

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：33401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420255

研究課題名(和文)誘導加熱を利用した省エネルギー型無着霜熱交換器の開発

研究課題名(英文)Development of Energy saving typed Non Frost Heat Exchanger with an Induction Heating

研究代表者

中尾 一成 (Kazushige, Nakao)

福井工業大学・工学部・教授

研究者番号：50586469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：誘導コイルの渦状コイルの圧力損失解析、インピーダンス測定実験、熱交換器加熱実験及び低温環境下における熱交換器除霜実験から以下のような結論が得られた。1) 渦状コイルの圧力損失解析およびインピーダンス測定実験から圧力損失が大きい方が加熱効率も大きいという相関関係がある事が分かった。(2) 熱交換器空気加熱実験において熱交換器全体へ均一な加熱が確認された。(3) 0℃の低温環境下におけるコイルへの30kHz高周波通電による熱交換器除霜実験にて除霜が検証された。熱交換器への加熱入力約31.5Wにて30分で170gデフロストが可能であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The defrost system with the induction heating have been proposed to be applied to the air conditioner. This induction heating system is made of a swirled coil and a high frequency inverter, when this coil is conducted 30kHz AC current, the plate finned tube type heat exchanger was heated by the electro and magnet phenomena. From the practical point of this defrost system, at first, the analysis of the pressure drop of coil and heat exchanger was conducted to evaluate, secondary, the measurement of impedance and the induction heating defrost test were conducted to investigate the heating efficiency and the defrost time. Thus, it is found that the heat exchanger was uniformly heated and the frost of 170g on the surface of that were melted by the induction heating induced supply of 30kHz high frequency current to coil for 30 min under the air temperature of 0℃. From these fact, the validity of the proposed system was verified.

研究分野：パワーエレクトロニクス、熱工学

キーワード：誘導加熱 デフロスト 熱交換器

1. 研究開始当初の背景

除霜の新技术として IH(誘導加熱)を利用し、逆サイクル運転せず、外部から熱交換器を直接加熱し、霜を融解するシステムを開発する。本方式の開発により、暖房時のノンストップ暖房、省エネルギー運転や熱交換器の能力向上・小型化が期待でき、連続的な加熱、瞬時の融解による“無着霜熱交換器”の実現可能性もある。本研究では電磁誘導現象と熱物質移動現象の両面からのアプローチによる熱交換器の原理検証と高効率化を目指した要素技術の研究を行う。

2. 研究の目的

除霜の新技术として IH(誘導加熱)を利用し、逆サイクル運転せず、外部から熱交換器を直接加熱し、霜を融解するシステムを開発する。本方式の開発により、暖房時のノンストップ暖房、省エネルギー運転や熱交換器の能力向上・小型化が期待でき、連続的な加熱、瞬時の融解による“無着霜熱交換器”の実現可能性もある。

本研究では電磁誘導現象と熱物質移動現象の両面からのアプローチによる熱交換器の原理検証と高効率化を目指した要素技術の研究を行う。

3. 研究の方法

ヒートポンプの除霜時において熱交換器のフィンや伝熱管などの金属を非接触かつ連続的に誘導加熱して霜を融解し着霜させない無着霜熱交換器を開発する。

無着霜熱交換器の原理実証のために、原理実証試験装置の構築と影響パラメータの抽出、高効率化のための要素研究として以下を行う。

- (1)原理実証試験装置の構築
- (2)市販熱流体ソフト FlowDesigner による熱交換器の圧力損失解析
- (3)インピーダンス測定による電力分配、加熱効率の把握のための実験
- (4)誘導加熱による熱交換器単独加熱実験
- (5)誘導加熱による低温環境下デフロスト実験

4. 研究成果

(1)実験装置の構築

Fig.1,2 に着霜実験及びデフロスト(除霜)実験における実験装置の構成と外観を示す。実験装置は 低温環境室、冷凍機、加湿器、プレートフィンチューブ型熱交換器(横 300 mm × 高さ 255 mm × 奥行 120 mm, Fig.3)、低温恒温水槽、ポンプおよび配管等の空調・冷凍系と、電源と高周波電流を生成する駆動制御回路、生成された高周波電流を通電される渦巻き状コイル(Fig.4)の電気系から構成される。

低温環境試験室の上部に 冷凍機や蒸発器が設置され、室内の空気が冷却される。低温恒温水槽で低温のエチレングリコール

溶液(以下、ブライン)が生成されポンプにより熱交換器に供給され、熱交換器表面に着霜させる。この状態で熱交換器を誘導加熱すると霜は融解する。

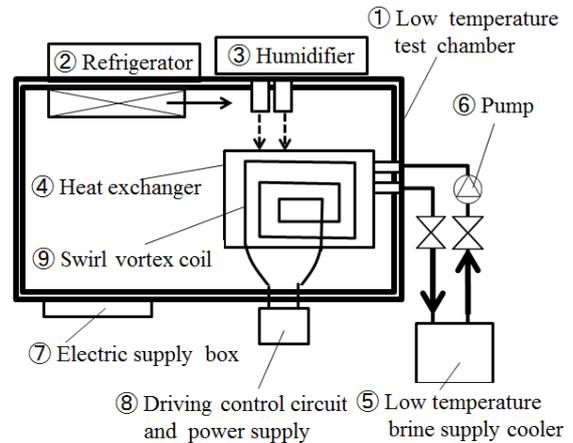


Fig.1 Total system experimental apparatus in low temperature test chamber

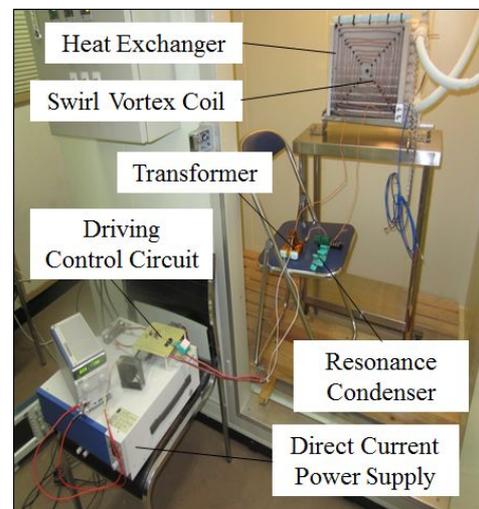


Fig.2 Experimental apparatus for an induction heating defrost in low temperature test chamber



Fig.3 Plate finned tube type heat exchanger for an industrial specification

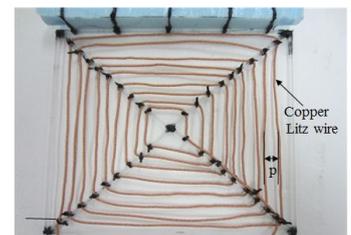


Fig.4 Vortex coil with swirled Litz copper wire (p = 10mm, T = 9 turns)

(2) 市販熱流体ソフト FlowDesigner による
熱交換器の圧力損失解析

Fig.5 にコイル間隙 $p = 10, 20, 30 \text{ mm}$ とコイルと熱交換器間距離 $S = 5, 10, 15 \text{ mm}$ の組み合わせ時のコイル形状, 配置と圧力損失の関係を示す. コイル無しの場合の圧力損失は 22.7 Pa であり, コイルとフレームを装着することで, $2 \sim 5.4 \text{ Pa}$ の圧力損失の増加が認められた.

コイル無し, 次に, 熱交換器単独の場合をベースにした圧力損失の増加率を Fig.6 で考察する. Fig.6 に各渦状コイルを配置した場合に, 熱交換器単独の圧力損失に対してどの程度圧力損失が増加するのかを評価した. 圧力損失の増加率が一番大きいのはコイル間隙 $p = 10 \text{ mm}$, $S = 5 \text{ mm}$ の場合で 23.6% である事がわかった. 距離 S が増加するにつれて, 圧力損失は減少していくが, 10 mm と 15 mm では若干増加した. 渦状コイルの後流で 10 mm では発生しなかった乱れが, 15 mm で発生し圧力損失増加につながったと考えている.

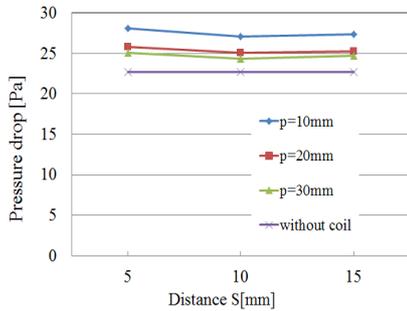


Fig.5 The pressure drop of heat exchanger with and without coil

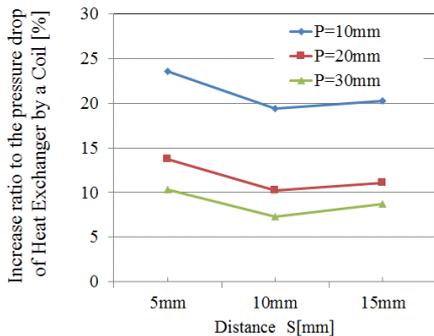


Fig.6 Relationship between distance S and increase ratio to pressure drop of heat exchanger only

(3) インピーダンス測定による電力分配, 加熱効率の把握のための実験

Fig.7 に渦状誘導加熱コイルと熱交換器間の距離 $S = 5 \text{ mm}$ における加熱効率の周波数

特性を示す. どのコイルも 30 kHz の周波数電流を流した場合に加熱効率が一番高いことが分かる. 熱交換器直接誘導加熱システムによるデフロスト実験においては周波数 30 kHz で駆動した. また, $p = 10 \text{ mm}$ の場合の加熱効率が良いことが分かる.

Fig.8 は周波数 30 kHz における各渦状誘導加熱コイルの距離 S の加熱効率への影響を示した図である. 加熱効率は, コイルに電流が流れたときに発生する磁束の強さとその変化に影響される. この場合, コイル間隙 p が短く, 巻き数が多い場合と, 熱交換器とフィン間の距離 S が小さい方が熱交換器のフィンに鎖交する磁束が強いと考えられ, 図中の結果は, $p = 10 \text{ mm}$, $S = 5 \text{ mm}$ の p が小さく, S が小さい場合の加熱効率が一番大きい結果となっている.

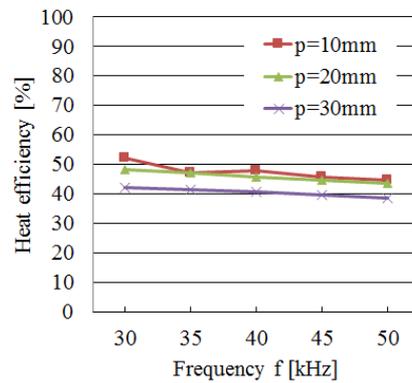


Fig.7 Relationship between frequency and heating efficiency ($S=5 \text{ mm}$)

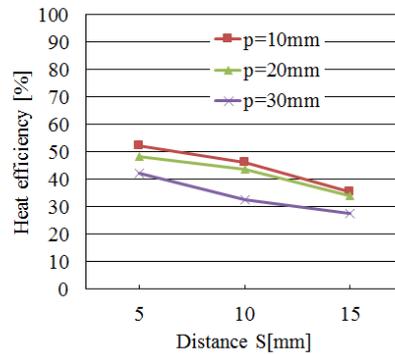


Fig.8 Relationship between coil gap distance p and heating efficiency η

Fig.9 にコイル間隙 $p = 10 \text{ mm}$, コイルと熱交換器間距離 $S = 5, 10, 20 \text{ mm}$ における電力分配を一例として示す. $p = 20, 30 \text{ mm}$ の場合は図示していない. 下から回路損失, 変圧器損失, コイル損失, 最後に熱交換器損失を示す. 熱交換器損失, コイル損失, 変圧器損失の順に大きいことが分かる. 熱交換器損失が主にデフロスト (除霜) に寄与するが

コイルロスも回収・利用できる可能性がある。S = 5 mm の場合を見ると、電源入力 $W_t = 100$ W であり、回路損失 $W_{ci} = 8.5$ W、変圧器損失 $W_{tr} = 23.7$ W、コイル損失 $W_{co} = 20$ W、熱交換器損失 $W_{hex} = 47.8$ W となった。加熱効率 = W_{hex}/W_t であり、この場合は 47.8% となる。また、熱交換器損失が一番大きい(つまり加熱効率が一番大きい)場合は $p = 10$ mm, $S = 5$ mm の時であり 47.8 W, 一番小さいのは $p = 30$ mm, $S = 15$ mm の時の 25.3 W である(図示していない)。

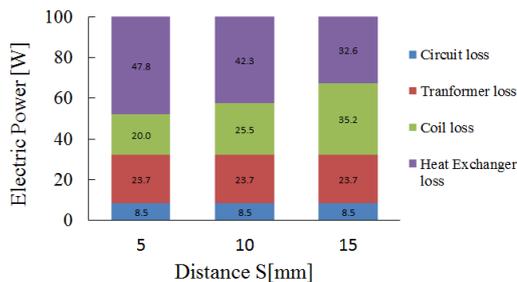


Fig.9 Power distribution ratio of an induction heating system and heating efficiency ($p = 10$ mm)

(4)誘導加熱による熱交換器単独加熱実験

Fig.10 に $p = 10$ mm, $S = 5$ mm における熱交換器単独の誘導加熱実験の開始後 30 分までの a~e の各 5 点の温度上昇の過程を示す。

Fig.11 に実験開始 30 分後のサーモレーサの熱解析画像を示す。Fig.10 から平均温度上昇値は 11.7K である事が分かった。また、図中、コイルの中心部に近い a 点の温度上昇が一番大きく、熱交換器左右に位置する b 点および d 点は同じような温度上昇である。中心部から離れている e 点の温度上昇が一番小さいのは、磁場の変化の影響を受けないためと考えられる。さらに、各点は 26.6~28.2 と温度のばらつきが小さく、フィン全体を均一に加熱できていると言える。

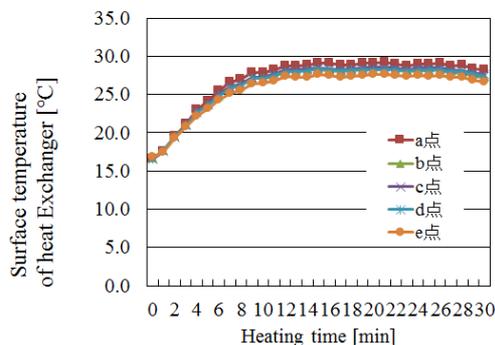


Fig.10 Temperature transit profile of plate-finned tube surface by an induction heating ($p = 10$ mm, $S = 5$ mm)

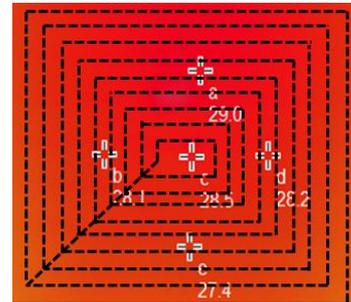
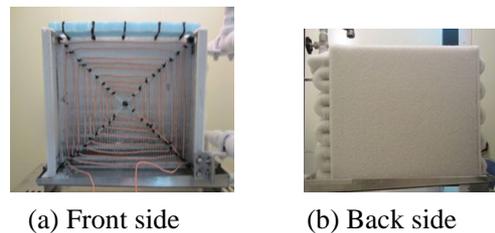


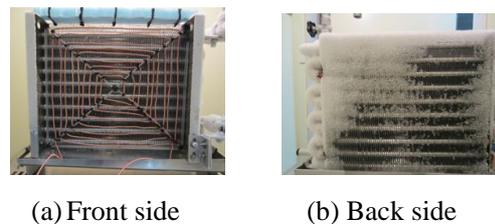
Fig.11 Temperature of plate-finned tube by an induction heating ($p = 10$ mm, $S = 5$ mm, $t = 30$ min.)

(5)誘導加熱による低温環境下デフロスト実験

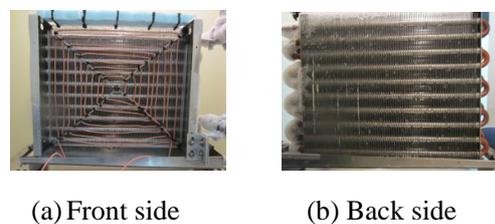
$p = 10$ mm で $s = 5$ mm, $p = 20$ mm で $S = 5, 10$ mm の渦状コイルの 3 種類を用いてデフロスト実験を周囲空気温度 0 の環境下で実験を行った。Fig.12~Fig.14 に、 $p = 5$ mm, $S = 5$ mm における除霜時間 $t = 0, 15$ 分後、30 分後の熱交換器を前面(左図)と背面(右図)から見た除霜状態を示す。



(a) Front side (b) Back side
Fig.12 Defrost state ($t = 0$ min.)



(a) Front side (b) Back side
Fig.13 Defrost state ($t = 15$ min.)



(a) Front side (b) Back side
Fig.14 Defrost state ($t = 30$ min.)

図を見るとデフロスト開始から 5 分経過後には前面側は端を残して融け、10 分経過後、前面側の霜はほぼすべて融解し、背面側も融け始めた。15 分後には、背面側の半分程度のフィンが見え、25 分経過で背面側は、ほぼすべて表面に付着した霜が融解した。30 分経過

後、熱交換器のフィンについての霜はすべて完全に融解された。ただし、後述するように初期着霜量 170 g に対してデフロスト量が 60 g と約 1/3 と少ないのは、熱交換器の外周の U 字管に着霜していた霜が融解されず残存していること、また、融解した霜が水滴となった後、フィンに付着しているため計測されていないためと考えられ、デフロスト量を正確に測定する際の今後の課題である。

Fig. 15 に除霜された霜のデフロスト量の時間的経過を示す。いずれの場合も、デフロスト開始から一定の時間が経過しないと実質的なデフロストが開始しないことが分かる。これは、フィンや伝熱管の温度を上昇させ、霜を融解するに足りる温度になるまでの時間のずれがあるためと考えられる。

また、 $S = 5 \text{ mm}$ で $p = 10 \text{ mm}$ と 20 mm の場合を比較すると、コイル間隙間 p が小さい 10 mm の方が 20 mm の場合と比べてデフロストの立ち上がり早いことが分かる。これは、先の Fig. 9 で示されるように、 $p = 10 \text{ mm}$ 、 $S = 5 \text{ mm}$ の場合の加熱効率が 47.8% と、 $p = 20 \text{ mm}$ の場合の 44.2% と比べて 10% 程度大きいと考えられる。

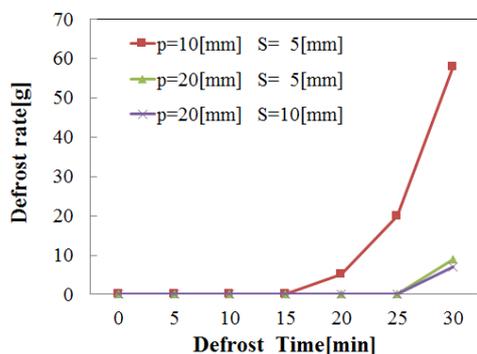


Fig. 15 Comparison of defrost rate between vortex coils

デフロスト量は 0.17 kg であり、氷融解潜熱が 333.5 kJ/kg であるので、霜を融解するのに費やされた加熱量は $0.17 \text{ kg} \times 333.5 \text{ J/kg} = 56.695 \text{ kJ}$ となる。これを 30 分で投入したので、熱エネルギーとしては $56.695 \text{ kJ}/30 \times 60 \text{ sec} = 31.5 \text{ W}$ となる。この値はインピーダンスから求められる $p = 10 \text{ mm}$ 、 $S = 5 \text{ mm}$ において熱交換器へ分配される加熱量 $100 \text{ W} \times 0.478 = 47.8 \text{ W}$ と比較すると小さい。この差異が出る要因は、実際に、Fig. 15 で示されるようにある程度時間が経過してからデフロスト量が測定されることから、熱交換器の顕熱変化やデフロスト量が融けた水を測定することで計測される、熱交換器に付着している水は測定されない、加熱エネルギーの一部は空气中に放熱されるなどの複合的な事象の結果と推定される。

Fig. 15 から得られた霜融解速度のデータから、数分間のオーダーでのデフロスト時間を実現するためには、例えば、投入電力 500 W と今回の 5 倍程度に増加させると、単純比例

として今回のデフロスト時間 30 分を 1/5 の 6 分程度で実現可能と予想される。また、室外機ファンを低速回転させてコイルからの損失で温度上昇した空気をフィン間に流入させることにより、投入電力の 20~40% を占めるコイル損失をデフロストのエネルギーとして回収することができる可能性も示唆された。

(6)まとめ

誘導コイルの渦状コイルの圧力損失解析、インピーダンス測定実験、熱交換器加熱実験及び低温環境下におけるコイルへの 30kHz 高周波通電による熱交換器除霜実験から以下のような結論が得られた。

- (1) 渦状コイルの圧力損失解析およびインピーダンス測定実験から圧力損失が大きい方が加熱効率も大きいという相関関係がある事が分かった。
- (2) 熱交換器空気加熱実験において熱交換器全体へ均一な加熱が確認された。
- (3) コイルへの 30kHz 高周波通電による 0 空気温度下での熱交換器誘導加熱除霜実験にて除霜が確認された。熱交換器への加熱入力約 31.5 W にて 30 分で 170 g デフロストが可能であることが分かった。

今後の展望としては、実用的な観点から圧力損失に上限値、加熱効率に下限値を設定し、低圧損コイルの設計製作を行う。さらには駆動制御回路の大容量化によるスケールアップを図り、実用レベルでのデフロスト実験を行う。また、デフロスト時間の短縮や加熱効率の向上などのさらなる省エネルギー化のための検討を行っていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

- (1) 中尾一成, 新河戸育也, “誘導加熱を利用した熱交換器直接加熱デフロストシステムの研究”, 福井工業大学紀要, 第 47 号, pp.16-24, 2017 年, 査読有

[学会発表](計 1 件)

- (1) 新河戸育也, 武田涼太, 中尾一成, 岸田早也斗, “誘導加熱による熱交換器直接加熱デフロストシステムに関する研究”, 平成 28 年度電気関係学会北陸支部連合大会 2016 年, 福井工大

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
中尾一成 (Nakao Kazushige)
福井工業大学・電気電子工学科・教授
研究者番号: 50586469
- (2) 研究協力者
福井工業大学・電気電子工学科・学部生
新河戸育也 (Shinkoudo Ikuya)