空調・給湯機器の高効率化に有効である。今回、

世界でも実用化例のないエジェクタサイクルの開発に取り組む、大幅な冷凍能力向上と省動力を両立し、システム重量低減を可能にしたエジェクタサイクル冷凍機を製品化したので報告する。

### 2. 高効率冷凍サイクルの着眼点

従来の冷凍サイクル (膨張弁サイクル) の高効率化手段として、エバポレータ、コンデンサ、コンプレッサなどの各機能品の高性能化に取り組んできた。しかし、理想的な冷凍サイクルを考えると、膨張弁における減圧膨張過程は等エンタルピー膨張であり、理想的な等エントロピー膨張に対してエネルギーが損失している (以下、膨張損失エネルギーとする) (Fig. 2)。すなわち、膨張弁での減圧膨張により渦が発生し、運動エネルギーが損失している現象と考えられる。膨張損失エネルギーをゼロにできれば、エバポレータでの蒸発量が増加し、冷凍能力の向上が可能である。膨張損失エネルギー低減手段については、着眼されていたが実用化に至ってなかった。

エジェクタサイクルは、この膨張損失エネルギーを回収し、コンプレッサの圧縮仕事に変換することで、冷凍能力向上とコンプレッサ動力低減を両立させる冷凍サイクルである。

エジェクタサイクルは、多くの家電メーカー車両メーカーが開発に挑戦してきたが、エジェクタ単体の効率の低さゆえに実用化されることはなかった。エジェクタが効率が低い理由は、冷凍サイクルに用いられる場合は、液とガスが混合したいわゆる二相流状態になる。ガスに比べ、液滴は密度が大きく、なかなか加速しにくく、また慣性力の強さから減速しにくいという特徴があった。この結果、二相流のエジェクタの効率が単相流エジェクタの1/5まで低下してしまうためである。

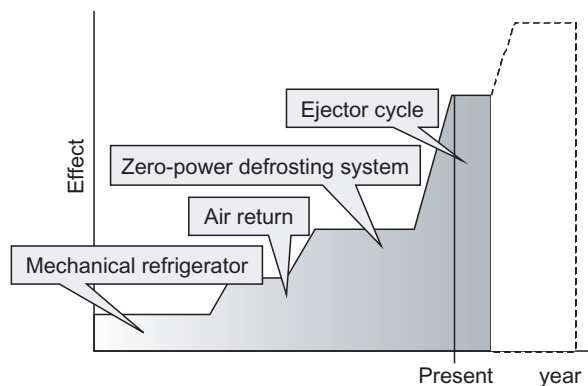


Fig. 1 Improvement of DENSO's transport refrigerator

\* (社)日本冷凍空調学会の了解を得て、「平成15年度日本冷凍空調学会学術講演会講演論文集」B-309より一部加筆して転載

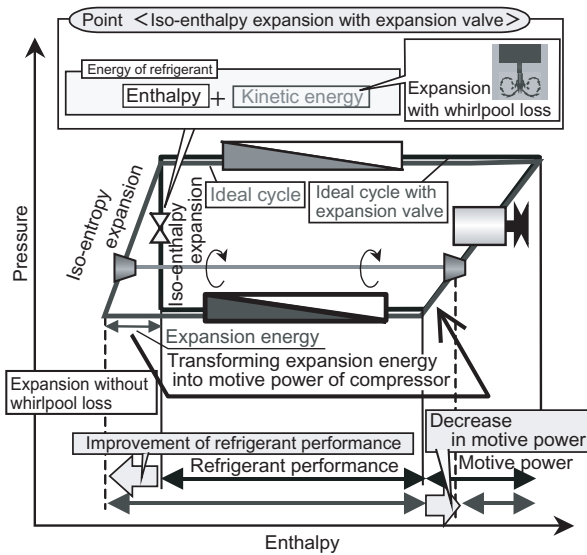


Fig. 2 Improvement in efficiency refrigeration cycle

### 3. エジェクタサイクルの性能向上原理

#### 3.1 エジェクタによるエネルギー変換

Fig. 3に示すように、エジェクタはノズル、混合部、ディフューザに大別される。ノズルに流入する高圧 ( $P_h$ ) 冷媒 (駆動流) は、ノズルにて減圧膨張し、減圧後の圧力 ( $P_s$ ) が吸引流の流入圧力 ( $P_l$ ) より低くなることで、吸引部からの吸引が可能 (吸引流の発生) となる。

ノズルでの減圧膨張過程において発生する圧力エネルギーは運動エネルギーに変換され、冷媒流速を増加させる。当社で製品化した冷凍機用エジェクタでは、ノズル出口流速は超音速に達し、圧力エネルギーから

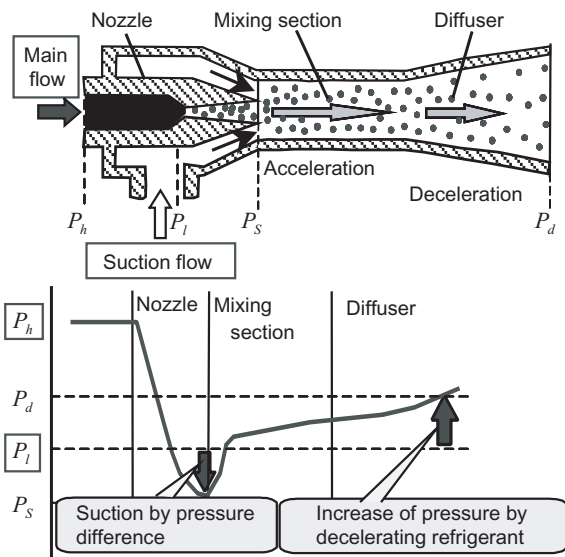


Fig. 3 Structure and inside pressure of ejector

運動エネルギーへの変換効率 (ノズル効率) は90%を達成している。

混合部において超音速の駆動流と吸引流が混合し、均質となるよう形状を設計している。

ディフューザでは、断面積の緩やかな拡大によって、混合された高速冷媒が減速し、昇圧する。すなわち、減少した運動エネルギーを圧力エネルギーに変換し、吸引流流入圧力 ( $P_l$ ) とディフューザ出口圧力 ( $P_d$ ) の差圧分が、コンプレッサ圧縮仕事の低減に寄与する。

#### 3.2 エジェクタサイクルの性能向上原理

モリエル線図上でエジェクタサイクルの効果を考えると (Fig. 4)、エジェクタによるコンプレッサの吸入圧力の上昇によりコンプレッサ吸入エンタルピーが増大し、コンプレッサでの圧縮仕事が低減する。

さらに圧縮比の低減によりコンプレッサの体積効率および機械効率が向上し、大幅なコンプレッサ動力低減が可能である。また、圧縮比低減によるコンプレッサ単体性能の向上による駆動流量増大が見込め、冷凍能力が向上する。

当社が製品化したエジェクタサイクルは、エジェクタ出口に気液分離器を搭載し、液冷媒をエバポレータに、ガス冷媒をコンプレッサに流れるよう設計していることから、エバポレータの圧力損失低減によるエバポレータ単体の性能向上も可能である。

エジェクタサイクル冷凍機の場合、エジェクタサイクル化によるこれらの相乗効果も含めて、25%以上の冷凍性能向上が可能である。

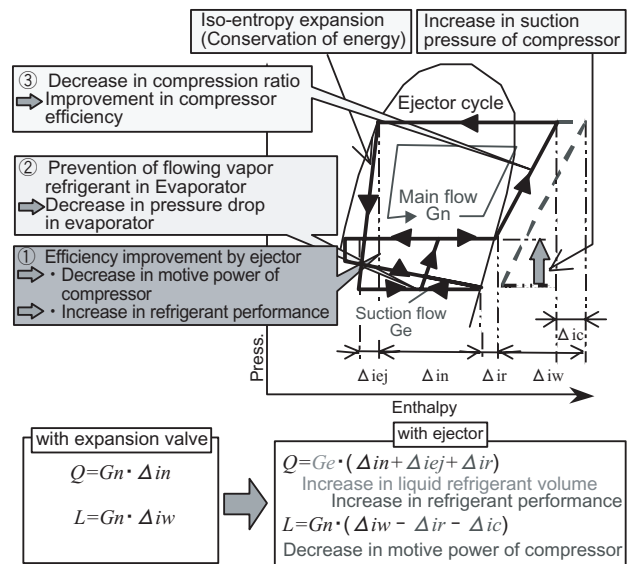


Fig. 4 Efficiency improvement theory of ejector cycle

#### 4. エジェクタサイクル冷凍機の開発上の主要課題

エジェクタサイクル冷凍機の開発主要課題として、

- (1) エジェクタの高効率化
- (2) 負荷変動対応
- (3) 除霜サイクル確立
- (4) 気液分離器の低圧損・液ガスの高分離性能化
- (5) エバポレータの液分配 (ディストリビューション)
- (6) コンプレッサへのオイル戻しの確保

が挙げられる。我々はこれらの主要課題を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) 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、エジェクタ最適設計に際して二相流特有の現象解明は必須である。当社はこのエジェクタ内の二相流解析を豊橋技術科学大学との共同研究により実現し、エジェクタ設計手法を確立した。この結果Fig. 5に示す二段膨張ノズルを採用した。当社の冷凍機に用いている冷媒 (R404A) は気液の密度比が非常に大きいという特徴をもつため、ノズル内での減圧沸騰を効率よくおこなうため、一段目の絞りにて沸騰核を生成させた後、二段目の絞りで沸騰させる構造とした。

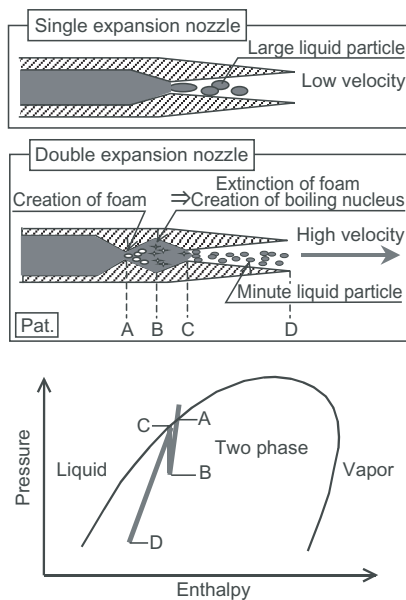


Fig. 5 Efficiency of double expansion nozzle

- (2) 車載型冷凍機ではカーエアコン、定置式空調・冷凍機器に比べて使用される庫内温度範囲が広く、冷媒流量調整、能力制御手段の開発が必要である。

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、ノズル一段目を可変絞りにすることで、核沸騰の生成に加え流量調整機能を付加し、二段目は固定絞りにて膨張エネルギーの回収機能を持つ可変エジェクタを採用した (Fig. 6)。

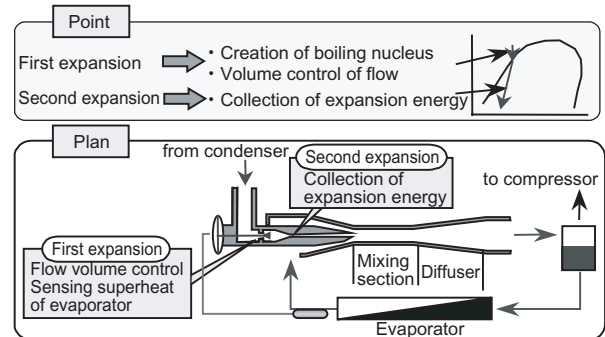


Fig. 6 Efficiency of double expansion nozzle

- (3) エジェクタによる冷凍能力向上に伴う着霜量の増大から、熱交換器の改良はもちろんのこと、エジェクタサイクル特有の除霜サイクルを構築することで対応した。
- (4) エジェクタサイクルに搭載する気液分離器に求められる性能として、高い気液分離性能はもとより、エジェクタによる昇圧を妨げない低圧力損失が必要であり、数値解析により必要形状を検討し、実用化した (Fig. 7)。

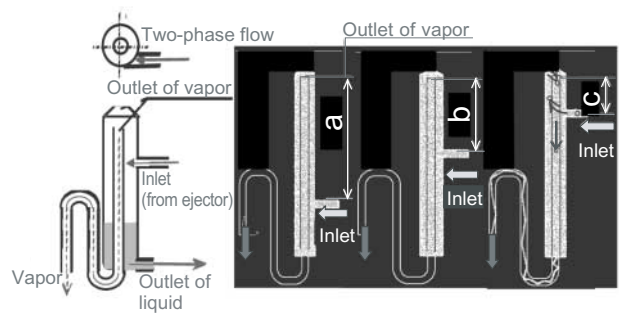


Fig. 7 An analysis case of accumulator

- (5) エジェクタサイクルにおいては、エバポレータ入口の流れは吸引流のためエバポレータの入口速度が遅く、また気液分離器で分離された液冷媒のみエバポレータに流入することから、液の体積割合が多くなる。エジェクタサイクルの特徴にあった、エバポレータ入口のディストリビュータ形状の最適化を数値解析で明確化した。
- (6) エバポレータへのオイル停滞を抑制し、コンプ

レッサへの循環オイル量を確保するため、気液分離器からコンプレッサへのオイル戻しに手法ついて検討した。オイルセパレータに加え、気液分離器にオイル戻し穴を設置する構造を採用し、冷凍能力向上とオイル戻しの安定を両立できる製品仕様を決定した (Fig. 8)。

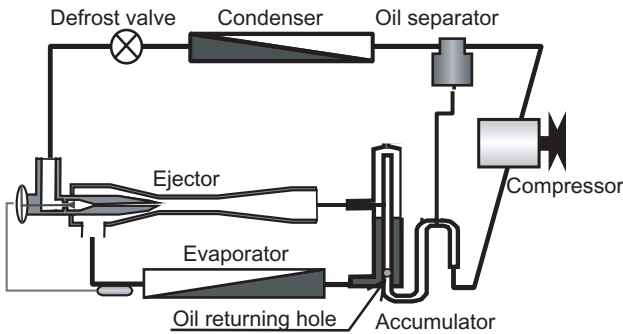


Fig. 8 Summary of oil circulation mechanism

### 5. エジェクタサイクル冷凍機の製品概要

今回、世界ではじめて製品化したエジェクタサイクル冷凍機の構造概要をFig. 9に示す。エバポレータユニット（庫内ユニット）とコンデンサユニット（庫外ユニット）を一体化したパッケージタイプの冷凍機となっており、コンパクトな設計で大幅な高性能かつ省エネを実現した、画期的な冷凍機である。お客様にも好評を頂いている。従来は、1クラス大きいコンプレッサと熱交換器を搭載する必要があり、コンデンサとエバポレータは別のユニットで搭載されるため、搭載

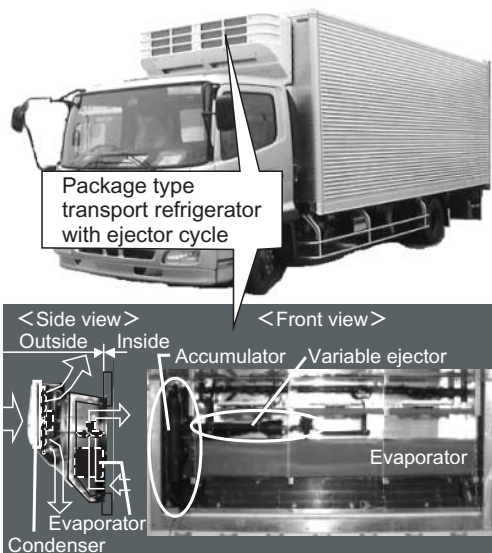


Fig. 9 Product summary of transport refrigerator with ejector

性やコストの面で課題があった。しかし、エジェクタサイクルの性能向上効果により、エバポレータとコンデンサをキャビン上部の1ユニットに一体化して搭載が可能になったため大幅な搭載性向上が達成できた。

### 6. エジェクタサイクル冷凍機の効果

Fig. 10に、製品化したエジェクタサイクル冷凍機の効果を示す。エジェクタサイクル化により、冷凍機として重要な温度域における冷凍能力は、膨張弁サイクルに比べ25%~45%の向上を達成した。コンプレッサ動力に対する冷凍能力の比で示されるCOP (Coefficient of Performance) も45~65%向上した。これは、コンプレッサ、エバポレータ、コンデンサなどの機能品が同一の場合の効果であり、同一冷凍能力を得るには、従来の膨張弁サイクルに比べ、小型、軽量化が可能である。また、ユーザのアンケート結果によると車両燃費の大幅な低減により、車両燃費などを含めたランニングコストが1年で100万から200万円も大幅に低減したといううれしい話もいただいている。つまりエジェクタサイクル冷凍機の一台中を一年で回収してしまうほどのポテンシャルをもっていることになる。

エジェクタサイクル冷凍機がすべての冷凍車に搭載され、またすべての冷凍空調製品にエジェクタサイクルが搭載されると約1,400万トンのCO<sub>2</sub>を削減できると試算でき、これは日本全体の1.1%の量に相当し、京都議定書の6%の削減目標の約8.4%を達成できることになる。今後有効な地球温暖化抑制技術として期待されており、さらなる適用検討されていく必要があると思われる。省エネ法のトップランナー方式による効率化の取り組みの結果、冷凍空調製品は、効率向上がほぼ限界に来ていると思われるため、さらなる汎用性の高いシステムづくりが必要である。

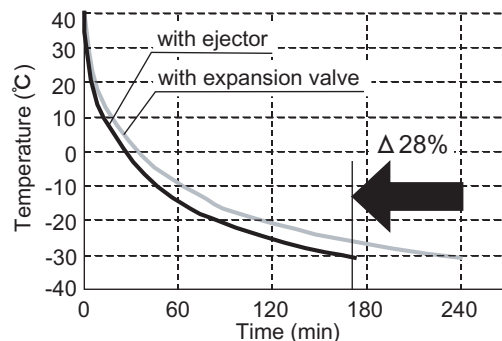


Fig. 10-a Efficiency of transport refrigerator with ejector cycle

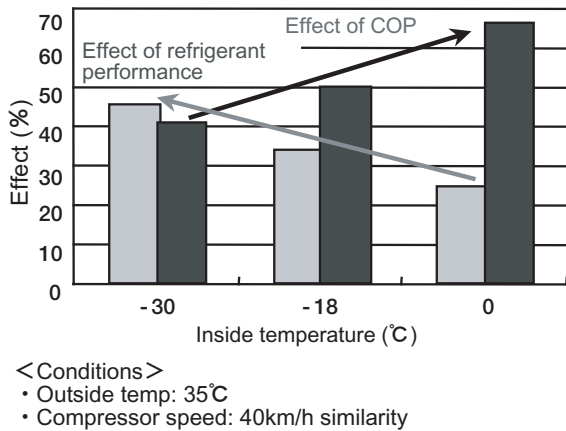


Fig. 10-b Efficiency of transport refrigerator with ejector cycle

### 7. 冷凍機実効果

世界初の製品化後、実際のユーザのランニングコストデータから、約33%から53%のライフコスト（インシヤルコスト+ランニングコスト）低減により、大きなユーザメリットがあることが証明できた。

エジェクタサイクル冷凍機を小型から大型まですべて採用された場合、約100万トンのCO<sub>2</sub>削減効果と、内航・鉄道へのモーダルシフトの70万トン以上の効果ポテンシャルを持っている。

### 8. むすび

- (1) 従来の蒸気圧縮サイクルで損失していた膨張エネルギーをコンプレッサ動力に回収することで省動力可能なエジェクタサイクルの開発に取組み、大幅な冷凍能力向上と省動力、システム重量低減を得られるエジェクタサイクル冷凍機を製品化した。
- (2) 本技術は家庭用自然冷媒（CO<sub>2</sub>）給湯機「エコキュート」へ適用し、自然冷媒サイクルとして世界で初めての製品化にも成功した。原理的に全蒸気圧縮サイクルに適用可能な次世代冷凍サイクル技術であり、今後、車載・定置式の空調・冷凍・給湯装置など幅広く検討し適用を進める。
- (3) 本製品は、2003年6月製品化済
- (4) 特許100件出願済

### (5) エジェクタサイクル関連の主な受賞歴

#### ① 冷凍機関連

- ・ 日刊工業新聞「10大新製品賞」
- ・ 日本機械工業連合会 優秀省エネルギー機器表彰 資源エネルギー庁長官賞
- ・ 平成16年度日本機械学会技術賞
- ・ 日本冷凍空調学会技術賞
- ・ 日経BP技術賞「機械システム工学部門」
- ・ 中日産業技術賞「経済産業大臣賞」

#### ② 給湯機関連

- ・ 省エネルギーセンター「省エネ大賞」
- ・ 平成15年度日本機械学会賞「技術賞」

#### ③ 発明関連

- ・ 全国発明表彰「21世紀発明奨励賞」

### 記号の意味

- $P_h$  : nozzle inlet pressure
- $P_d$  : diffuser outlet pressure
- $P_l$  : suction flow pressure
- $P_s$  : mixing section inlet pressure
- $G_n$  : main flow volume
- $G_e$  : suction flow volume
- $\Delta_{ej}$  : difference of enthalpy in nozzle
- $\Delta_{in}$  : difference of enthalpy in evaporator
- $\Delta_{ir}$  : increase in compressor inlet enthalpy because of ejector cycle
- $\Delta_{iw}$  : difference of enthalpy in compressor in the case of general refrigerant cycle
- $\Delta_{ic}$  : decrease in compressor outlet enthalpy because of ejector cycle
- $Q$  : refrigerant performance
- $L$  : motive power of compressor

### <参考文献>

- 1) H. Takeuchi et al. : "Refrigeration Cycle with Two-Phase Ejector" Collected Papers of SHASE. 31-37 (1998-7). (in Japanese)
- 2) K. Nakagawa et al. : "Flow Characteristic of Refrigeration Cycle with two-phase ejector" Collected Papers of JSME. 625(1998-B64). (in Japanese)



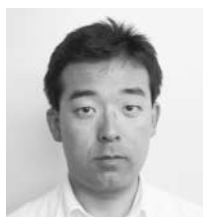
<著 者>



武内 裕嗣  
(たけうち ひろつぐ)  
熱システム開発部  
工学博士  
エジェクタサイクルの開発・実用化  
冷凍サイクル，冷媒系機能部品の  
開発・実用化に従事



西嶋 春幸  
(にしじま はるゆき)  
熱システム開発部  
冷凍機用エジェクタサイクルの  
開発・実用化に従事



池上 真  
(いけがみ まこと)  
熱システム開発部  
定置用エジェクタサイクルの開発・  
実用化に従事



池本 徹  
(いけもと とおる)  
冷暖房技術4部  
冷凍機の開発・設計に従事



松永 久嗣  
(まつなが ひさつぐ)  
冷暖房実験部  
冷凍機の開発実験に従事



柚原 博  
(ゆはら ひろし)  
冷暖房技術4部  
車両用冷凍空調装置の開発に従事