

機能性塗料による熱交換器の無着霜化技術

Frost-Free Technology for Heat Exchangers Using Functional Coating

小川 莉玖 OGAWA, Riku

水澤 竜也 MIZUSAWA, Tatsuya

滝口 浩司 TAKIGUCHI, Koji

近年、省エネルギー（省エネ）が一層重要な社会課題となる中、店舗用冷熱機器のショーケースにも省エネが求められている。そこで、ショーケースに搭載される熱交換器において効率低下の要因である着霜を防止するため、機能性塗料を用いた無着霜化技術を開発している。この機能性塗料は、0℃以下でも水が凍結しない状態（過冷却）を促進可能な塗料である。今回は、熱交換器表面を模擬したアルミニウム小片にて、機能性塗料の塗膜が結露した液滴の過冷却を促進することを明らかにした。

In recent years, as energy saving has become an increasingly important social issue, refrigerated showcases in stores have been required to save energy. In response, Fuji Electric has been developing frost-free technology that uses functional coating to prevent frosting, which is an efficiency lowering factor in the heat exchanger of showcases. The functional coating can promote a state in which water does not freeze even at 0℃ or lower (supercooling). We found that a functional coating film promotes supercooling of condensed droplets on small test pieces of aluminum simulating the surface of a heat exchanger.

1 まえがき

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて省エネルギー（省エネ）がより一層重要な社会課題となっており、富士電機が提供する店舗用冷熱機器のショーケースにも省エネが求められている。ショーケースはこれまでも庫内を冷却するエアカーテンや冷却機能を阻害する霜取り（除霜）を最適化して、省エネを進めてきた⁽¹⁾⁽²⁾。特にエアカーテンは、独自の熱流体シミュレーション技術を用いて、エアカーテンの流路や風量の最適化によって省エネに寄与している。一方で、除霜は熱交換器に霜が付く（着霜）限り、加熱や送風などの余分なエネルギーを消費する。そこで、本稿では機能性塗料による熱交換器の無着霜化技術について述べる。

2 熱交換器の課題

ショーケースの基本構成を図1に示す。ショーケース本体は冷凍機と接続されており、冷凍機内の圧縮機で冷媒を循環させている。冷媒は、ショーケース内の熱交換器で蒸発し、その気化熱によってショーケースを流れる空気が冷却され、ショーケースの庫内が冷やされる。熱交換器の表面は低温のため、湿気を含んだ空気が触れると空気中の水分が熱交換器表面に結露する。そして、この結露した水滴は熱交換器表面の温度が0℃以下になると凍結して霜に成長する。オープンショーケースは、図1のように扉が存在しないため、温度が高く湿気を含んだ店舗内の空気がエアカーテンに侵入するため、熱交換器表面への着霜は避けられない。霜の成長は、熱交換器の空気の流路を塞ぐことになり、熱交換性能が著しく損なわれる。そこで、従来はヒータや暖かい店舗内の空気の熱を用いて定期的に熱交換

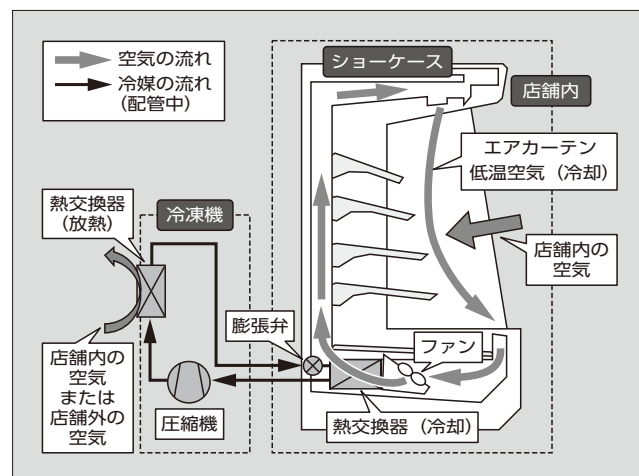


図1 ショーケースの基本構成

器を加熱し、霜を溶かして排水していた。しかし、着霜した氷の凝固潜熱や除去に費やされるエネルギーは余分なエネルギーなので、熱交換器の着霜を防止できれば、これらのエネルギーが不要となり、従来よりも省エネとなる。

2.1 熱交換器における着霜のメカニズム

熱交換器表面の着霜は、結露水の凍結が起点となる。その凍結メカニズムは、一般的に次の二つと考えられている。一つは均質核生成と呼ばれ、水に含まれるちりや埃（ほこり）などの明確な凍結要因がなく、水全体に凍結の核（氷核）が発生して凍結する。この均質核生成のみが支配する場合、水は-40℃付近まで凍結しないことが知られており、0℃以下で水が凍結しない状態は過冷却状態と呼ばれる⁽³⁾。もう一方は不均質核生成と呼ばれ、水に含まれるちりや埃などの異物が氷核となり、そこを起点に水全体が凍結する。自然現象に見られる凍結の多くは、後者の不均質核

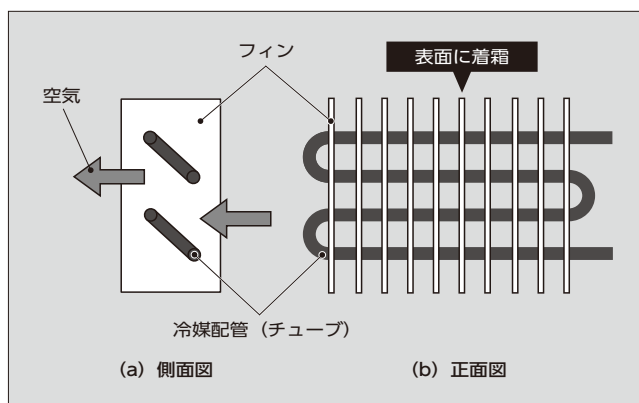
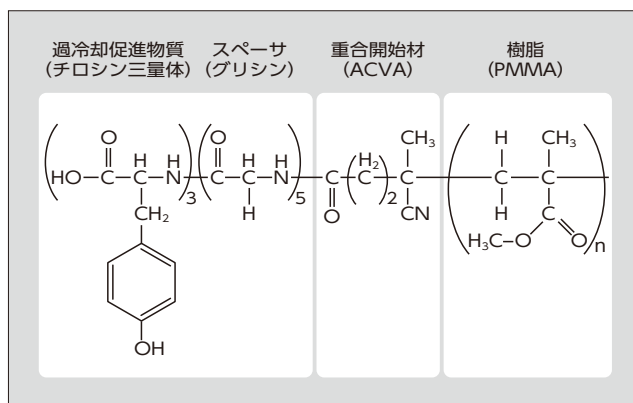


図2 熱交換器（フィンとチューブ）の基本構造

図4 機能性塗料の原料の分子構造⁽⁷⁾

生成である。

図2にフィンとチューブから構成される熱交換器の基本構造を、図3に熱交換器における結露水の凍結メカニズムを示す。ファンで送られた空気は、熱交換器の表面を流れて冷却される。この時、空気に含まれる異物が熱交換器表面や結露水に付着し、不均質核生成により凍結する。また、この異物が付着する量は、空気中の異物濃度と熱交換器の通過風量の影響を受ける⁽⁴⁾。したがって、結露水の凍結防止には異物の付着防止が有効である。しかし、異物の付着は実用上避けられないため、着霜を防ぐには、異物が付着することを前提に異物の氷核化を抑制する必要がある。

3 新規開発した無着霜化技術

3.1 過冷却促進物質の概要

異物が付着しても過冷却状態を維持できる物質（過冷却促進物質）⁽⁵⁾がこれまでにいくつか報告されている。そのほとんどは水自体に過冷却促進物質をあらかじめ溶解させる添加剤である。しかし、熱交換器などで自然発生する結露水に適用する場合、選択的かつ継続的に過冷却促進物質を添加することは難しい。これに対して長友らは、チロシン三量体というアミノ酸の結合物を過冷却促進物質として選定し、それを樹脂と結合させて塗料にしている⁽⁶⁾。そして、この塗料をガラス基材に塗布することで、塗膜表面に滴下した水滴の過冷却が促進されることを実証している。しかし、この実証評価は、ガラス基材やよう化銀添加液（よう化銀は代表的氷核物質の一つ）を使った評価であり、熱交換器が使用される環境とは異なる条件下で行われている。

3.2 熱交換器への適用

熱交換器で無着霜化を実現するためには、金属製の熱交換器表面に過冷却促進物質の塗膜を形成する必要がある。今回、金属表面に塗布する機能性塗料の原料の分子構造を図4に示す分子構造とした。この原料は、金属表面に物理吸着する樹脂を過冷却促進物質と結合させており、溶剤に溶かして塗料とした。なお、この機能性塗料が、熱交換器表面材質であるアルミニウムに塗布可能なことは確認済みである⁽⁷⁾。

機能性塗料を用いた無着霜化のメカニズムを図5に示す。従来の熱交換器は低温になると表面が結露し、結露水に含まれた異物が氷核化して凍結する。一方、機能性塗料を塗布した熱交換器の結露水は、塗膜の過冷却促進物質の作用を得て0℃以下でも過冷却状態が維持される。過冷却状態の結露水は、時間の経過とともに成長して質量が増し、重力が結露面との付着力を超えた時点で流れ落ち排水される。この結露と排水を繰り返すことで連続的な冷却が可能になり、無着霜化を実現する。

3.3 効果の検証

(1) 過冷却促進効果の評価

熱交換器の実条件を再現し、機能性塗料の結露水への過冷却促進効果を評価した。評価試料は、熱交換器のフィンを模擬したアルミニウム小片（D20 mm×W20 mm×t2 mm）に機能性塗料を塗布して作製した。熱交換器表面に自然発生する結露水の再現には、図6に示す結露水評価の装置図のとおり、バブラーユニットによって温湿度が

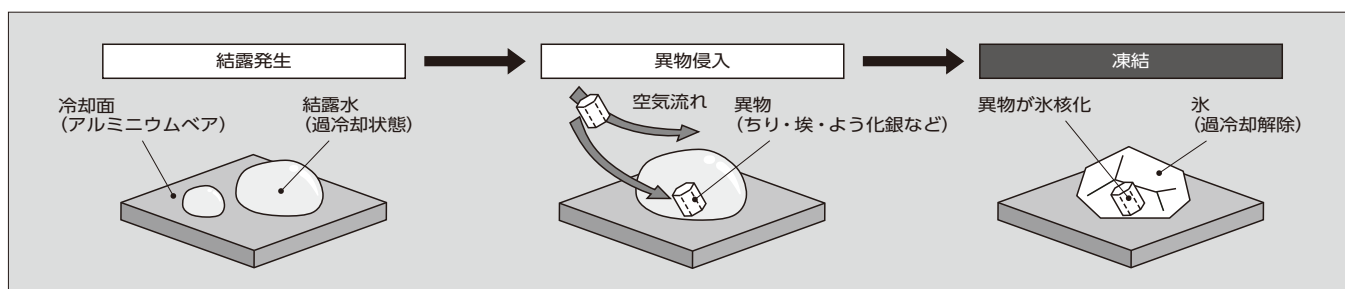


図3 熱交換器における結露水の凍結メカニズム

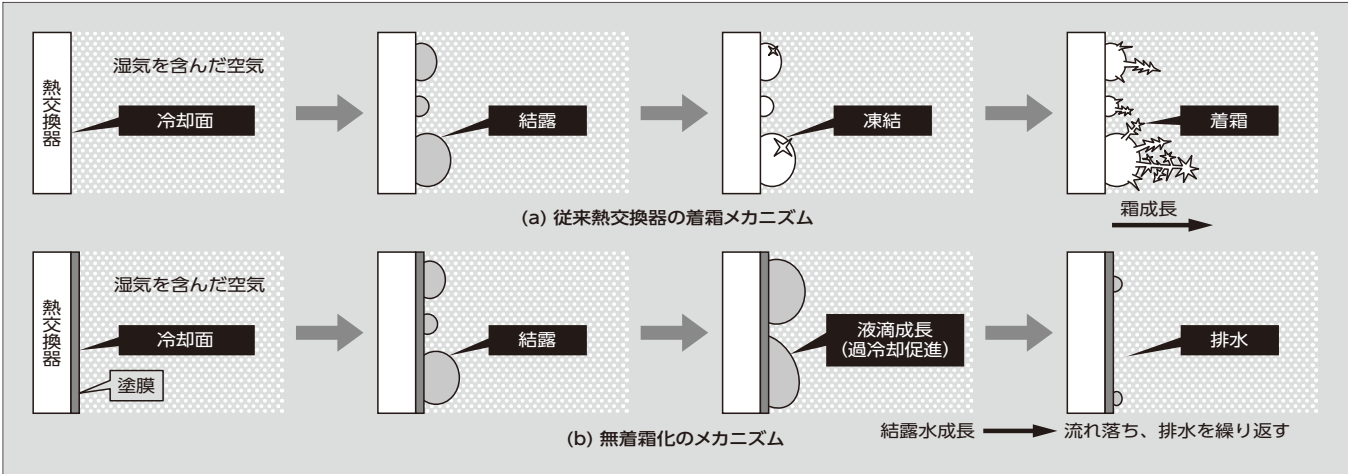


図5 無着霜化のメカニズム

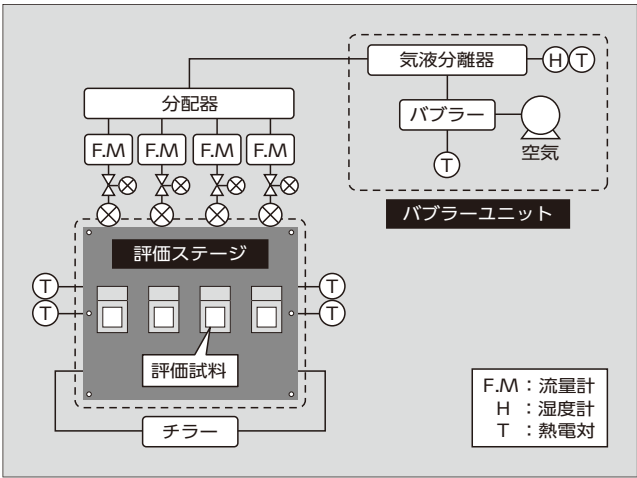


図6 結露水評価の装置図

一定に保たれた空気と熱交換器の空気の流れを模擬した評価ステージを用いた。試料の冷却では、結露水が凍結する温度（凍結温度）を測定するため、微小液凍結法⁽⁷⁾を参考に冷却面温度の条件を設定した。空気の温度と湿度は、熱交換器の実条件から、20℃と65%に設定した。また、評価指標は、塗膜のないペア材の凍結温度から、塗膜試料の凍結温度を引いた値で定義した“抗氷核活性値”とし、結露水の凍結の判定は全表面の水滴の一部でも凍結した時点とした。

これらの熱交換器を再現した評価条件（結露水評価条件）を表1に示す。表1の条件で評価した結果、抗氷核活性値は4.2Kであった。また、参考として先行文献より、凍結しやすい水（よう化銀添加液）を滴下した岡本らの原理評価結果（よう化銀添加液評価⁽⁷⁾）を表2に示す。表2の条件で評価した結果、抗氷核活性値は2.3Kであった。これらの結果から、結露水評価では、よう化銀添加液評価と同様に、抗氷核活性値がプラス側に表れ、過冷却促進効果が確認できた。表1の結果から、機能性塗料の塗膜は、熱交換器の実運転に近い水質と冷却方法でも、過冷却を促進できると考えられる。

続いて、過冷却状態の結露水が時間の経過とともに排水

表1 熱交換器を再現した結露水評価⁽⁴⁾

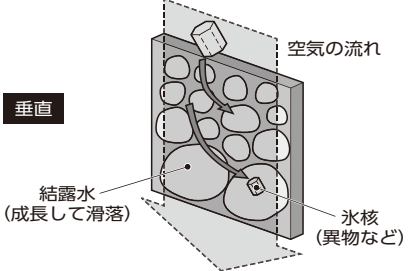
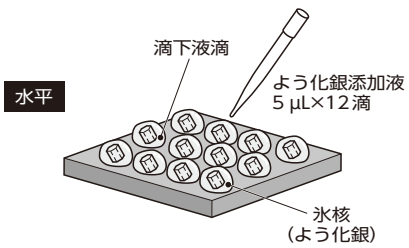
項目	評価条件
冷却面温度 (℃)	-26 ~ +4
冷却速度 (℃ / min)	0.2
空気温度 (℃)	20
空気湿度 (%RH)	65
風速	自然対流
試料姿勢	垂直 

表2 よう化銀添加液評価⁽⁷⁾

項目	評価条件 ⁽⁷⁾
冷却面温度 (℃)	-18 ~ 0
冷却速度 (℃ / min)	1.0
空気温度 (℃)	25
空気湿度 (%RH)	- (乾燥剤設置)
風速	自然対流
試料姿勢	水平 

される様子を図7に示す。ここでは、表1の評価条件を基に、冷却温度は0℃以下の代表温度で一定にし、風速は実環境を模擬した強制対流で一定にして時間経過を観察し

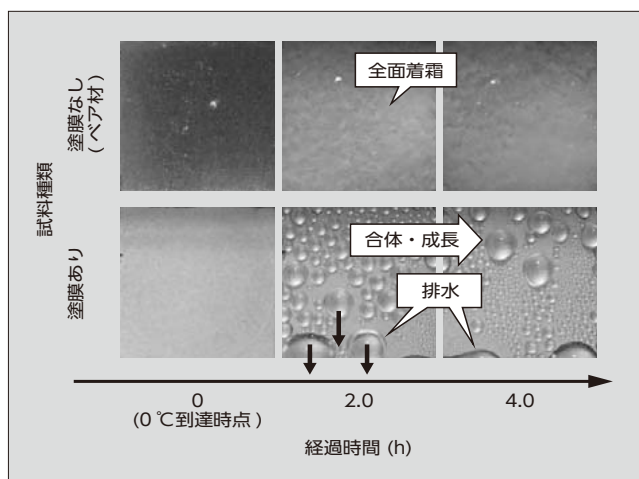


図7 過冷却状態の結露水が排水される様子⁽⁴⁾

ている。図の写真から、時間の経過とともに結露水が成長し、排水されていく様子が確認できる。

これらにより、設計した機能性塗料の塗膜は、熱交換器の結露水の過冷却を促進し、無着霜化できることを実証できた。

(2) 省エネ効果の試算

着霜は、結露水が凍結して発生するため相変化を伴っている。そのため、結露時は凝縮潜熱、凍結時は凝固潜熱が消費される。この二つの潜熱は、熱交換器が空気を冷却する目的において無駄なエネルギーとなる。無着霜化技術を適用した熱交換器は、そのうちの凝固潜熱が不要になるため省エネが狙える。また、ヒータを用いた除霜と比較し、無着霜化はヒータ電力が不要である。これらを踏まえ、無着霜化技術を熱交換器に適用した際の省エネ効果を試算した。

一般的な除霜方式であるヒータ除霜式と無着霜化技術の消費電力量を自社基準の条件を基に試算した結果、無着霜化技術のヒータ除霜式に対する省エネ効果は、3尺の冷蔵多段ショーケースで年間7%と分かった。

また、無着霜化技術は従来の熱交換器に塗膜を施すことで機能を付与できるため、熱交換器のサイズや庫内容積を変更しないで省エネ効果を得ることができる。

4 あとがき

本稿では、機能性塗料による熱交換器の無着霜化技術について述べた。この機能性塗料は、ショーケースのみならず冷却用熱交換器が用いられる多くの冷熱機器に適用できる技術である。今回はアルミニウム小片を用いて評価を実施したため、今後は熱交換器の実スケールで過冷却促進効果を確認する。また、製品化に向けては、塗膜の原料とな

る過冷却促進物質の製造コストの低減も課題である。今後とも開発を継続し、これらの課題を解決して無着霜化技術を確認し、カーボンニュートラル社会の実現に貢献していく所存である。

最後に、本開発で用いた過冷却促進物質は、関西大学平野義明教授との共同研究による成果である。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) 中島正登, 浅田規. オープンショーケースの省エネルギーを実現する熱流体シミュレーション技術. 富士電機技報. 2016, vol.89, no.1, p.50-53.
- (2) 新製品・新技術紹介. スーパーマーケット向け省エネ型ショーケース. 富士電機技報. 2012, vol.85, no.6, p.459.
- (3) 公益社団法人 日本冷凍空調学会. 最近気になる用語. “48過冷却水”. <https://www.jsrae.or.jp/annai/yougo/48.html>, (参照 2022-08-31).
- (4) 小川莉玖ほか. 過冷却促進塗料を適用した塗膜壁面の凍結性評価. 公益社団法人 日本冷凍空調学会年次大会講演論文集. 2022, OS-9 (B111).
- (5) Tagawa, E. et al. Anti-Ice Nucleation Activities of Tyrosine Peptide. Biocontrol Science 23 (2). 2018, p.81-83.
- (6) 長友翔希ほか. ガラスにコーティング可能なペプチド凍結予防剤の分子設計. 塗装工学. 2018, vol.53, p.174-183.
- (7) 岡本大智ほか. 抗氷核ペプチドを用いた材料表面の設計. 第70回高分子学会予稿集. 2021, vol.70, 3Pa043.



小川 莉玖

店舗省エネルギーシステム技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター熱エネルギー技術研究部。日本冷凍空調学会会員。



水澤 竜也

店舗省エネルギーシステム技術の開発に従事。現在、富士電機株式会社技術開発本部先端技術研究所エネルギー技術研究センター熱エネルギー技術研究部主任。博士（工学）、日本伝熱学会、電気化学会、日本機械学会会員。



滝口 浩司

自動販売機およびショーケースの冷熱開発に従事。現在、富士電機株式会社食品流通事業本部三重工場開発部主幹。日本冷凍空調学会会員。



＊本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。