

## TED Plaza

## 冷媒の転換に向けた研究 ドロップイン評価



大野 慶祐

早稲田大学 研究院客員助教  
 理工学研究所  
 k.ohno@aoni.waseda.jp

## 1. はじめに

冷凍空調機器に使用されている冷媒の歴史は、私なりに分類すれば大きく3つに分かれる。まず、1930年代以前、次に1930年代から1987年まで、最後は1987年から現在である。1930年代以前は、エーテルやアンモニアといった、元々自然界に存在していた媒体が冷媒として用いられていた。エーテルやアンモニアには可燃性や毒性があり安全な冷媒が望まれていた。そこで、1930年代になるとCFC（クロロフルオロカーボン）が開発され、やがてHCFC（ハイドロクロロフルオロカーボン）も開発された。これらは毒性がなく、きわめて安定（つまり不燃）であるため、冷媒として広く普及した。しかし、CFCとHCFCはオゾン層を破壊することが徐々に明らかとなり、1987年のモントリオール議定書(Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Montreal, 1987)の採択により規制されることとなった。かくして人類はCFC、HCFC系冷媒に替わる新たな冷媒への転換を決断した。

モントリオール議定書採択後、オゾン層を破壊しないHFC（ハイドロフルオロカーボン）への転換が試みられ、我が国においてはHFC系冷媒が主流となった。しかし後に、モントリオール議定書はオゾン層を破壊する冷媒だけでなく、地球温暖化に寄与する冷媒も規制対象とする改正が行われた。このため、2036～2047年頃には現在用いられている冷媒のほとんどは使用できなくなる(Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, 2016)。

2036年というとずいぶんと先の話しに聞こえるが、実は待ったなしの状況である。我が国はHCFCからHFC系冷媒への転換を済ませつつある。しかしこれには長い時間がかかり、日本冷凍空調工業会の調べ(日本冷凍空調工業会, 2017)によると約20年程度と読み取れる。時間がかかる理由としては大きく2つ挙げられる。理由の一つ目は、新冷媒を使用し始めるには時間がかかることである。リスクアセスメント、法整備、新冷媒の生産体制の構築、新冷媒を用いた機器の開発などのためである。理由の二つ目は、規制対象冷媒の使用を突然やめることができないということである。冷凍空調機器の寿命は長いため、たとえ新冷媒が実用化されたとしても、既設の冷凍空調機器は従来のHCFCやHFC系冷媒を使用し続けなければならない。将来的に冷媒の大転換は必須であり、本稿では冷媒転換の1つの手法であるドロップインとその評価について紹介する。

先に述べたように、CFC系、HCFC系、HFC系冷媒は冷凍空調用途に広く普及した。そして、これらの冷媒を新冷媒へ転換することは容易では無い。冷媒を転換する手法の1つとしては、ドロップインというものがある。ドロップインとは、既存の冷凍空調機器に本来使用されるべき冷媒ではない冷媒を封入することである。同時に、新冷媒に順応させるために機器に軽微な改良を加えることがある。ドロップインの利点としては、軽微な改良のみで既存の冷凍空調機器を新冷媒に適応させることができる点である。しかしながら、冷媒をドロップインしただけでは、設計上想定された冷媒とは異なる冷媒を封入することになるため、冷房能力や冷媒の圧力損失といった冷凍空調機器の特性が大きく変化し、冷媒として本来実現可能な性能を得ることが困難であることは容易に予想できる。

これまでのドロップインに関する研究では、その多くは CFC 12 や HCFC 22 からの転換を目的としている（例えば, Aprea and Maiorino, 2011, Park et al., 2009, Devotta et al., 2005）. これは CFC 12 と HCFC 22 が冷凍空調用途として過去に広く普及したからに他ならない. そのため, 現在主流である HFC 系冷媒に関する研究はまだ少なく, 今後増加すると考えられる. そこで, 本稿では, 今後転換が求められている HFC 冷媒（今回は R 410A）からの転換を想定し, 炭化水素系冷媒をドロップインした効果について紹介する.

## 2. 冷媒物性からドロップイン結果の予測

本稿では HFC 系冷媒である R 410A 用に開発された一般的なルームエアコンに炭化水素系冷媒である HC 600a をドロップインした場合の性能評価を紹介する. ここでは, ドロップインの結果を示す前に, R 410A と HC 600a の熱物性値から理想的な冷凍サイクルについて述べる. 各冷媒を用いた場合の理想的な COP, 冷媒比体積, 蒸発過程冷媒出入口の比エンタルピ差などから, 実際に実機に HC 600a をドロップインした場合の COP, 冷房能力, 消費電力の変化について検討する.

表 1 に R 410A と HC 600a について, ルームエアコン冷房運転を想定した条件として, 蒸発温度 10°C, 凝縮温度 45°C, 凝縮出口過冷度 5K, 蒸発出口過熱度 5K, 圧縮機断熱効率 1.0 で熱交換器の圧力損失を無視した場合の理想的な圧縮式冷凍サイクルの COP, 圧縮機吸込み比体積, 蒸発器冷媒出入口の比エンタルピ差, 冷房能力あたりの冷媒循環量を示す. また, それぞれの冷媒の Ph 線図を図 1 と 2 に示す.

結果から, HC 600a は R 410A と比較して理想 COP が約 1.1 倍, 圧縮機吸込み比体積が約 7.0 倍, 蒸発過程冷媒出入口比エンタルピ差が 1.7 倍であることがわかる. これら検討結果より, 実際に HC 600a をドロップインした場合に以下のことが予測される.

- ・ 圧縮機を同一行程容積で運転した場合, 冷房能力については, HC 600a の蒸発過程冷媒出入口の比エンタルピ差が大きいため, 冷媒循環量あたりの冷房能力は大きい, 比体積が大きいため十分な冷媒循環量が得られず, 圧縮機動力も低下するが冷房能力も大幅に低下することが予想される.
- ・ HC 600a の理想 COP は R 410A よりもわずかに大きい. しかし, HC 600a は比体積が大きく, 蒸発器やガス配管など, 気体冷媒の流速が大幅に増大し, 圧力損失が増大するため, COP が逆に低下することすら十分に予想される.

以上のように, R 410A 用ルームエアコンに HC 600a をドロップインすることにより, 冷房能力と消費電力の大幅な低下が容易に示唆される. また, COP については, 向上する要因と低下する要因が存在するため, シミュレーション等による十分な評価が必要である.

Table 1 Comparison in theoretical refrigeration cycle

|  | R410A   | HC 600a |
|--|---------|---------|
| Theoretical COP, -   | 6.40    | 7.13    |
| Compressor inlet specific volume, m <sup>3</sup> /kg         | 0.0248  | 0.174   |
| Evaporator specific enthalpy difference, kJ/kg               | 164     | 280     |
| Refrigerant flow rate per a unit cooling capacity, kg/(s·kW) | 0.00610 | 0.00357 |

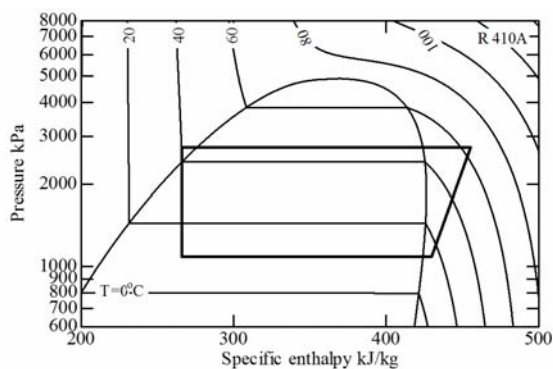


Fig. 1 P-h diagram of theoretical refrigeration cycle (R 410A)

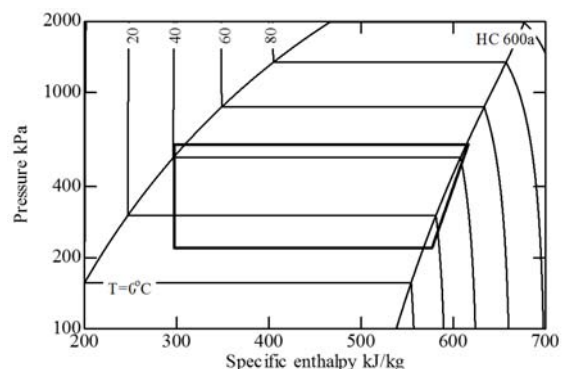


Fig. 2 P-h diagram of theoretical refrigeration cycle (HC 600a)

### 3. 実験とシミュレーションによる冷媒のドロップイン評価

本節では実験とシミュレーションによる評価について述べる。シミュレーションと実験の詳細は文献(Ohno et al., 2013a, 2013b)を参照されたい。なお、以降の結果では R 410A を用いた場合を基準とするために 100%として記述している。

夏期の標準的な冷房条件での試験結果を表2に示す。図3に R 410A の Ph 線図を、図4に HC 600a をドロップインした場合の試験とシミュレーション結果を Ph 線図上に示す。HC 600a では圧縮機行程容積の不足から冷媒循環量が低下し、冷房能力は 69%低下した。また、圧縮機動力は 74%低下した。これは冷房能力が低下したため、相対的に冷房能力あたりの熱交換器の体格が大きくなり、十分に熱交換が行えたからである。そのため、HC 600a の COP が R 410A に比べて 22%高くなった。このように COP は向上するように見えるがこれは冷房能力低下があるからである。

Table 2 Result of drop in experiment (Coogling condition)

| Refrigerant                  | R 410A (Original) | HC 600a (Drop-in) |
|------------------------------|-------------------|-------------------|
| Cooling capacity, kW         | 2.84              | 0.887 (↓69%)      |
| Electric input, kW           | 0.692             | 0.177 (↓74%)      |
| COP, -                       | 4.11              | 5.00 (↑22%)       |
| Condensation temperature, °C | 42.5              | 36.6 (↓5.9°C)     |
| Evaporation temperature, °C  | 17.8              | 23.7 (↑5.9°C)     |

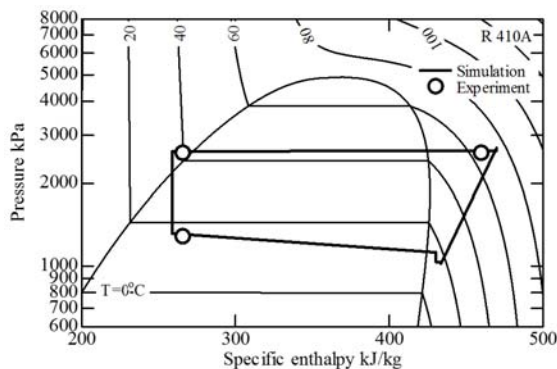


Fig. 3 Results on Ph diagram (Cooling condition of R 410A)

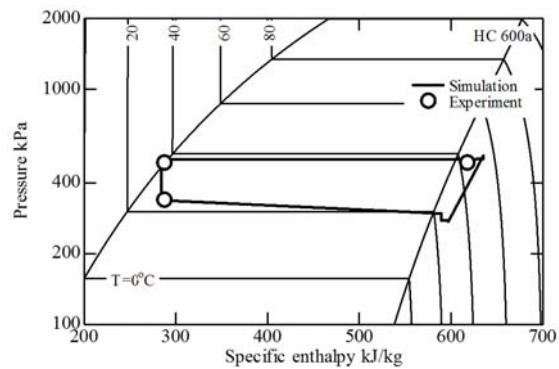


Fig. 4 Results on Ph diagram (Cooling condition of HC 600a)

上記の結果はドロップイン試験であるため、試験上の制約から必ずしも同一の条件では比較できない。そこで、冷房能力を同一とした場合にどのようなようになるかをシミュレーションによって検討する。そこで、運転条件を変化させ、同一の冷房能力とした場合の評価を行う。R 410A と HC 600a それぞれにおいて冷房能力をパラメータとして変化させた場合について述べる。すなわち、R 410A と HC 600a それぞれにおいて、同じ冷房負荷を処理した場合の評価である。

図5に結果を示す。HC 600a をドロップインした場合は、消費電力が増大したが、冷房能力は同一であるため、COP が低下した。

例えば冷房能力 1kW の場合では、消費電力は約 32%増大し、COP が約 24%低下している。これは、同一の冷房能力を得るためには、気体冷媒が流れる蒸発器やガス配管内の冷媒流速が大きくなり、圧力損失が増大し、圧縮機消費電力が増大するためである。

蒸発器では冷房能力の増加とともに圧力損失が増大していることが確認できる。表1および図1,2に示す結果では、理想的には COP の向上が予測されたが、現実的には圧力損失が増大することから、COP が低下する結果となった。

このように、理想的には性能がよい冷凍サイクルとなる冷媒でも、その冷媒を想定して設計されていない機器にドロップインしただけでは性能が低下することになることが示された。

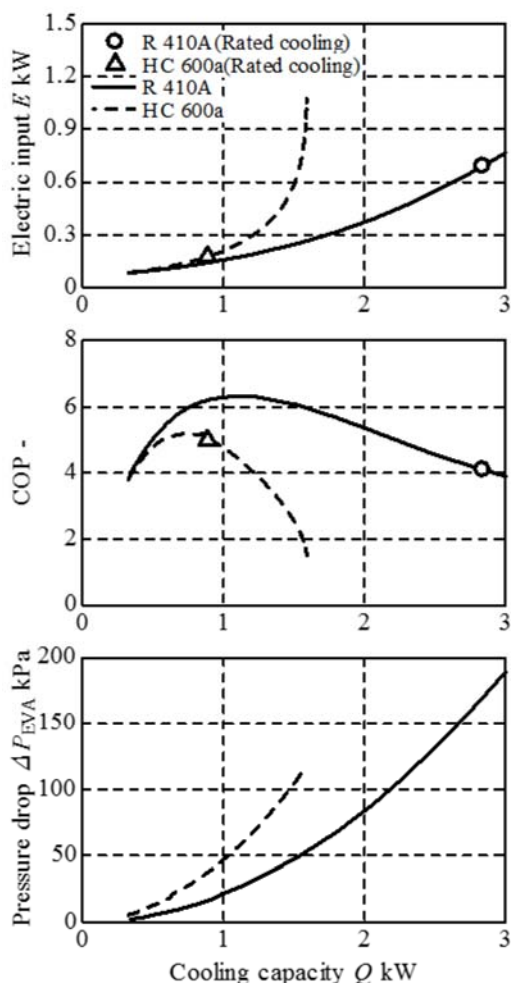


Fig. 5 Cooling capacity versus electric input, COP and pressure drop

本稿ではHC 600aをドロップイン冷媒としたR 410A用ルームエアコンの性能評価を実施した。同時に数値シミュレーションによって、その性能を比較した。その結果、次のような結論に至った。

- ・ 定格冷房条件では、HC 600aをドロップインした場合には、冷房能力が69%、消費電力が74%低下し、COPが22%向上した。
- ・ 同一の冷房能力で比較すると、HC 600aをドロップインした場合は消費電力が増大し、COPが低下した。これは、比体積が大きく、蒸発器などで冷媒圧力損失が増大し、圧縮機消費電力が増大したためである。

以上のようにHC600aは理想的には高性能を達成できるが、単純にドロップインしただけでは性能が低下することが明らかとなった。HC 600aを用いた実機を実用化するためには、その設計方法について十分な議論が必要である。また、ここでは触れなかったが、COPや冷房能力だけではなく、毒性や可燃性といった安全性についても十分な配慮が必要であることはいうまでもない。

#### 4. おわりに

本研究で実施した評価は、冷媒のみならず、冷媒と機器との両方の特性を考慮する必要がある。理想的には高性能を達成できる冷媒であっても、機器特性との兼ね合いによってはそうならない場合もある。このような評価については、実験及びシミュレーションによって慎重になさなければならない。

数値シミュレーションについては今後ますますその重要性が増すと考えられる。なぜならば、冷媒をすぐに転換できない理由で説明した通りに、新冷媒が提唱されたとしても、生産体制や一定の安全性が確認されなければ、実際に冷媒を入手することさえできない。また仮に、生産体制

が整い、安全性が確認され、冷媒を入手できたとして、冷凍空調機器の性能試験をしてみたところ、実用化にはほど遠い性能しか発揮できなかった、という場合も考え得る。数値シミュレーションであれば、これらの問題解決を待たずして、実際に冷媒をドロップインした状況を想定した評価ができるのである。

将来に渡って様々な冷媒が提案され、その評価は困難を極めることが予想されるが、今後もこの課題に挑戦する予定である。

## 謝 辞

この研究成果の一部は、早稲田大学理工学研究所の研究課題「次世代ヒートポンプ技術に関する研究」を推進することによって得られたものであり、ここに記して謝意を表す。

## References

- (1) Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Montreal, 16 September (1987).
- (2) Amendent to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, Kigali, 15 October (2016).
- (3) 冷凍空調機器の冷媒ストック量（推計）と排出量（推計）について、日本冷凍空調工業会, available from < <https://www.jraia.or.jp/flon/estimate.html>>, (参照日 2017年1月7日).
- (4) Aprea, C. and Maiorino, A., An experimental investigation of the global environmental impact of the R22 retrofit with R422D, *Energy*, Vol. 36, No. 2 (2011), pp. 1161–1170.
- (5) Park, K.-J., Shim, Y.-B. and Jung, D., Experimental performance of R432A to replace R22 in residential air-conditioners and heat pumps, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 2–3 (2009), pp. 597–600.
- (6) Devotta, S., Padalkar, a. S. and Sane, N. K., Performance assessment of HC-290 as a drop-in substitute to HCFC-22 in a window air conditioner, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 28, No. 4 (2005), pp. 594–604.
- (7) Ohno, K., Saito, K., Yamaguchi, S., Kishimoto, T. and Matsumoto, K., Intermittent Driving Simulation of Compression type Heat Pump (1st Report) Mathematical model and simulation of single-stage vapor compression type heat pump, *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, Vol. 30, No. 2 (2013a), pp. 107–122. (in Japanese)
- (8) Ohno, K., Kimura, T., Yamaguchi, S., Saito, K., Itonaga, S., Matsuda, K. and Kishimoto, T., Performance Evaluation of HC600a as a Drop-in Replacement for R410A in Room Air Conditioner, *Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, Vol. 30, No. 4 (2013b), pp. 389–399. (in Japanese)