

車両用小型吸収冷凍機の開発

江端 佑介
Yusuke Ebata坪内 修
Osamu Tsubouchi

概要

現状のエンジン車においては燃料のエネルギーの約60%が未利用熱として捨てられており、排ガス熱を回収して空調に利用することで年間約12%の燃費向上が期待される。筆者らは、排熱で冷房することができる吸収冷凍機の小型・軽量化・車両環境(傾斜,揺れ,高温度)といった車載対応開発を行い、車載吸収冷凍機システムを確立・実用化し、将来的に燃費を大幅に向上することを目指している。本稿では、車載時に主な課題となる吸収器の開発事例を中心に、吸収冷凍機の車載に向けた開発状況を紹介する。

1. はじめに

現在、自動車の冷房はエンジンでコンプレッサを駆動する圧縮式冷凍機を用いている。そのため、冷房時には走行以外に空調のためにエンジンでコンプレッサを作動させる燃料が必要となる。この結果、冷房時の燃費は非冷房時に対し5~50%程度悪化するとの報告もある¹⁾。

一方、自動車においては燃料のエネルギーの約60%が排熱として捨てられ、未利用の熱エネルギーとなっている。従って、自動車の排熱を回収して冷房用のエネルギーとして利用する事が出来れば燃費向上が期待できるため、筆者らの研究グループでは、熱駆動型の冷凍機である吸収冷凍機に着目し、排ガス95℃以上で冷媒温度5℃以下の冷熱を得る車両向けの小型吸収冷凍機の開発を行っている。

2. 吸収冷凍機について

吸収冷凍機の原理図を図1に示す。図のように、吸収冷凍機は主に、吸収器、再生器、凝縮器、蒸発器で構成される。内部の作動媒体は吸収液と冷媒である。蒸発器で冷媒を蒸発させ、その気化熱を冷熱として取り出す。吸収器では、吸収液により蒸発器で気化した冷媒蒸気を吸収する。吸収によって吸収液は希釈されるとともに発熱するため、吸収液を吸収器内の熱交換器で冷却し、温度上昇による吸収能力低下を防いでいる。再生器では希釈吸収液の濃縮を行う。熱源により吸収液を加熱することで、吸収した冷媒を蒸気として分離することにより濃縮する。濃縮吸収液は、再生器と吸収器の内部圧力差で吸収器に供給される。凝縮器では、再生器からの冷媒

蒸気を大気温度まで冷却し凝縮する。凝縮冷媒は凝縮器と蒸発器の内部圧力差で蒸発器に供給される。

以上の原理から、再生器に100℃程度の熱供給を行うことで、蒸発器で5℃程度の冷熱が得られ、冷房に利用することが出来る。上記の一般的な装置構成では、吸収器と再生器はそれぞれ蒸発器と凝縮器に蒸気流路で結ばれている。吸収液と冷媒が蒸気流路を介し混合した場合、原理が成立しなくなる事もある。

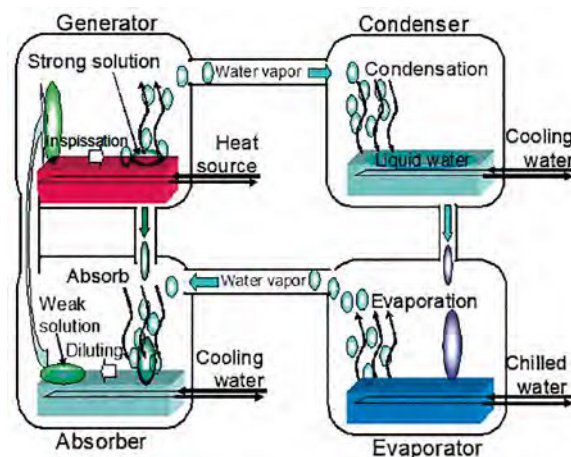


図1 吸収冷凍機の原理図

このような吸収冷凍機は、現在オフィスビル等に大型機が設置され、主にガス焚きによる熱で駆動されている。オフィスビル等に設置される空調用吸収冷凍機の開発は、これまで数十kW以上の大型システムが中心であり、出力密度は、体積基準で30~40kW/m³、質量基準で0.05~0.06kW/kgとなっている。大型機の設置事例を図2に示す²⁾。



図2 定置型吸収冷凍機の設置例

3. 車両への搭載技術開発課題と対応

吸収冷凍機を車両に搭載した場合、再生器に車両排熱を供給し、蒸発器で生じる冷熱を利用して冷風を得ることが可能となるため燃費向上が見込まれる。図3に吸収冷凍機の子載模式図を示す。

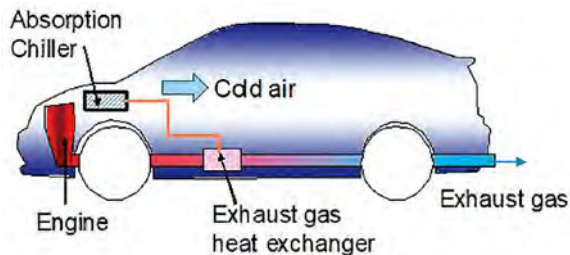


図3 吸収冷凍機の子載模式図

子載用空調の場合、必要とされる出力は数kW程度であり、定置用に比べ小型である。しかし、子載の排熱を利用し、さらに子載可能な条件を考えると、体積および重量あたりの出力はそれぞれ50kW/m³、0.1kW/kg以上は必要となり、いずれも定置型吸収冷凍機よりも20～150%ほど出力アップしなければならず、大幅な小型・軽量化が必須条件となる。

また、子載に搭載し利用可能にするためには、子載の傾斜、振動などの子載環境への対応など、定置型では考慮する必要のない様々な制約条件が課され、それぞれの課題に対する対応が求められる。

3.1 塗布構造吸収器

主な課題の一つとして、吸収器が挙げられる。定置用に多く採用されている吸収器は重力を利用して作動媒を熱交換器に滴下する流下液膜式であるが、子載の走行中などに傾斜する場合、性能を保持することが困難である。そこで、課題を解決するために吸収器内部に回転塗布体を設け、熱交換器表面に吸収液を塗布する新たな構造を提案し、基礎特性および有用性を確認した。

図4に従来構造吸収器(a)と開発構造吸収器(b)の比較図を示す。

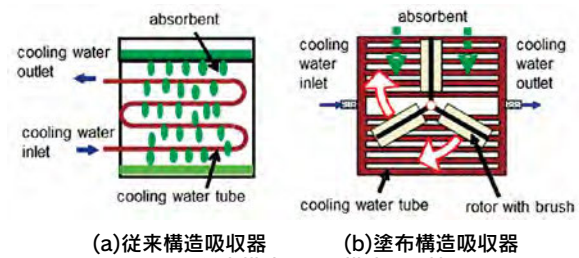


図4 従来構造と開発構造の比較

3.1.1 回転塗布による伝熱性への影響計算

塗布体を回転する事による熱伝達への効果を推定するため、Azooryら³⁾による熱交換器の表面を掻面羽根で掻取ること伝熱面に流体の薄膜を形成する掻面式熱交換器の単層流の熱伝達係数 h_i を式(1)、(2)から計算した。

$$h_i = \frac{2}{\sqrt{\pi}} (Cp \cdot \rho \cdot \kappa \cdot n \cdot N)^{1/2} \cdot \frac{1}{f} \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{500} \left(\frac{Cp \cdot \mu}{\kappa} \right) + 3.5 \quad (2)$$

n : 羽根枚数, N : 羽根回転数[rev/hr], Cp : 流体比熱[kJ/kg], ρ : 流体密度[kg/m³], κ : 流体熱伝導率[kJ/m·K], μ : 流体粘性係数[Pa·s]

計算結果を図5に示す。熱伝達率は回転増大に伴って増大する事を推定し、塗布体の回転により伝熱性の向上＝小型化への効果も期待できる事を確認した。

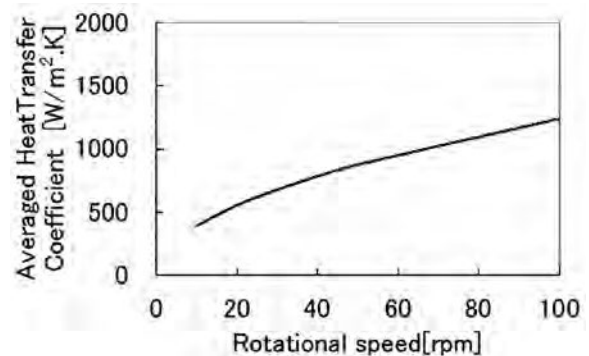


図5 塗布体回転数の熱伝達率への影響計算結果

3.1.2 塗布構造吸収器の実機評価

実験装置全体を図6に示す。吸収液は再生器、液液熱交換器で濃度と温度を調整し吸収器に供給、吸収器への冷却水入口温度および流量はチラーにて一定になるよう制御した。蒸発器の条件を一定に保つため、冷媒温度はチラーにて一定に制御した。吸収器入口出口の吸収液、冷却水温度はT熱電対、吸収液密度、流量はコリオリ流量計にて計測した。

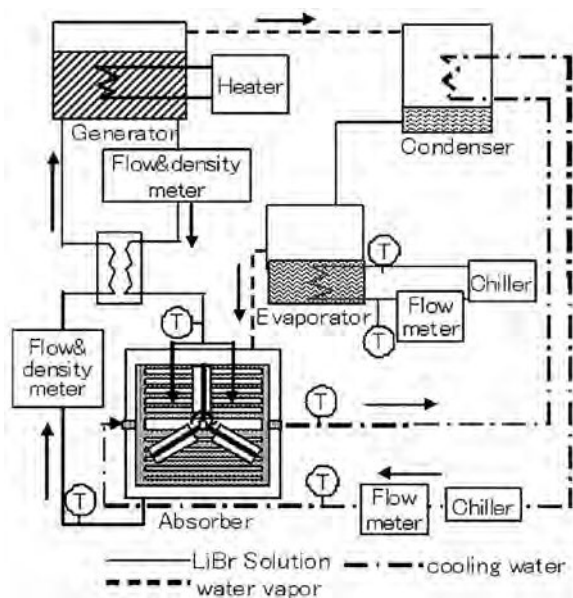


図6 実験装置構成

図7に実験で得られた回転塗布体の回転数が吸収熱および吸収器出入口での吸収液濃度差への影響を示す。ここで吸収熱は最大吸収熱量に対する比率を用いた。回転数の増大とともに吸収熱量率も濃度差も向上する事がわかる。また、実験結果を基に計算した熱通過率、平均物質伝達率についても、塗布体回転数に対して向上していることを確認しており、回転数増加により熱および物質伝達が向上する事がわかった。

一方、100rpm以上の高回転域では、計算上は性能向上が見込まれるものの、実機では吸収液が飛散により冷媒へ混入し性能が低下するため、高回転化への対応が課題となることも明らかになった。

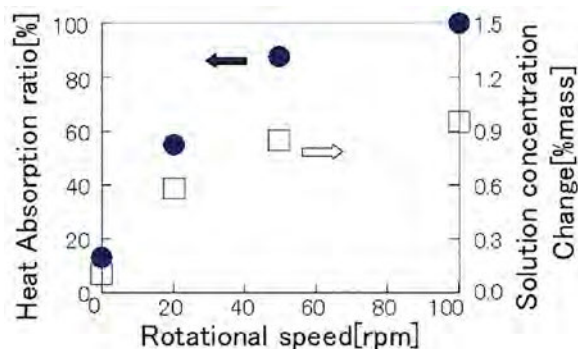
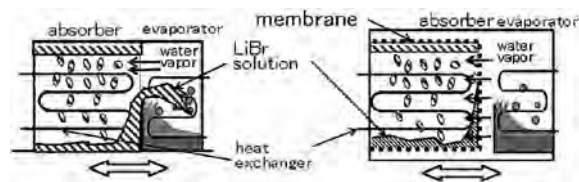


図7 実機評価結果

3.2 メンブレンラッピングアブソーバ

塗布構造吸収器の回転体の高回転時や車載時の振動や加減速などによって、作動媒体がスロッシングした場合、吸収器と蒸発器を繋いでいる冷媒蒸気の流路を通して媒体が混合し(図8(a)), 性能を維持することが困難になる。そこで、吸収液の流出を防ぎ、冷媒蒸気のみを透過する蒸気透過膜で吸収器を覆う(図8(b))新たな構造(メンブレンラッピングアブソーバ)の開発を行っている。



(a)従来構造吸収蒸発器 (b)メンブレンラッピングアブソーバ
図8 従来構造と開発構造の比較

3.2.1 蒸気透過膜の要求性能

目標冷熱を満たす冷媒蒸気量を透過する膜の検討をするために、膜に必要な諸元を計算した。膜を透過する蒸気量はDarcy則⁴⁾より、式(3)のように表される。吸収器内に設置する膜は真空状態で使用するためKnudsen拡散モデル⁵⁾を用いると、透過係数は式(4)のように表される。

$$J_v = Bm(P_e - P_{p, m, s}) \quad (3)$$

$$Bm = 1.064 \frac{r_{p, m, s} \phi}{\delta \tau} \left(\frac{M}{RT_{mean}} \right)^{0.5} \quad (4)$$

図9に計算結果を示す。圧力差は塗布型吸収器の評価結果⁶⁾を用い、上式から透過係数Bmを変化させて透過蒸気量Jvを計算した。結果、我々の目標とする車両用の冷熱相当の蒸気透過量500[g/m²・min]を満たすためには透過係数Bmが2×10⁻⁵ [kg/m²・s・Pa] 以上となる諸元の膜を選択する必要があることがわかった。

また、液の流出を防ぐために、再生器と吸収器それぞれの吸収液の飽和圧力差である10kPa程度の液圧が膜にかかっても液が染み出さないことを要求仕様とした。

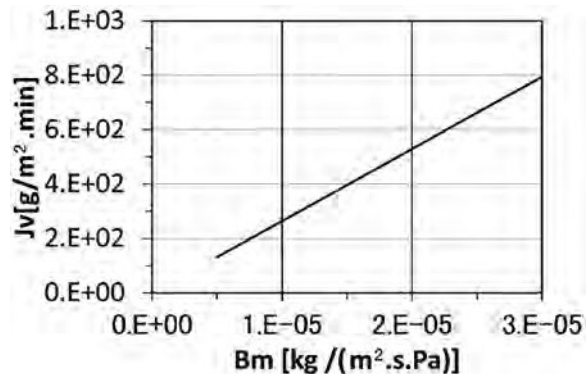


図9 透過係数と蒸気透過量の関係

3.2.2 メンブレンラッピングアブソーバの実機評価

膜は防水性、蒸気透過性についての基礎評価で絞り込んだ平均細孔径5~10 μm、厚さ100~250 μm、染み出し圧10kPa以上の樹脂膜から透過係数Bmが2.0×10⁻⁵、1.5×10⁻⁵、1.0×10⁻⁵相当の膜A、B、Cを選択し、実機に設置した。蒸気透過膜は袋状とし、吸収器を覆うように被せて取付け、フランジ部でシールした。吸収液は膜の内側下部に一定量溜め、塗布体でプレートに塗

布する。膜内部で生じる吸収液のスロッシングや、塗布体による液滴の飛散は、膜によって外部への流出を防ぎ、水蒸気のみが膜内部に流入する構造とした(図10)

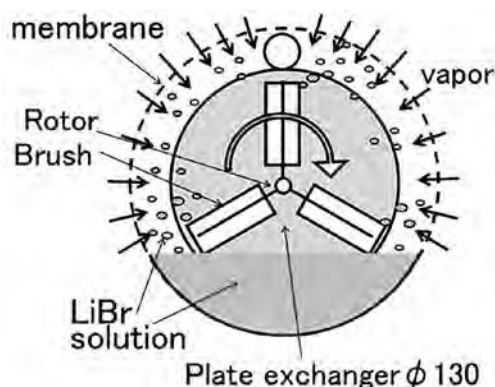


図10 メンブレンラッピングアブソーバ構造

図11に実験で得られた透過蒸気量 J_v と塗布体回転数の関係を示す。前述した計算結果のように透過係数が大きい膜ほど透過量は増大する傾向を示した。回転数に対しては膜Cのみ高回転域で透過量が減少した。塗布型吸収器は、塗布体の回転数増大により吸収器の熱・物質伝達能力は増大するが、塗布体の攪拌や遠心力による液の飛散量が増大し膜表面への付着量も増大する。一般的な膜の場合、膜に接液した状態では蒸気の透過性能が低下する傾向があるため、膜Cでは吸収液が付着後、流動し難い状態になっていると推察する。

図12は膜なしの場合の最大吸収熱量と冷媒温度(回転数100rpm)に対して、各膜の吸収熱量の比と、冷媒温度の差を示す。また、図13は膜内部の吸収液飽和圧力と膜外部の冷媒蒸気雰囲気圧力の差を示す。それぞれ塗布体回転数に対して整理した。透過係数が大きい膜ほど吸収熱量比は大きく、冷媒温度も低くなり吸収性能は向上した。図13のように膜差圧は透過係数が大きいほど小さくなっていることから、膜内の吸収液飽和圧力が膜外に伝わりやすくなり、冷媒温度が下がったと考える。膜Cは前述のように吸収液飛散による付着の影響で高回転域では吸収性能は低下し、差圧は増加したと思われる。一方、最も透過係数の高い膜Aの場合は、塗布体回転数150rpm以上の場合、吸収熱量比、冷媒温度差ともに膜なしの場合を上回る結果となった。膜Aは液滴飛散の大きな影響を受けず、塗布型吸収器の高回転での吸収性能向上の効果が表れたと思われる。

以上のことから、膜の透過係数に加え、膜表面の液滴の流動性が性能に影響を及ぼすことがわかった。

膜からの液の染み出しは、評価中および終了後、目視により膜表面を確認した結果、膜A、B、Cいずれも流出がないことを確認した。

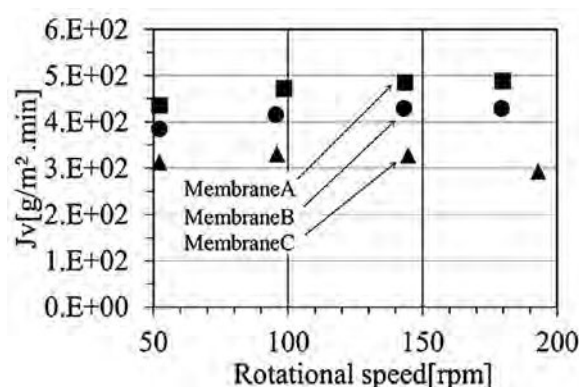


図11 実験結果(蒸気透過率)

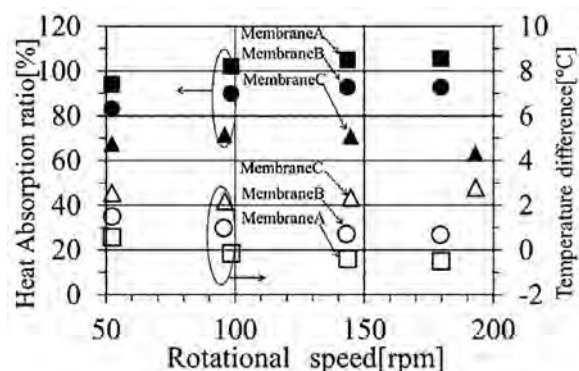


図12 実験結果(吸収能力と冷媒温度)

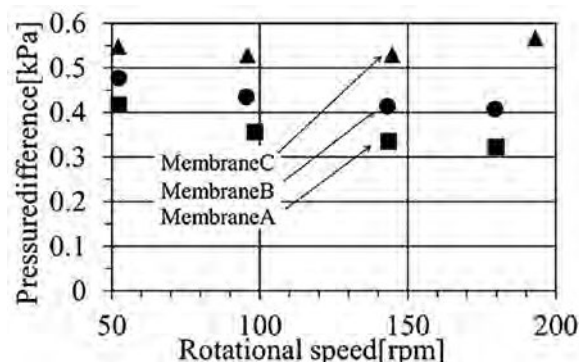


図13 実験結果(膜内飽和圧力と膜外圧力差)

以上の結果から、蒸気透過性能と液の染み出し圧は背反し、使用条件によって最適な膜を選択する必要があることがわかった。吸収器に用いる場合、防水性、透過係数に加え、膜表面の液付着の影響を考慮する必要がある。適した膜を用いることで媒体の混合が抑えられ、特に塗布型吸収器の場合は、液の飛散を心配することなく回転数を増大することが可能になり、性能向上につながることがわかった。今後、さらに高回転域での性能向上と、膜表面の付着回避について検討を行う。

3.3 小型・軽量化対応技術開発

従来定置型の吸収冷凍機には、銅、鉄あるいはステンレス材が用いられている。また、容器の壁の肉厚も大きいため軽量化が困難となっている。そこで、大幅な軽量化のために、重量をステンレスの65%程度に低減でき

るアルミ材を使用した吸収冷凍機を開発している。アルミ材使用により腐食の影響が懸念されるため、表面処理方法および作動媒体に添加する腐食抑制剤の検討など、腐食対策技術の開発も行っている。

3.4 車載環境(温度)への対応技術開発

車両搭載温度環境下では、一般的に吸収冷凍機で吸収液に用いられる臭化リチウム(LiBr)水溶液では吸収性能の低下が予想されるため、産業技術総合研究所と共同で新たな作動媒体の開発を行っている。現在、候補となる媒体の温度、濃度に対する物性値を計測し、物性値から候補の絞り込みを行っている。

4. 開発現状と今後の展望

塗布構造吸収器やメンブレンラッピングアブソーバをはじめ、これまでに開発を行った装置を車両に搭載するために、装置をレイアウトしたシステムを開発し、開発した新作動媒体を使用し排ガス熱を回収して冷熱を発生するプロトタイプを完成させている⁷⁾。

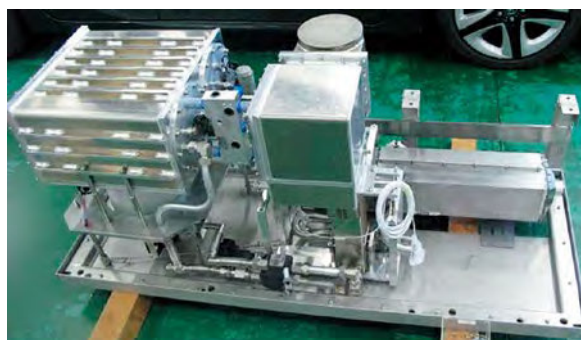


図14 車両搭載システム



図15 車両搭載外観

今後、開発した車載吸収冷凍機を評価し、車両排ガス、走行風、環境などによる影響や、吸収冷凍機の車両への影響を調べ、吸収冷凍機を車両システムに組み込むための課題を抽出し、実用化に向けた開発を行っている。

5. おわりに

本研究を進めるにあたり、多大なご協力を賜りました東京大学、産業技術総合研究所の先生方をはじめ、関係者の方々に深く感謝いたします。この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものです。

参考文献

- 1) 羽二生ら, 自動車技術会論文集, Vol.44, No.2, 715(2013)
- 2) パナソニック産機システムズ(株)ホームページ, <http://panasonic.co.jp/ap/pces/case/tokyodome.html> の図から転載
- 3) S. Azoory and T.R. Bott, Can. J. Chem. Eng., 48, 373 (1970).
- 4) Luis Pena, M. Paz Godino, Juan I. Mengual, "A method to evaluate the net membrane distillation coefficient." Journal of Membrane Science 143, pp.219-233(1998)
- 5) Hongwei Fan, Yuelian Peng, "Application of PVDF membranes in desalination and comparison of the VMD and DCMD processes." Chemical Engineering Science 79, pp.94-102(2012)
- 6) 富田ら, 日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, C133-1(2015)
- 7) NEDOニュースリリース
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101274.html

筆者



江端 佑介

第一機関技術部 先行開発グループ
車両用小型吸収冷凍機開発に従事



坪内 修

第一機関技術部 先行開発グループ
車両用小型吸収冷凍機開発に従事