

特集 世界初エジェクタサイクル® 冷凍機の開発*

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

武内 裕嗣 Hirotsugu TAKEUCHI	西嶋 春幸 Haruyuki NISHIJIMA	池本 徹 Toru IKEMOTO	池上 真 Makoto IKEGAMI
松永 久嗣 Hisatsugu MATSUNAGA	神谷 博 Hiroshi KAMIYA		

EJECTOR CYCLE® is an epoch-making, world-first, high efficiency refrigeration cycle. By using kinetic energy in the expansion process, DENSO's new transport refrigerator has improved efficiency by 50%.

Key words: Ejector, High efficiency, Refrigerator cycle

1. まえがき

エジェクタサイクル®とは、膨張弁を用いた冷凍サイクルにおいて、膨張弁で渦として損失していたエネルギーをエジェクタによりコンプレッサの仕事として回収する高効率冷凍サイクルである。各機器の効率向上といった従来の延長線上では達成できない50%の冷凍サイクルのCOP向上（COP＝冷凍能力／コンプレッサ消費動力）を達成できる画期的な冷凍サイクルであるが、エジェクタの単体効率が低く、机上の空論とされていた。今回、二段膨張ノズルなどの独自の高効率化により世界で初めて実用化に成功し、その将来性から全国発明表彰「21世紀発明奨励賞」、ものづくり日本大賞「内閣総理大臣賞」など数々の賞を受賞したので、当社でのエジェクタサイクル冷凍機®開発への取り組み、成果、今後の展望について報告する。

2. 開発の背景と本開発の位置付け

21世紀最大の課題の一つに地球環境の問題がある。地球温暖化についてはロシアの批准により京都議定書が正式発効し、国際的な義務となった温室効果ガス削減が急務となっているが、日本は、CO₂総排出量を6%削減する目標が立てられている。

しかし、実際は、1990年に比べ、CO₂総排出量が大幅に増加しており、2000年度の日本国内のCO₂排出量は、約12億2500万トンとなっており、その内訳を見ると、産業部門が4億9367万トンで41%、エネルギー転換部門が8575万トンで7%、民生（家庭）が1億5925万トンで13%、民生（業務）が1億4945万トンで12%、運輸部門が2億5970万トンで21%、工業プロセスが4%、廃棄物が2%となっている。運輸部門では1990年度比21%増加している。このため、車両メーカー、車両機器関連メーカーには排気ガス中のCO₂削減のための燃

料消費効率の向上などが必要であり、エンジンで駆動される車載用冷凍・空調機器にはコンプレッサの消費動力低減が重要な課題である。

このような状況の下、当社は、従来比+50%のCOPを向上できるエジェクタサイクル®を搭載した冷凍機（エジェクタサイクル®冷凍機）を2003年6月に世界で初めて実用化に成功した。Fig. 1に示すように、エバポレータ、コンデンサを一体化したパッケージタイプの冷凍機である。

3. 冷凍サイクル高効率化への着眼点

冷凍空調製品の98%は、膨張弁やキャピラリを用いた蒸気圧縮式の冷凍サイクルで、100年以上基本システム構成は変化していない。

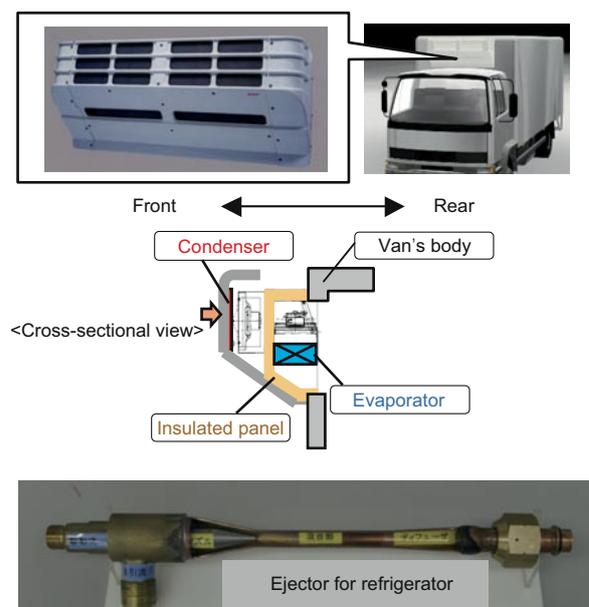


Fig. 1 Ejector Cycle® refrigerator and ejector

* 2009年9月28日 原稿受理

一方、この冷凍サイクルの高効率化に対しては、1999年の改正省エネ法により、トップランナー方式が採用され、もっとも優れた機器の性能以上に競争がはじまっており、各社あらゆる効率向上手段の開発が行われている。その中身を見ると、熱交換器の伝熱面積向上やコンプレッサのシール性向上などの各機能品の単体効率向上は実施されているが、基本となる冷凍サイクルそのものの効率向上は取り組まれていない。特に、従来、エネルギー損失していた膨張過程の効率向上には実用化された例がない状況である。この膨張過程のエネルギー損失を活用する手段として、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[®]）に当社は着眼し研究開発を行ってきた。

膨張損失エネルギーとは、物質が持つエネルギーであるエンタルピーと、運動エネルギーのうち、等エンタルピー変化をした際に保存されずに渦として損失してしまう運動エネルギーのことである。この損失しているエネルギーをタービンなどを用いて回転力に変換し、コンプレッサの圧縮仕事として回収することができれば省動力化が期待できる。そこで今回、膨張損失エネルギーを活用した動力回収による省動力化に取り組んだ。

動力回収手段としては、Fig. 3 に示すように、タービンのような膨張機が一般的で、国内外で積極的に研究されている。

一方、エジェクタは、従来、蒸気機関や泡風呂など単相流で使用されるほど古い技術であるが、冷凍サイク

ルの膨張過程に用いる場合は、液とガスが混在する二相流エジェクタとなり、大幅に効率が低下するという特徴をもっており、今まで実用化されてこなかった。二相流のエジェクタのエネルギー変換効率（以下、エジェクタ効率）は10%程度と単相流の6分の1と非常に低い。その理由は、液とガスが混在する二相流の場合は、液とガスの密度（密度比）が90倍から600倍も違うためである。（フロン系冷媒の場合）つまり、ノズルでは、液の速度を上げる必要があるが、液密度が大きく重いために、なかなか流速を上げることができず、流速を落としたい混合部やディフューザ部では、液が重くてなかなか流速が落ちないため、圧力が上がらないという根本的な問題を抱えていた。しかしながら、当社では、効率の面では、膨張機に劣るが、構造が簡素化でき、小型・軽量化・低コスト化のポテンシャルが高いと考え、エジェクタの高効率化に挑戦し、後述する当社独自の研究技術開発の末、単相流レベルの高効率化を達成し、実用化を達成した。

4. エジェクタサイクル[®]の概要

エジェクタは Fig. 4 に示すように、ノズル部、混合部、ディフューザ部に大きく大別できる。ノズルに流入する流れ（駆動流）は、ノズルの喉部で減圧膨張（等エントロピー膨張により超音速まで加速）され、この減圧後の圧力が吸引部の圧力より低くなることで、吸引部より吸引が可能（吸引流の発生）となる。混合部には

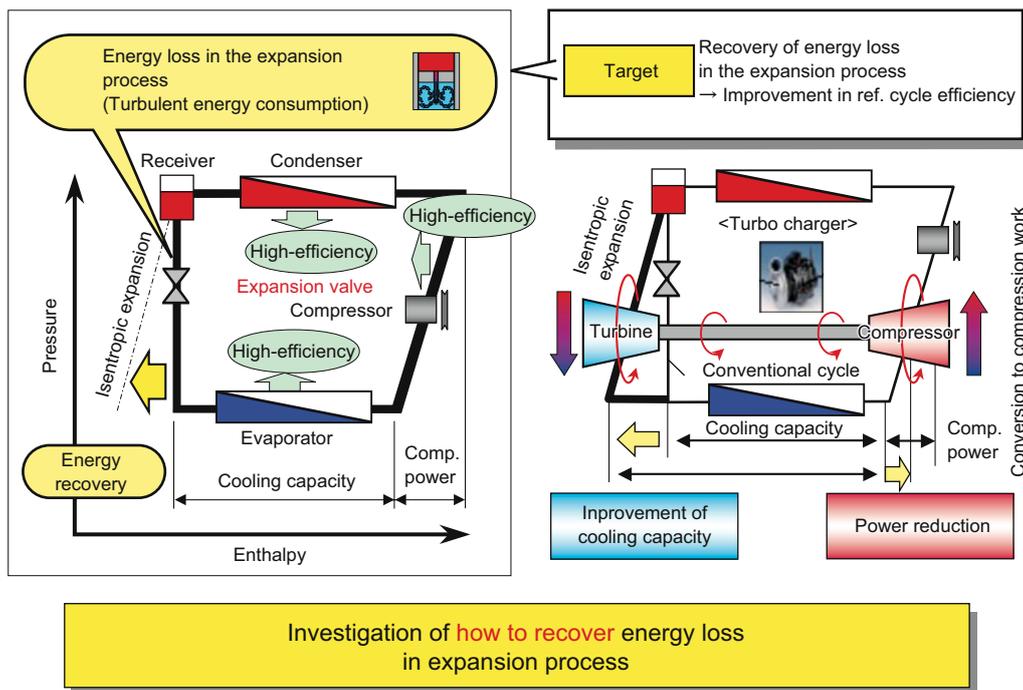


Fig. 2 Key point of improvement in refrigeration cycle

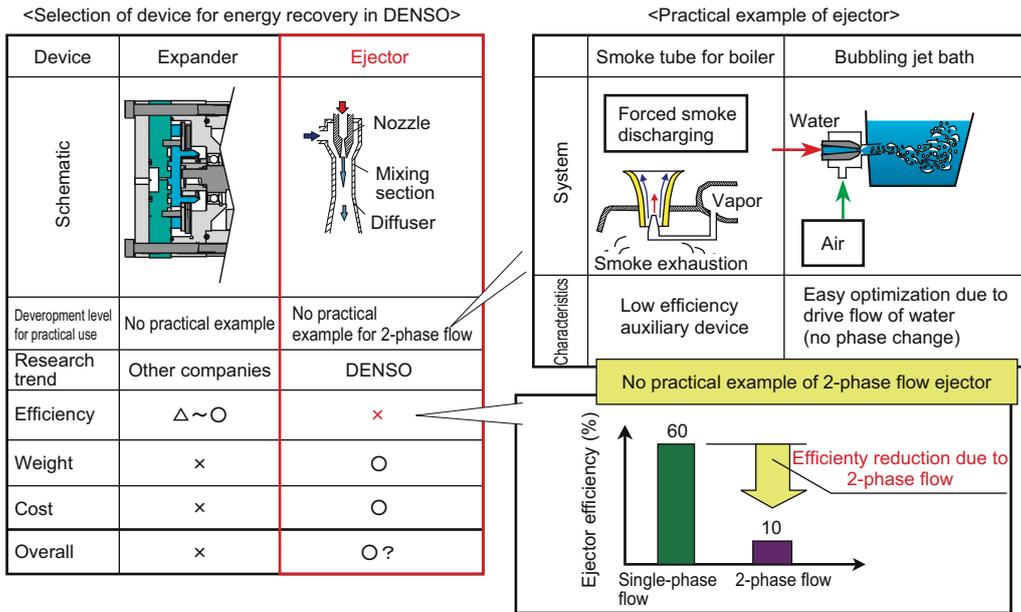


Fig. 3 Issues of 2-stage flow ejector

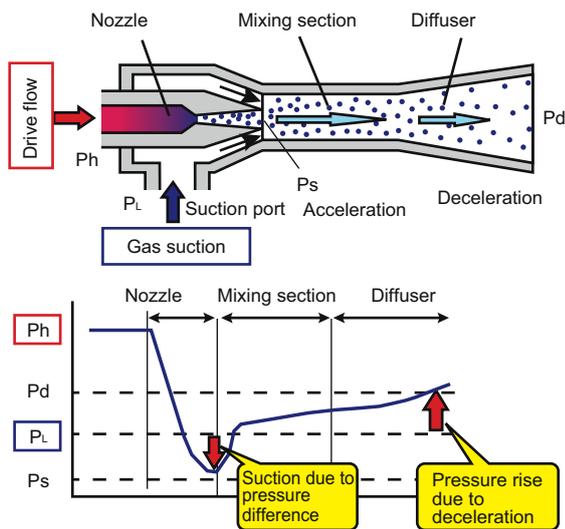


Fig. 4 Principle of ejector

駆動流と吸引流とが均質になるまで混ざりあい、ディフューザ部にて流路面積の拡大による減速により出口圧力を上昇（昇圧）が可能となる。

Fig. 5 に示すように、従来の膨張弁の代わりにエジェクタおよび気液分離器を用い、上述のディフューザ出口圧力をエバポレータ出口より高くすることで、液冷媒のみを、エバポレータへ連続的に供給できる冷凍サイクル（以下、エジェクタサイクル[®]）が構成できる。従来の膨張弁サイクルをエジェクタサイクル[®]化することで、ノズルでの等エントロピ膨張により冷凍能

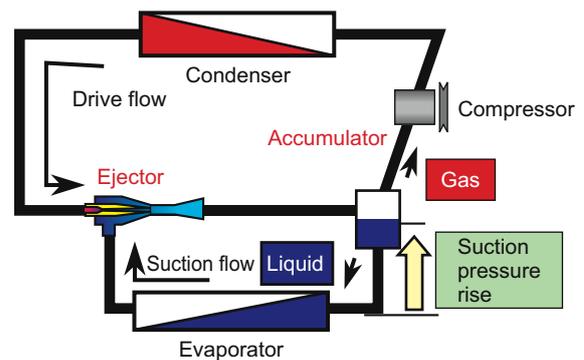


Fig. 5 Schematic of Ejector Cycle[®]

力が向上され、エジェクタによる昇圧作用にてコンプレッサの吸入圧を上昇させることでコンプレッサの消費動力が低減できる。

即ち、エジェクタはこのサイクルの中で、膨張弁同様の減圧作用と、エバポレータからのガスを吸引し、コンプレッサ吸入圧を上昇させる昇圧作用の二つの役割を果たし、ノズルでの等エントロピ膨張および混合部ディフューザでの減速による圧力エネルギーへの変換にて、膨張損失エネルギーのコンプレッサへの動力回収を実現させている。

5. エジェクタサイクル[®]の COP 向上効果の内訳

同一冷凍能力でのエジェクタサイクル[®]の COP 向上効果は、大きく三つの効果からなり、上述のエジェクタによるコンプレッサ動力の低減とエバポレータに冷凍

に寄与しないガスを流さないことによる圧力損失の低減, 更に, コンプレッサの吸入圧力と吐出圧力の比である圧縮比の低減によるコンプレッサ単体の効率 (体積効率, 機械効率, 圧縮効率) 向上が複合された効果が得られるという特徴がある。

冷凍車用冷凍機では, Fig. 6 に示すように, 上述のエジェクタによるコンプレッサ動力低減, エバポレータ冷凍効果向上による COP 向上効果が約 29%と全体の約 6 割を占める。コンプレッサの吸入圧力が上昇し, コンプレッサの圧縮比が低減することで, コンプレッサ単体効率向上によるコンプレッサの動力の低減効果は約 9%, エジェクタの吸引作用により, 冷凍に寄与しないガス冷媒を流さないため, エバポレータの圧力損失が低減されることによるエバポレータ自体の性能向上による COP 向上効果は約 11%となる。冷凍車用冷凍機

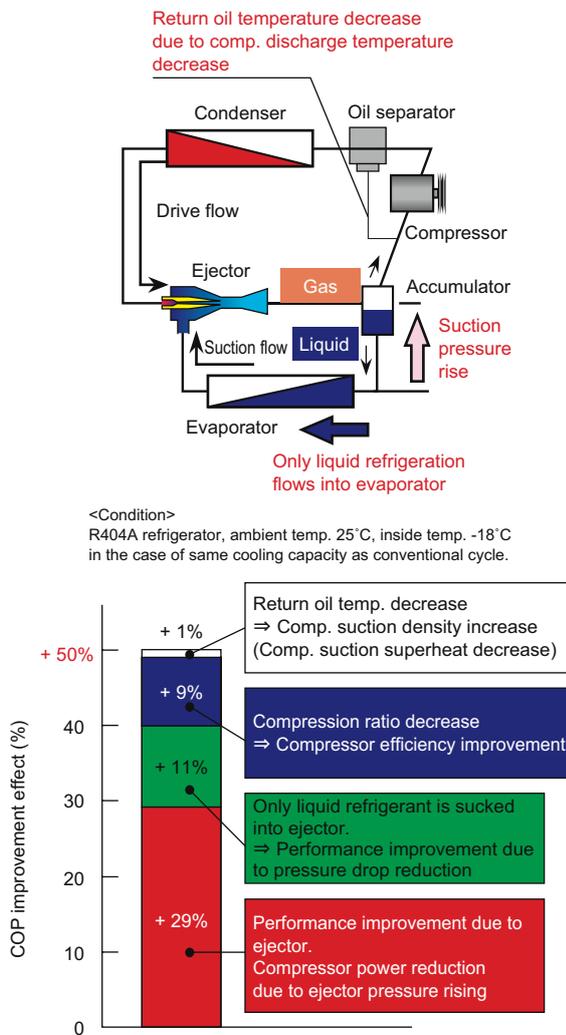


Fig. 6 COP Improvement Effect of Ejector Cycle® (R404A refrigerator for truck refrigerator)

では従来からオイルセパレータを用い冷凍機油をコンプレッサ吸入へ帰還させている。エジェクタサイクル化により, コンプレッサの吸入圧力が上昇することで, コンプレッサの吐出温度低下に伴うオイルセパレータ内冷凍機油の温度が低下する。このため, コンプレッサへの帰還する冷凍機油の温度も低下するので, コンプレッサの吸入加熱度の低下に伴う吸入密度増大の効果 (COP 向上効果は約 1%) も得ることができる。以上のような相乗効果により, 従来技術では達成し得ない+50%の COP 向上を実現できる。

6. エジェクタサイクル®の実用化を可能にしたエジェクタの高効率化の取り組み³⁾⁴⁾

上述の COP + 50% 向上達成に不可欠であった, 二相流エジェクタの高効率化に対する当社での取組み内容の一部を示す。

エジェクタ単体性能は, エジェクタ内が二相流であることから, 液とガスの密度比が小さい単相流に近い方が, 液ガスの速度差が小さく, 効率が高い。自然冷媒 CO₂ は, 作動圧力が高いために, ガスの密度が液なみに高く, 気液の密度比は小さく, エジェクタ単体性能も高いが, 今回の開発対象の R404A などフロン系冷媒は, CO₂ に比べて, 作動圧力が低く, 気液の密度比も大きいため, 上述のとおり, エジェクタ効率は, 従来 10%程度と単相流で用いたエジェクタの約 60%に比べ非常に低く, エジェクタ効率の向上は重要な課題であった。

6.1 ノズルの高効率化¹⁾²⁾

まず, 減圧膨張過程での膨張損失エネルギーを速度エネルギーに替えるノズルの高効率化には, いかに等エントロピ膨張により近づけノズル出口での速度をより加速できるかが重要である。

従来のノズルは, 単段のノズルで, 端からしかガス化しないために真中の液滴が大きく, 流速が上がらないという課題がある。このため, 当社では, 液をガスと同じように流動するように, 液滴の微粒化に着眼し, 二相流特有のノズル開発を行なった。

Fig. 7 に今回開発した二段膨張ノズルの概要と効果を示す。二段膨張ノズルは, 一段目のノズルで過冷却状態の液から減圧して気泡を発生させ, 一度面積を増大させ, 圧力を上昇させると気泡がつぶれて気泡核となり, 二段目のノズルでは, 一気に膨張が促進, 液滴を微粒化, 二段目のノズル内にてあたかも均質流のように, 液滴とガスの速度を等しくすることを狙ったものである。この二段膨張ノズル形状の実験的な解析により, ノ

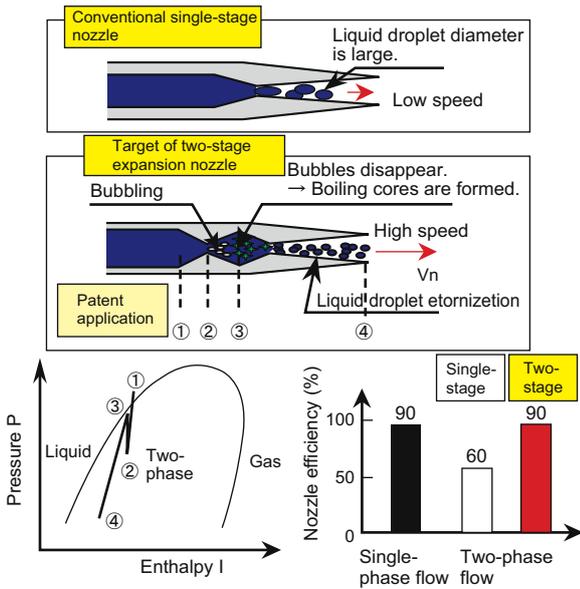


Fig. 7 Improvement of ejector efficiency: 2-stage expansion nozzle

ズルの効率（圧力エネルギーの速度エネルギーへの変換効率）を1.5倍に上げることができ、単相流同等のノズル効率レベルとすることを実現した。ノズル出口の速度は条件により異なるが、音速の約1.5倍から2.5倍程度に達する。

6.2 混合部・ディフューザの高効率化
(独自の数値解析技術)

エジェクタは、ノズル以外にも多数の形状要因を持っているため、二相流特有の現象を解明できる数値解析が必要であったが、開発当初世の中に存在せず、豊橋技術科学大学との共同研究のなかで作り上げた。数値解析は、混合部とディフューザ部での液滴とガスの減速度合いや混合状態を解析することで二相流特有の最適形状を導き出すことができる。

Figs. 8-10に示すように、特にノズルの入り口では人の歩くほどの速度だが、ノズル出口では、ジェット機なみの超音速となり、ディフューザ出口では、車両速度程度まで減速することから、緻密な形状推定が必要であった。数値解析にあたっては、二相流特有のノズルでの液滴の沸騰遅れを考慮したスリップ比（液とガスの速度比）によりノズル出口の液滴速度とガス速度を求めた。混合部とディフューザの流れは、臨界ウェーバー数から算出した液滴径をもとに、抵抗力、液ガス間に働く運動量とエネルギー保存を1次の風上差分とK-ε高レイノルズ数乱流モデルを用い、SIMPLE法により解いた。また、ボイド率を考慮し、ラグランジェモデルとオイラー方式を比較し、オイラー方式を選定した。

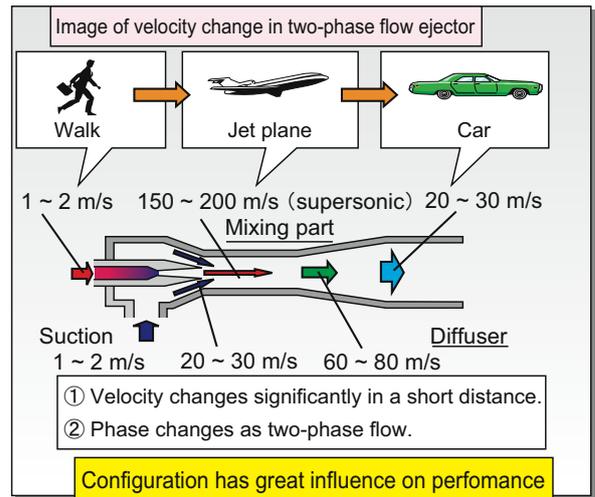


Fig. 8 Speed change in ejector

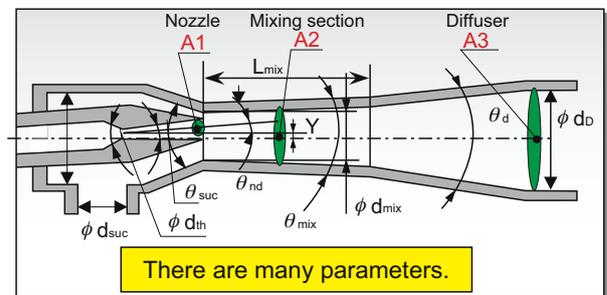


Fig. 9 Design factor of ejector (e.g.)

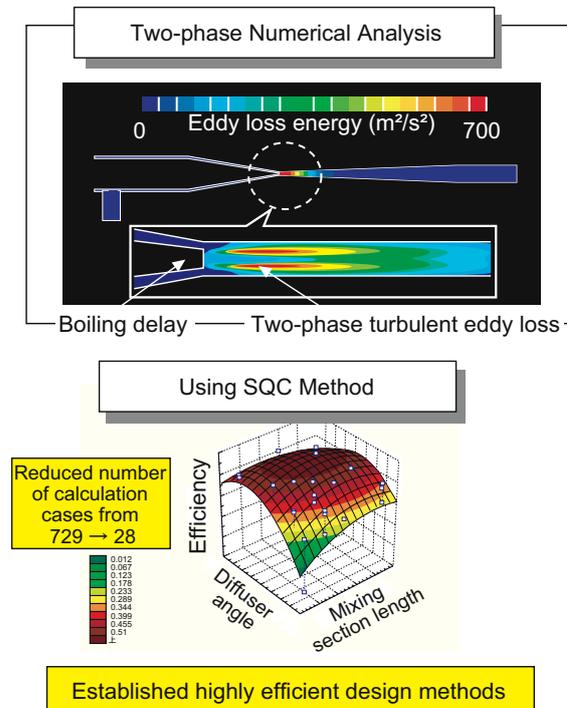


Fig. 10 Improvement of ejector efficiency (Numerical analysis technology)

上記の独自の数値解析モデルにより二相流の乱流渦損失と壁面の境界層の圧力損失などを考慮することで、液滴の粘性の緩和時間により最適化された混合部・ディフューザ形状を明確にすることができた。また多数の要因の交互作用を全て考慮するには膨大な計算時間がかかるため、SQC手法（応答曲面解析）を活用することで、3次元的な最適形状の計算回数の大幅低減も図った。

6.3 負荷変動対応技術

冷凍専用冷凍機では、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重要である。

我々は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、一段目ノズルを可変絞りにすることで、気泡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二段膨張可変エジェクタを採用することで、高効率化と負荷変動対応の両立を実現した。

7. エジェクタサイクル® 冷凍機の効果

7.1 冷凍能力, COP 向上効果

Fig. 12 に、エジェクタサイクル® 冷凍機の冷凍能力, COP 向上効果を示す。冷凍能力において JIS 定格条件である庫内 -18℃ で膨張弁サイクル比 +33%、同一冷凍能力時の COP は膨張弁サイクル比 +50% の向上効果を実現した。

また、上述の二段膨張可変エジェクタの採用により、定格条件以外の条件においても、高い性能向上効果を有することを確認している。

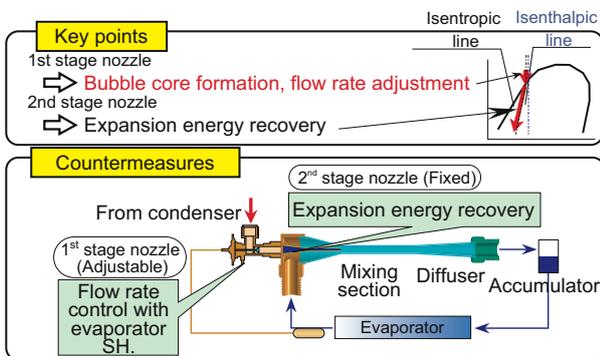


Fig. 11 Load fluctuation response technology 2-stage expansion variable ejector

7.2 その他波及効果

これらの冷凍能力および COP 向上効果を実現したエジェクタサイクル® 冷凍機のシステム面への波及効果も非常に大きい。Fig. 12 に示すように、冷凍能力向上による機能品のダウンサイジングにより膨張弁サイクル冷凍機に対して▲41%の軽量化および▲68%の省冷媒化などを達成している。

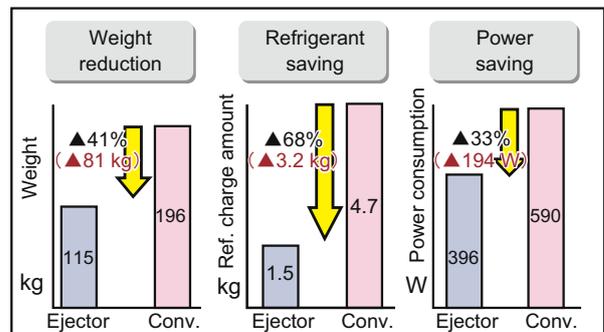
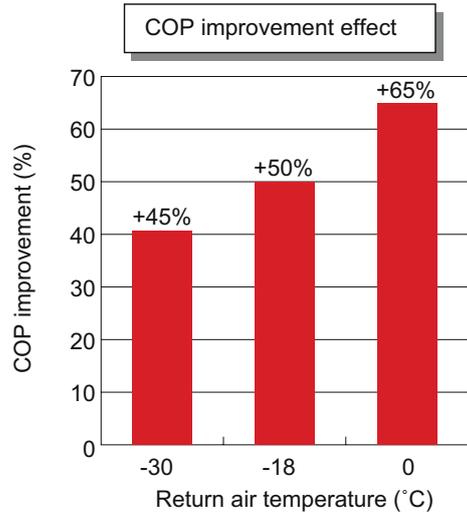
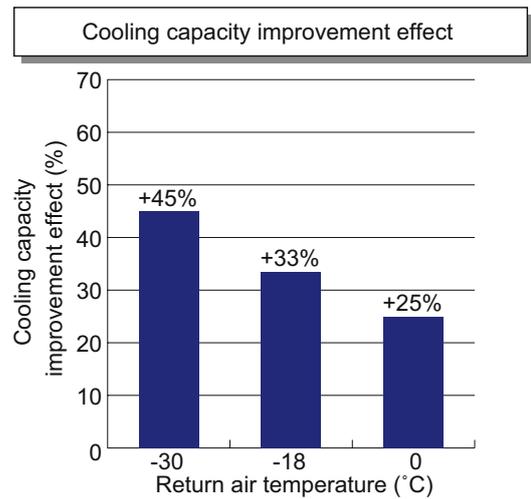


Fig. 12 Advantage of Ejector Cycle® refrigerator

7.3 実車での性能確認結果 (例)

Fig. 13 に実車での性能確認結果の一例を示す。本結果は、大型冷凍車（最大積載量 10 トン）でのクールダウン性能確認結果である。従来の大型冷凍車用冷凍機ではコンプレッサ消費動力が大きいいため、車両エンジンとは別にコンプレッサ駆動専用エンジンを有するサブエンジン式（以下 SE 式）冷凍機が主流である。エジェクタサイクル[®]冷凍機を用いることで、コンプレッサ動力を大幅に低減できるため、カーエアコンのように走行用エンジンでコンプレッサを駆動する直結式化が容易となった。Fig. 13 は、時間毎の庫内の平均温度変化を示しているが、エジェクタサイクル[®]冷凍機のほうが、コンプレッサ回転数が低いものの、庫内温度の冷却速度が早く、クールダウン性能が優れていることが分かる。

7.4 実車燃費向上および温室効果ガス削減効果

Fig. 14 に大型冷凍車の燃料消費量に関する当社での試算結果および実車での測定結果を示す。試算は、名古屋地区の 2002 年気象データを元に、最大積載量、当社調査に基づく実際の長距離輸送を模擬した 1 日 623.4 km 走行するパターンにて、日本自動車研究所^{5) 6) 7) 8)}の重量ディーゼル車の燃費シミュレーションを活用し試算した。実車での測定は、大手冷凍機ユーザーのご協力により、大型冷凍車（13 台）にて 2003 年 12 月から 2004 年 11 月の 12 ヶ月、実際の 1 日平均約 611 km の輸送にて、満タン法により算出したデータである。

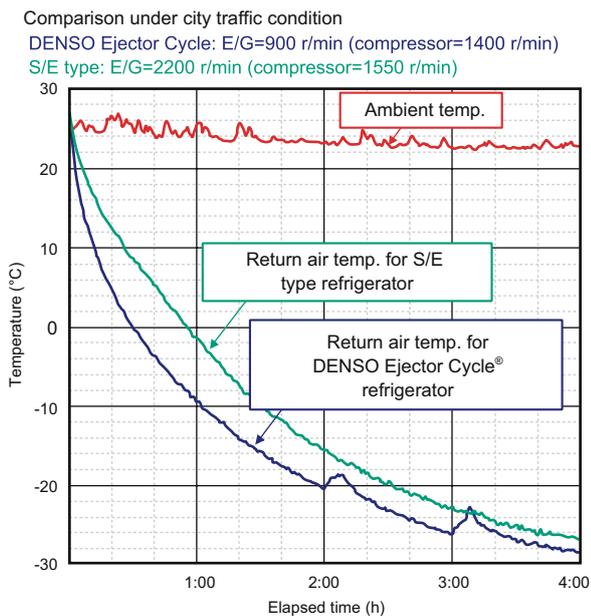


Fig. 13 Vehicle cool down test result (e.g.)

エジェクタサイクル[®]冷凍機は、従来の冷凍機に比べ小型軽量化であること、特に庫内温度が低いほど冷凍能力向上効果が高く、コンプレッサ消費動力が大きな庫内温度が高いほど動力低減効果が大いなどの特徴により、試算結果では▲7.6%、実車測定結果では平均で▲22%もの大幅な燃料消費量低減効果があることが分かった。

試算結果と実測の差は、追加試算の結果、積載量、アクセル開度などの車両走行条件の差によるものと考えられており、市場においては、当社試算結果以上の燃料削減効果が得られる可能性が高いことが分かった。

このエジェクタサイクル[®]冷凍機による燃料削減効果は、中型冷凍車、小型冷凍車でもそれぞれ▲9.2%、▲7.8%と大型同等以上の効果が試算できる。日本国内での軽自動車を除く全冷凍車にエジェクタサイクル[®]冷凍機を搭載した場合、約 384 百万 L の使用燃料削減、29965 百万円の使用燃料代の削減（1 L = 78 円にて算出）が可能となるほどのポテンシャルがあり、経済性の面でも優れた技術であると言える。

これらの結果に基づき、温室効果ガス削減効果を CO₂ 排出量にて示すと、Fig. 15 に示すように、約 100 万トンの CO₂ 排出量の削減を可能とする規模となる。これは日本が CO₂ 削減対策として推進しているモダリティフト（約 70 万トン削減）、CO₂ 給湯器 400 万台普及（110 万トン削減）に匹敵するポテンシャルがあり、エジェクタサイクル[®]冷凍機は、環境にも優しい次世代の冷凍機と言える。

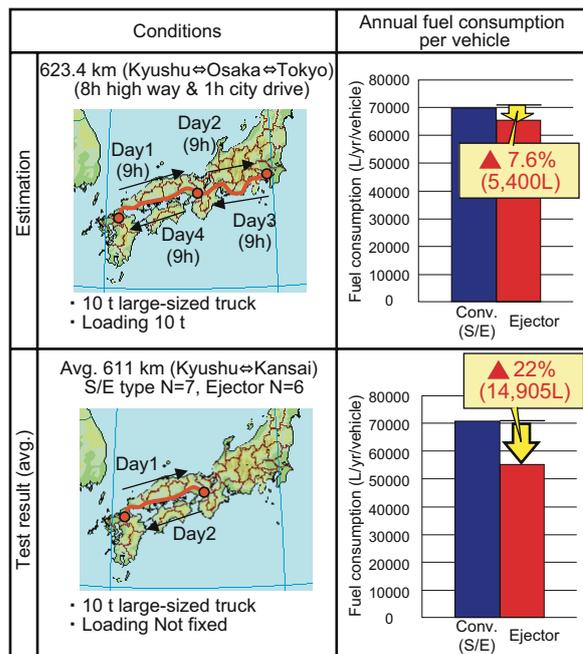


Fig. 14 Annual fuel consumption reduction effect of large-sized trucks

8. エジェクタサイクル®の発展性

Fig. 16 に示すように、日本国内の冷凍空調機器製品の約 98% はエジェクタが適用可能な蒸気圧縮式冷凍サイクルである。当社での基礎的なベンチ試験レベルでは、CO₂ カーエアコン、CO₂ バスエアコン、家庭用エアコン、家庭用冷蔵庫でも +20 ~ 49% の COP 向上効果があることが分かってきており、カーエアコンなどの車両用空調装置、定置式空調・冷凍・給湯装置への適用、実用化検討も進めている。

9. エジェクタサイクル®の地球環境への貢献

これら全ての冷凍空調機器へエジェクタサイクルを適用した場合の温室効果ガス削減効果 (CO₂ 換算) を算出すると、日本の 1.1% を占める約 1318 万トンの CO₂ を削減できると試算できる。

これは京都議定書で日本の削減目標である 6% の約 8.4% に相当し、等価の森林量でいえば、7 億 3000 万本となり、東海三県面積相当の森林に相当すると試算できる。

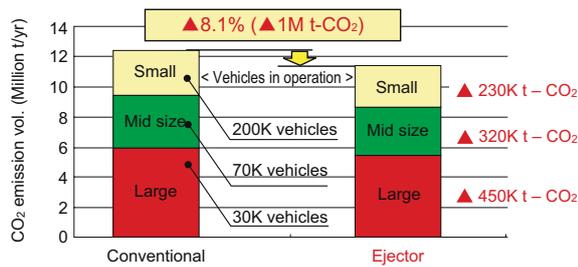


Fig. 15 Greenhouse gas reduction effect of Ejector Cycle® refrigerator

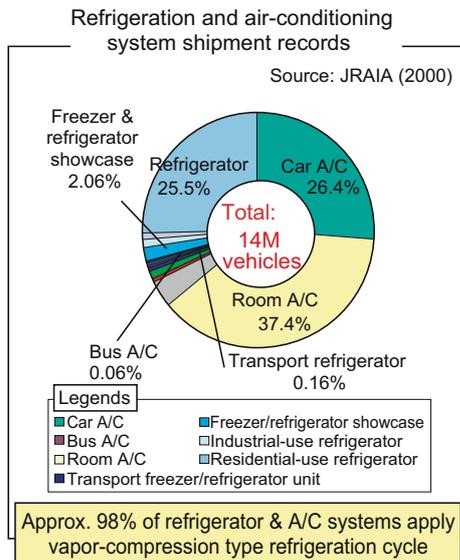


Fig. 16 Domestic shipping Vol. of refrigeration A/C equipment

10. まとめ

- (1) 従来、蒸気圧縮式サイクルで失われていた膨張損失エネルギーをコンプレッサ動力に回収することで、省動力できるエジェクタサイクル®の開発に取り組み、大幅な冷凍能力向上と省動力を得られるエジェクタサイクル®冷凍機を製品化した。
- (2) 本技術はすべての蒸気圧縮式サイクルで活用できる技術であり、家庭用自然冷媒 (CO₂) 給湯機「エコキュート」(2003年07月製品化)にも搭載しており、次世代の冷凍サイクルとして期待できる。今後、カーエアコンなどの車両用空調装置、定置式空調・冷凍・給湯装置など幅広く適用検討を進める。
- (3) 本製品は、2003年06月製品化済。

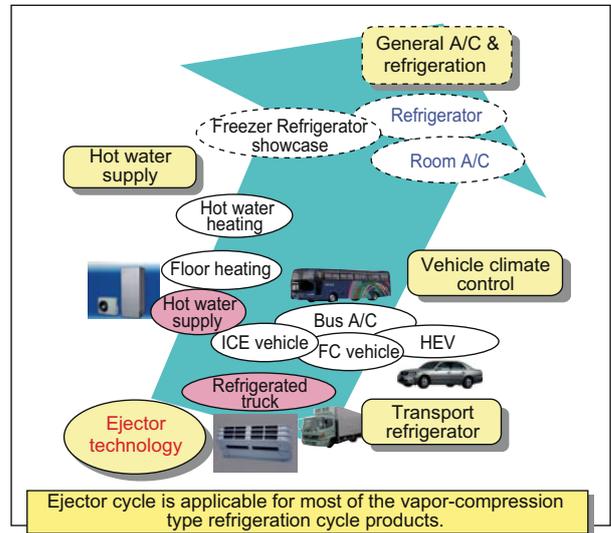


Fig. 17 Applicable areas of Ejector Cycle®

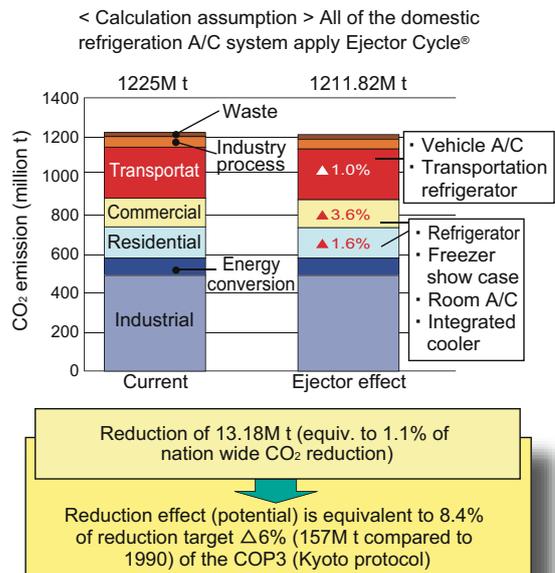


Fig. 18 Global warming suppression effect of Ejector Cycle®

<参考文献>

- 1) 管内高速ミスト噴流の混合性能に関する研究, 中川, 武内他, 日本機械学会論文集 60 巻, 575 号, B 編, (平成 6 年 7 月) pp. 316-321.
- 2) 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, 中川, 武内他, 日本機械学会論文集 64 巻, 625 号, B 編, (平成 10 年 9 月) pp. 304-311.
- 3) 高効率エジェクタサイクル冷凍機, 武内, 西嶋他 冷凍 2004 年 6 月号別冊 pp. 431-432.
- 4) World' First high Efficiency refrigeration Cycle with Two-phase Ejector 'EJECTOR CYCLE', Takeuchi, Nishijima, Ikemoto, SAE2004 Congress SEA international SP-1859, 2004-01, pp. 39-42.
- 5) 日本自動車研究所, 自動車研究, 第 20 巻, 第 11 号 (1998) 重量ディーゼル車の燃費推定法の検討ー空気抵抗係数の推定ー, 細井他.
- 6) 日本自動車研究所, 自動車研究, 第 20 巻, 第 11 号 (1998) 重量ディーゼル車の燃費推定法の検討ーころがり抵抗係数の推定ー, 細井他.
- 7) 日本自動車研究所, 自動車研究, 第 20 巻, 第 11 号 (1998) 重量ディーゼル車の燃費推定法の検討ー走行抵抗値とエンジン燃費マップによる車両燃費の推定ー, 細井他.
- 8) 日本自動車研究所, 自動車研究, 第 25 巻, 第 04 号 (2003) 重量ディーゼル車の燃費シミュレーション, 細井他.

<著 者>



武内 裕嗣
(たけうち ひろつぐ)
冷暖房事業部
カー A/C の開発に従事



西嶋 春幸
(にしじま はるゆき)
熱システム開発部
エジェクタの開発に従事



池本 徹
(いけもと とおる)
空調冷熱技術 1 部
冷凍機の開発に従事



池上 真
(いけがみ まこと)
熱システム開発部
エジェクタの開発に従事



松永 久嗣
(まつなが ひさつぐ)
冷暖房実験部
冷暖房の実験に従事



神谷 博
(かみや ひろし)
電装 (中国) 投資有限公司
上海テクセン所長