

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420609

研究課題名(和文) 衝突噴流を利用した地中熱交換器のバイパスファクタ低減化に関する研究

研究課題名(英文) Study on reduction of by-pass factor of an earth-to-air ground heat exchanger using impingement jet cooling

研究代表者

小金井 真 (Koganei, Makoto)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60555738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は地中熱・太陽熱併用冷暖房システムにおいて、デシカント空調機のロータを通過した後の高温空気を室温レベルにまで冷却できる衝突噴流型地中熱採熱パイプを開発することである。実験の結果、噴流衝突後の空気の逃げ道を適切に確保することにより、衝突噴流型地中熱採熱パイプの温度降下度は従来パイプの約2.0倍、バイパスファクタは約0.29倍となり、いずれも目標値をクリアできることが分かった。また、連続運転を行うと土壌内の熱の移流が追いつかず熱効率が低下するが、1日8時間の間欠運転を行うことにより、1週間後もほぼ同じ冷却性能が得られることを確認した。

研究成果の概要(英文)：This study aims to develop an earth-to-air ground heat exchanger which can cool the high temperature air after getting through the desiccant rotor to the low temperature level which satisfies the minimum demand of exit air temperature of an outdoor air-conditioner. In this study, cooling capacity of the heat exchanger was improved by reduction of by-pass factor using impingement jet cooling.

By preparing the proper air escape roots inside the heat exchanger, temperature drop of the ground heat exchanger with impingement jet cooling becomes nearly twice as large as that by the conventional heat exchangers, which corresponds to the target value indicated above. By-pass factor of the heat exchanger has dropped by about 70 percent by impingement jet cooling. The heat exchange characteristics on a long-term basis were also investigated and almost same cooling capacity was obtained after a week by driving the system periodically 8 hours per day.

研究分野：建築設備、建築環境

キーワード：衝突噴流 地中熱交換器 地中熱換気システム バイパスファクタ 自然エネルギー

1. 研究開始当初の背景

(1) 原発事故の影響を受け、空調用電力量の削減及びピークカットがますます重要な課題となっている。

(2) 応募者は地中熱と太陽熱を相互補完的に組み合わせることにより、電力使用量を極力減らすことが出来る冷暖房システムの構築を目指し種々の検討を行っている。

(3) このシステムでは地中熱採熱パイプに比較的高温 (50℃~60℃程度) の空気が導入されるケースが発生するが、既存の地中熱採熱パイプでは十分な冷却効果が得られないことが実験で確かめられている。原因は地中熱採熱パイプのバイパスファクタ (土壤冷却面に全く触れずに素通りする空気の割合) が大きい (約 50%) ことによる。

(4) 本研究では地中熱採熱パイプに衝突噴流を用いることによりバイパスファクタの低減化をはかり、冷却能力の向上を目指すことにした。

2. 研究の目的

(1) 応募者らが目指すシステムは、自然エネルギー (地中熱、太陽熱) を効率良く組み合わせることにより電力使用量を極力減らすことが出来る冷暖房システムで、現在普及しつつある「地中熱換気システム」と「太陽熱利用デシカント空調システム」を組み合わせた冷暖房方式である (図 1)。

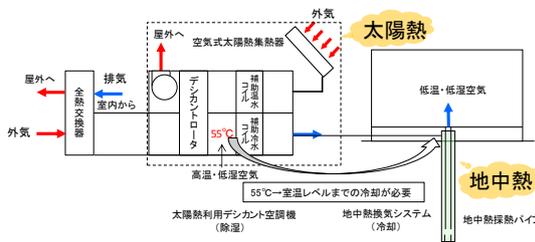


図 1 地中熱・太陽熱併用冷暖房システム (夏期フロー)

(2) 夏期にデシカント空調機のロータを通った後の空気は 50℃~60℃程度まで加熱されており、「地中熱採熱パイプ」に導入した場合の冷却能力が不足する (55℃の空気を導入した場合、15℃の温度降下度、すなわち 40℃程度までしか冷却できないことが申請者らの実験でわかっている)。

(3) 冷却能力が低い原因はバイパスファクタ (土壤冷却面に全く触れずに素通りする空気の割合、以下 BF) が大きい (約 50%) ことによる。

(4) そこで、多孔板から吹き出す衝突噴流によって導入空気を強制的に土壤冷却面に接触させ、BF を低減することにした (図 2)。

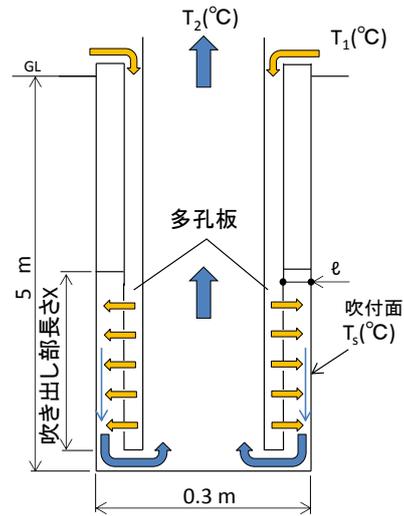


図 2 衝突噴流型地中熱採熱パイプ

(5) 衝突噴流の熱伝達についてはいくつかの実験式が提案されている。しかし、これらの実験式はノズルから流出した理想的な 2 次元平板垂直衝突噴流を扱ったものであり、今回の提案のように多孔板からの噴流の熱伝達特性や 2 次元広がりの影響などは実験で確かめざるを得ない。

(6) 本研究では試作機を用いた実験及び地中に埋設したパイプを用いた実験により、これらの課題を検討する。また、実験とシミュレーションにより長時間運転時の熱交換性能を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 小型試験装置による多孔板吹き出し噴流の特性の把握

図 3 に示すように多孔板厚さが薄い場合、吹き出し後の自由噴流がうまく形成されず、気流が拡散してしまうことにより熱伝達効果が低減してしまう恐れがある。そこで、実験により最適な多孔板厚さを把握する。厚さの異なる多孔板を数種類準備して実験を行い、それぞれの熱伝達率を把握する。孔径 d 、孔ピッチ P 、吹付面までの距離 l は、文献に基づいて最適値を設定する。

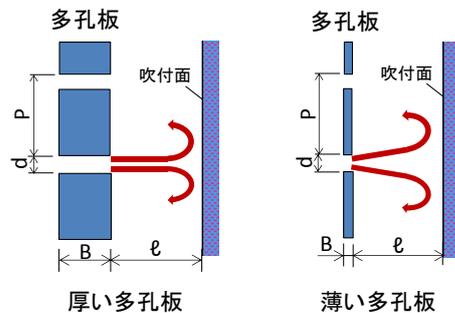


図 3 多孔板厚さによる自由噴流性状の相違

図4に小型試験装置の概要を示す。吹付面は本来土壌によって加熱または冷却された面である。実験ではこれを模擬するために面状電気ヒータを用いる。ヒータ表面の温度が一定値(例えば50℃)になるようにヒータ投入電力を調整する。空気の温度上昇度(T_2-T_1)と風量の測定値より空気が得た熱量を把握する。この熱量と温度差($\Sigma T_n/n-T_1$)より熱伝達率を把握する。

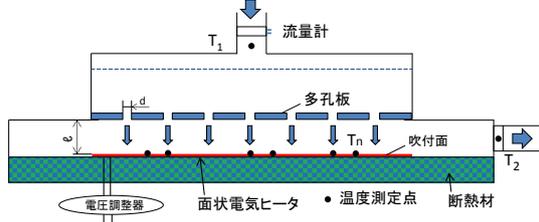


図4 小型試験装置

(2) 地中埋設採熱パイプ(実機)による冷却性能の把握

既往の研究(例えば Gardon ら)では吹付後の空気はノズル間の隙間を抜けて2次元平面上のすべての方向に流出することを想定している。これに対して提案者らの方式では多孔板~吹付面の距離 l が短く、衝突後の空気が1方向(下方向)のみにしか移動できず、空気の逃げ道が少ないため、衝突後の空気が噴流空気に流入し、熱伝達を低下させる恐れがある。そこで、図5に示すように多孔板にめくら部を作り、円周方向に空気の逃げ道を確保する。この場合はめくら部の面積割合もパラメータになる。図5中の θ を45°とした場合(めくら部50%)および60°とした場合(めくら部67%)について実験を実施する。

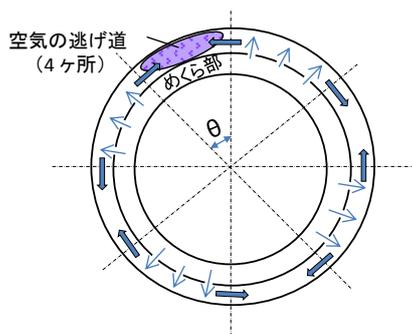


図5 空気の逃げ道を確保した採熱パイプ

(3) シミュレーションによる熱交換性能の把握

シミュレーションにより吹き出し部長さ(図2参照)の影響などを明らかにする。小型試験装置による実験(上記(1))で得られた多孔板から流出する衝突噴流の熱伝達率を用いて、シミュレーションによって衝突噴流パイプ(めくら部無し)の性能予測を行った。地中熱交換パイプの熱移動には多くのプロセスがあるが、本研究では、その中で影響が大きいと考えられる「外パイプ表面→(対流)→外パイプ内空気」と「外パイプ内空気→(貫

流)→内パイプ内空気」の2つを計算対象とした。なお、作成したシミュレーションの解析精度は、既存の地中熱交換パイプの実験結果と比較することにより検証する。

(4) 地中埋設採熱パイプ(実機)による一定期間運転時の熱交換性能の把握

電気ヒータによって外気を50℃程度まで加熱して地中熱採熱パイプに導入した場合の冷却性能を実験的に調べる。1日8時間の間欠運転を1週間行った場合、および連続運転を1週間行った場合について取得熱量の変化などを調べる。

4. 研究成果

(1) 小型試験装置による多孔板吹き出し噴流の熱伝達率測定結果

図6に平均熱伝達率の測定結果を示す。1mm厚さの多孔板の平均熱伝達率は、5mm、10mm厚さの多孔板の場合に比べて若干大きい。その差は4~5W/m²K程度と小さい値となった。多孔板吹き出しによる衝突噴流で得られる平均熱伝達率は、多孔板の厚さによって大きく変わらないことが分かった。

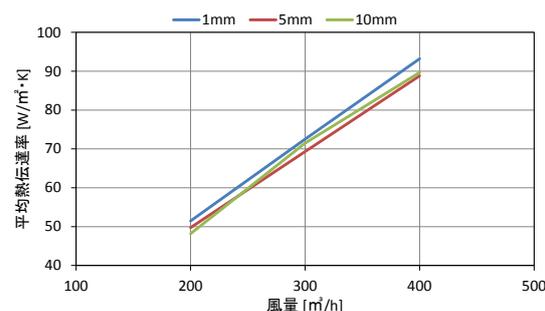


図6 平均熱伝達率の測定結果

(2) 地中埋設採熱パイプ(実機)による冷却性能測定結果

図7に入口空気温度と温度降下度との関係を示す。衝突噴流パイプの温度降下度は従来パイプの温度降下度に比して1.6~2倍大きくなった。めくら部50%の時の温度降下度が最も大きく、従来パイプの温度降下度の約2倍となっている。これは目標値(デシカントロータを出た後の55℃の空気が室温レベル27℃まで冷却される時の温度降下度、図中黒線)とほぼ等しい。めくら部が大きくなり過ぎると(めくら部67%)、伝熱面積の減少により、逆に温度降下度が低下してしまうことが分かった。

図8に入口空気温度とバイパスファクタの関係を示す。従来パイプのバイパスファクタが約0.6であるのに対して、衝突噴流パイプのバイパスファクタは約0.1~0.4に抑えられている。特にめくら部50%の時のバイパスファクタは平均約0.17となっており、目標値0.19以下の値が得られた。

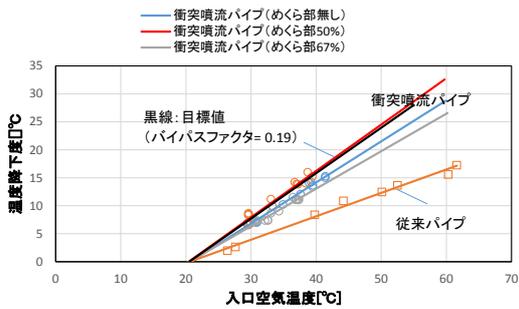


図7 温度降下度 (実験結果)

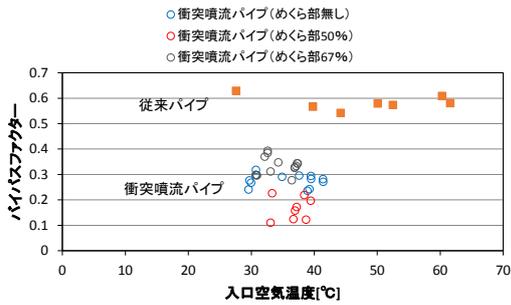


図8 バイパスファクタ (実験結果)

(3) シミュレーションによる熱交換性能の試算結果

図9に入口空気温度と温度降下度との関係を示す。(2)に示した実験結果(めくら部無し)と比較すると若干低い値となっているが、概ね両者は一致している。吹き出し部長さ(図2参照、2m、3m、4m)による変化は小さいことがシミュレーションにより確認できた。図10に入口空気温度とバイパスファクタとの関係を示す。(2)に示した実験結果(めくら部無し)と比較すると若干高い値となっているが、概ね両者は一致している。

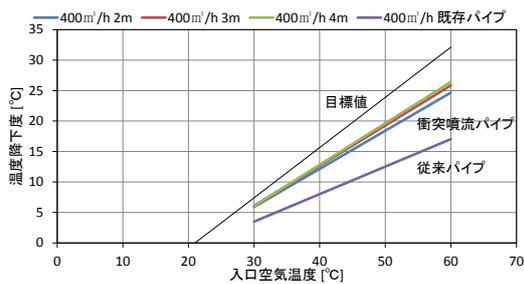


図9 温度降下度 (シミュレーション結果)

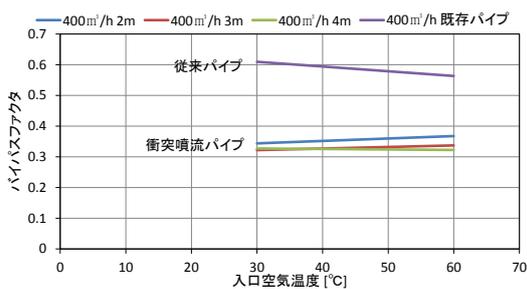


図10 バイパスファクタ (シミュレーション結果)

(4) 地中埋設採熱パイプによる一定期間運転時の熱交換性能

図11および図12に地中熱採熱パイプに高温空気を導入した場合の1週間の取得熱量の変化を示す。それぞれ、1日8時間の間欠運転を行った場合および24時間の連続運転を行った場合の結果である。7日後の冷却能力は間欠運転の場合3.2%、連続運転の場合26%低下した。間欠運転を行えば翌日もほぼ同じ冷却能力が得られるので、日中の運転のみでよい建物の場合には間欠運転で対応できる。一方、工場などにおいて24時間空調が必要な場合には同じ採熱パイプに常時空気を流さずに、例えば3本のパイプで間欠運転を行い、常時いずれかのパイプに空気を流す運転を行うことにより、冷却能力の低下を抑えられる。

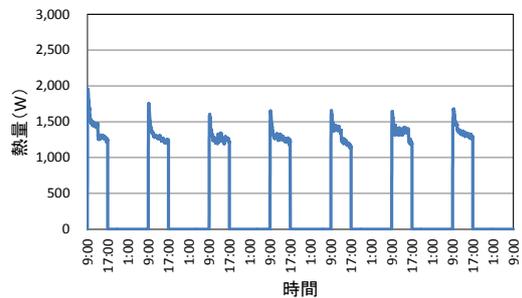


図11 間欠運転時の取得熱量 (1週間)

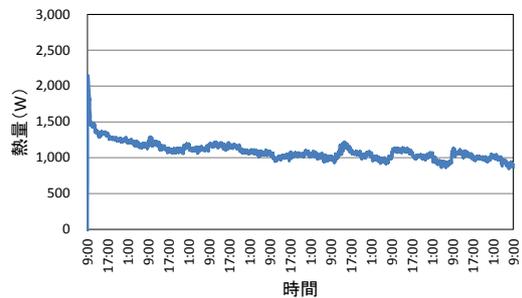


図12 連続運転時の取得熱量 (1週間)

(5) まとめ

- ① 衝突噴流パイプの温度降下度は従来パイプの温度降下度に比して1.6~2倍大きい。また、従来パイプのバイパスファクタが約0.6であったのに対して、衝突噴流パイプ(最適なめくら部面積)のバイパスファクタは0.1~0.2程度に抑えられている。
- ② めくら部(50%)を設けることにより、目標値(デシカントロータを出た後の55°Cの空気が室温レベル27°Cまで冷却される時の温度降下度)とほぼ等しい温度降下度が得られる。
- ③ 多孔板吹き出しによる衝突噴流で得られる平均熱伝達率は、多孔板の厚さによって大きく変わらない。
- ④ 吹き出し部長さ(図2参照)の違いによる冷却性能の変化は小さい。

⑤ 連続運転を行うと土壌内の熱の移流が追いつかずに熱効率が低下するが、1日8時間の間欠運転を行えば、翌日もほぼ同じ冷却性能が得られる。

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 0件)

[学会発表] (計 2件)

1 多田菜津子、小金井真、河野仁志、生田紀夫、橋本真成、吉原基文、地中熱採熱パイプに高温空気を導入した場合の冷却能力に関する研究、日本建築学会中国支部研究発表会、2016年3月6日、近畿大学工学部(広島県東広島市)

2 Koganei M., Tashiro K., Hiyama K., Hashimoto M., Yoshihara M., Yokoyama M., Development of an Air Conditioning System Combined with a Geothermal Ventilation System with a Desiccant Outdoor Air-Conditioning Regenerated by Solar Air Heaters, The 24th International Symposium on Transport Phenomena, 1-5 November 2013, Tokyo University of Science (Yamaguchi, Sanyo Onoda)

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等
<http://env.kde.yamaguchi-u.ac.jp/humane nv/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小金井 真 (Koganei, Makoto)

山口大学・理工学研究科・教授

研究者番号：60555738

(2) 研究分担者 なし

()

研究者番号：

(3) 連携研究者 なし

()

研究者番号：