

平成 28 年度

地中熱式省エネエアコンの高精度長時間省エネ
性能計測技術に関する調査研究報告書

山梨大学工学部機械工学科 船谷 俊平



目次

1. 極細蛍光ワイヤーを用いた温度分布の可視化計測法の開発とヒートポンプ熱量計測への適用 3
2. スキャニング PIV 法を用いた地中熱エアコンの熱量評価 6

1. 極細蛍光ワイヤーを用いた温度分布の可視化計測法の開発と ヒートポンプ熱量計測への適用

1. 緒言

地中熱を利用した地中熱ヒートポンプ (Ground Source Heat Pump, 以下 GSHP) は, 現在空調システムとして普及している空気熱源ヒートポンプより優れた省エネルギーシステムとして, 注目を集めている。地中熱は地表から 10m~150m 程度の深さまでに存在する低温の熱エネルギーであり, 再生可能エネルギーの一つである。年間を通して温度変化がなく, 夏は外気温よりも低く, 冬は外気温よりも高い。この地中熱を利用する GSHP は空気熱源ヒートポンプシステムと比較しても省エネルギー性に優れた冷暖房システムである。また, 冷房排熱を地中に放出するため, ヒートアイランド現象の防止にもつながると期待されている。しかしながら, 我が国での GSHP の普及は進んでおらず, 掘削コストなどの初期投資コストが高いことがその理由の一つとされている。そこで, 本研究ではボアホール長の短縮に繋げるためシステムの高効率化を目指し, 従来の間接方式 GSHP よりも効率が良いと考えられる直膨方式 GSHP (図 1) の熱交換性能を調べ, その性能評価を行った。

直膨方式 GSHP は 1 次側と呼ばれる地中側に冷媒を直接循環させ, 直接地中と熱交換を行うため, 1 次側での熱量計測, 特に流量計測が困難である。そこで, 2 次側と呼ばれる室内機周りでエンタルピー差と空気流量を測定し, 生成熱量を算出する必要がある。

このように, 気体の雰囲気温度をフィールド計測する技術に対しては, 産業界からの要請が特に強い。エアコン, ヒートポンプ等の省エネ性能の指標としては COP (成績係数) が用いられており, COP を計測するためには, 専用の大型施設 (カロリーメーター室) にエアコン一式を持ち込み, 整流された吸排気の流量, 温度を計測し, そのエンタルピー差を用いて COP を算出する必要がある (JIS-B 8615) が, この方式では実証試験等を行うオフィス, 住宅等で実使用状態にある室内機を計測対象とすることができず, さらに, 地中熱ヒートポンプシステムでは採熱管が地中に埋設されているため, カロリーメーター室への持ち込みは不可能である。そこで, 実使用状態にある室内機を計測できる, 小型・高精度 COP 計測システムを開発する必要があるが, こうした計測システムは未だに開発されていない。

一方, 水槽中の温水の計測に対しては, 2 色 L I F 法を適用した温度場計測法が知られている¹⁾。この蛍光染料を用いた温度場計測法として, 著者らは, 蛍光染料の種類や濃度比の最適化により, カラーカメラ 1 台での 2 色 L I F 法および P I V 法を併用した温度場・速度場同時計測法を提案している²⁾。なお, この計測システムの光学系はメンテナンスフリーで, 撮像系は一般的な RGB タイプの CCD カメラ 1 台のみであることから, 計測システムも比較的安価であるとともに, 温度計測精度の高精度化を実現している。

気体の温度分布計測法の改善策として, 上述のような蛍光染料を用いた 2 色 L I F が考えられる。そこで著者らは, 蛍光染料を雰囲気中に噴霧し, 任意断面にレーザーシート光を照射することにより, 2 色 L I F 法による温度分布計測を実現した³⁾。しかし, 蛍光染料を含む液滴を気体中に噴霧する形となるため, 誤差要因となりうる蛍光強度の非一様性が生じた。一方, 熱電対等の接触式センサーを用いる場合, こうした問題は生じないが, 点計測であるため, 3 次元計測を行うには計測点数が多くなり, 流れ場への影響が無視できない。また, 複数の金属線を絶縁被覆する構造のため, 極細とすることが困難である。

そこで本研究では, 計測領域に極細蛍光ワイヤーを配置, 可視化計測することで, 気体の高精度温度場計測を実現することとした。

2. 実験装置および方法

本計測では, 蛍光染料を塗布した極細ワイヤーを雰囲気中に複数配置し, そのワイヤーに紫外線 LED ランプ (中心波長 385, 20W) の光を照射することにより L I F 法に必要な可視化画像を取得することとした (図 2)。ワイヤーの直径

は、流れ場のレイノルズ数が一桁以下となるように設定することで、ワイヤー後流での渦発生を抑止し、流れ場への影響を最小限にする。

計測領域の直下($x=0, z=-30\text{mm}$)にはニクロムヒーター（直径 5mm, 熱出力 30W）を設置し、計測領域内に浮力ブルームを生じさせた。計測領域内に配置された蛍光ワイヤーに対して、カメラ光軸方向から紫外線ランプを照射し、超高感度デジタル一眼レフカメラ（Nikon D7100, ISO25000）を用いて可視化画像を取得した。

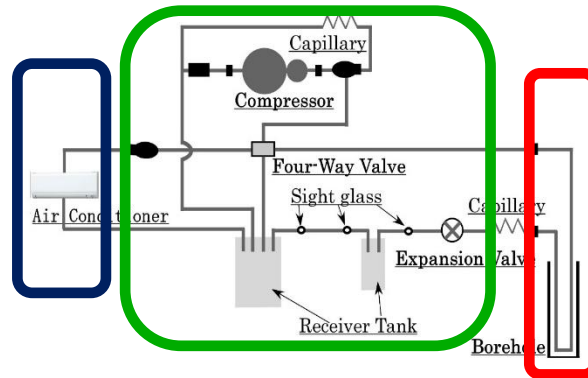


Fig.1 Direct GSHP system

本計測手法の計測手順を示したフローチャートを図3に示す。本実験では単色 LIF 法を採用した。予め検定実験を行い、雰囲気温度と蛍光強度比の関係を計測し、関係式を求める。次に、カメラ、紫外線ランプ、蛍光ワイヤーの位置関係を維持したまま、評価対象となる現象を撮影し、得られた可視化画像に前述の関係式をあてはめ、ワイヤー上の一次元温度分布を算出する。各ワイヤー上の一次元温度分布を2次元空間、3次元空間上で線形補間し、2次元温度分布または3次元温度分布を算出する。

3. 結果および考察

容器内のニクロム線を加熱することで生じさせた浮力ブルームを可視化し、ワイヤー上の温度分布を算出した結果を図4に示す。ニクロムヒーターの上側にサーマルブルームが生じ、周囲流よりも高温の領域が形成されていることが確認できた。よって、本計測法は気流の温度分布計測に有効であることが確認できた。

4. 結 言

蛍光染料を塗布した極細ワイヤーを雰囲気中に複数配置し、そのワイヤーに紫外線ランプの光を照射することにより2色LIF法に必要な可視化画像を取得することができた。また、ワイヤー上の一次元の蛍光強度比分布から、ワイヤー上の一次元温度分布を取得し、これを線形補間することで、二次元温度分布を算出することができた。今後は、温度計測精度の評価を行うとともに、PIV計測法による速度分布計測を併用し、高精度3次元温度場・速度場の同時計測の実現を目指す。

参考文献

- (1) Sakakibara, J. and Adrian, R.J.: Whole field measurement of temperature in water using two-colour laser induced fluorescence, *Exp. Fluids*, Vol.26, (1999) pp.7-15.
- (2) Funatani, S., Fujisawa, N. and Ikeda, H.: Simultaneous measurement of temperature and velocity using two-colour LIF combined with PIV with a colour CCD camera and its application to the turbulent buoyant plume, *Meas. Sci. and Tech.*, Vol.15, (2004) pp.983-990.
- (3) S Funatani, K Toriyama and T Takeda “Temperature measurement of air flow using fluorescent mists combined with two-color LIF” *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization* 1 (2013) pp.20-23

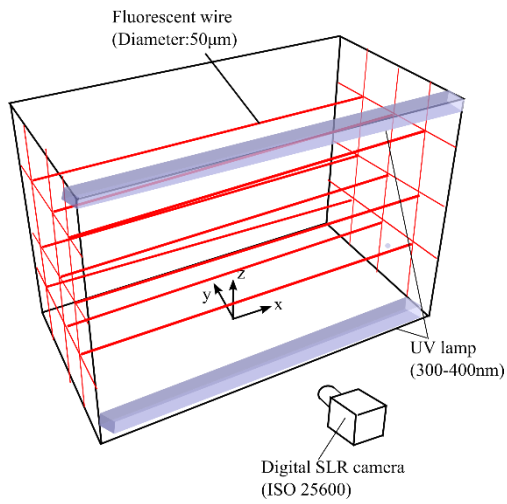


Fig.2 Experimental setup

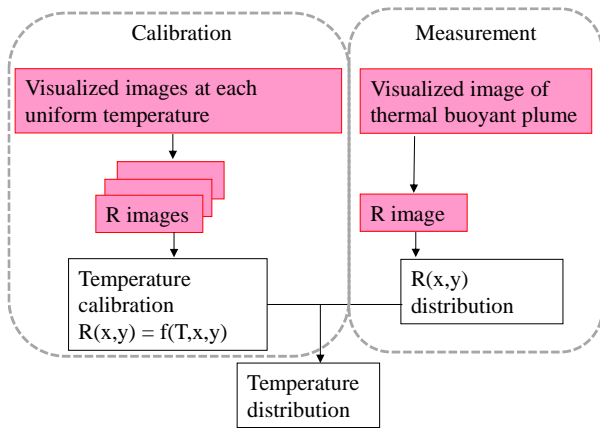


Fig.3 Flowchart for measuring temperature

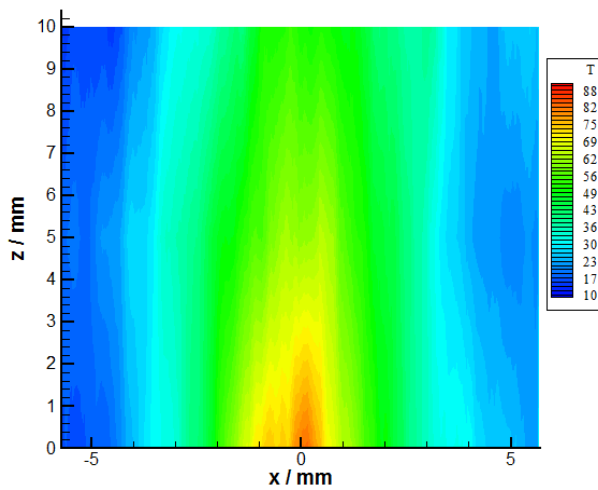


Fig.4 Temperature distribution

2. スキャニング PIV 法を用いた地中熱エアコンの熱量評価

1. 緒言

本研究は、再生可能エネルギーである地中熱を利用した直接膨張方式地中熱ヒートポンプ（以下 GSHP）システムについて、従来の GSHP システムと比較して初期投資コストを大幅に削減した上で高い省エネルギー性を実現するための技術開発に関するものである。本システムを普及させるためには信頼性の高い性能評価が必要であり、性能評価に必要な熱量計測精度は非常に重要である。本研究では、室内機側で熱量計測を行い、空気に与えられた熱量を温度計、湿度計、熱線風速計を用いて計測した。室内機における空気流量の計測は、室内機空気吐き出し口に設置した 4 点の熱線風速計のみで行うことから、流れが不均一な空気の流量を算出する方法では誤差が大きくなる。本研究の目的は、直接膨張方式 GSHP の熱量計測を高精度化することにある。室内機における空気の流量を高精度で求めるため、ビームスキャニング PIV 法を導入して風速分布を求め、熱線風速計の出力から求めた流量を補正する実験式を作成することで熱量計測の高精度化を図った。

2. 実験装置及び実験方法

2.1 実験装置

実験に用いた室内機は三菱電機株式会社製の MSZ-282ZXAS-W である。出力は冷房運転時 2.8kW、暖房運転時 4.0kW であり、風速は弱いほうから順に、1（静風）、2（弱風）、3（中風）、4（強風）、5（ロング）と 5 段階の設定が可能である。室内機の空気吐き出し口に簡易ダクトを設置し、ダクト出口に熱線風速計を 4 点設置して流速を計測している。PIV 法ではレーザ装置（波長 532nm、出力 1000mW）、スモーク発生器、高速度カメラ（480×640 画素）、画像解析ソフト、自動トラバース装置を用いた。

2.2 実験方法

PIV 法による室内機空気流量の計測システムを Fig.1 に示す。空気流量の計測は冷房運転・暖房運転それぞれにおいて風速設定ごとに行う。室内機の運転を開始し、4 点の熱線風速計で風速を記録しておく。室内機の運転が安定したらスモーク装置を作動させ、室内機空気吸い込み口にスモークを送り込む。スモークがダクト出口から出てくるため、レーザを当てて流れを可視化する。高速度カメラで可視化された流れの撮影を開始し、レーザ装置と高速度カメラを同時にトラバースさせ、ダクト出口全体の流速を計測する。この時、カメラのフレームレートを 2000fps、トラバース速度を 150mm/s、トラバース距離を 660mm とする。y-z 平面における粒子画像が x 軸方向に 660mm 分得られるため、解析ソフトを用いて画像間の瞬間流速を算出する。その結果の一例を Fig.2 に示す。カラーマップの部分、x 軸方向から見た計測範囲であり、660mm 分の画像の平均流速を示す。カラーマップ上で任意のライン AB を指定すると、ライン上の風速値が得られるため、その平均値を用いて流量

を求める。熱線風速計を用いて算出した空気流量と PIV 法を用いて算出した空気流量について比較・検討を行い、両計測法による空気流量の関係から補正式を求めた。

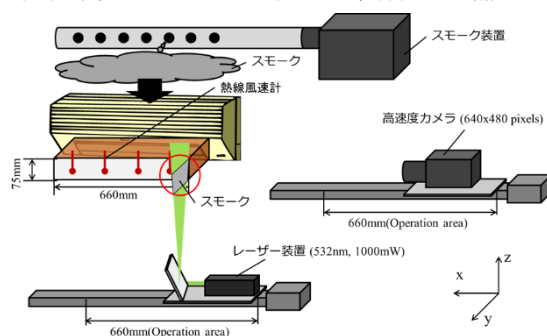


Fig.1 The flow rate measurement system using PIV

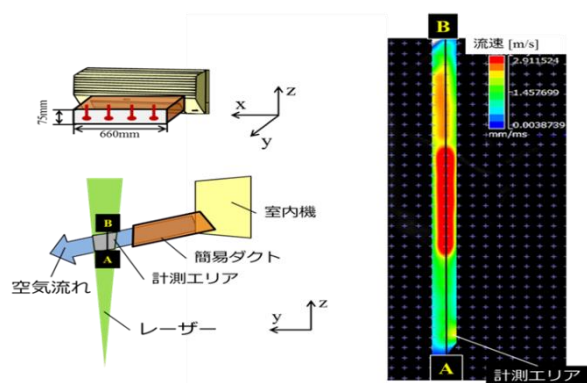


Fig.2 An example of measurement result using PIV

3. 実験結果

冷房運転時の室内機空気流量計測結果を Fig. 2 に、暖房運転時の結果を Fig. 3 に示す。一般に PIV 法による風速の計測精度は $\pm 0.05\text{m/s}$ 程度とされることから、ここでは PIV 法により求めた流量を真値とした。PIV 法により求めた流量をメーカーによる定格風量と比較すると、熱線風速計によって求めた流量の方が近い値を示した。全ての条件において、熱線風速計によって求めた空気流量の方が PIV 法によって求めた空気流量より大きな値となった。その差は冷房運転で平均 60.6%, 暖房運転で平均 15.2%であった。これまでの計測法では、流れが速くなる流路中央で計測した値を流路全体の平均値として計算するため、実際の流量よりも多めに見積もった可能性がある。熱線風速計によって求めた流量は冷房運転と暖房運転とで大きな差異が見られるが、これは室内機吐き出し口における流速分布が運転モードによって異なるためである。これまでに、同メーカーの室内機において、冷房運転ではダクト上部の風速が強くなり、暖房運転ではダクト下部で風速が強くなる傾向があることを確認しており、室内機においては熱線風速計の計測点位置により求めた風量の誤差が異なるものと考えられる。熱線風速計によって求めた流量と PIV 法によって求めた流量の関係を Fig.4 (冷房運転条件), Fig.5 (暖房運転条件) に示す。プロットされたデータを追従する近似式が補正式となる。各運転モードの補正式を以下に示す。

$$Y = -1.18X^2 + 0.848X \quad (\text{冷房運転時})$$

$$Y = -2.13X^2 + 1.16X \quad (\text{暖房運転時})$$

ここで Y : 熱線風速計によって求めた流量 [m³/s] , X : 風速計によって求めた流量 [m³/s]である。これらの式は実験を行った室内機で同様の簡易ダクトを用いた場合のみ使用できる点に注意が必要である。補正式を利用して、熱線風速計によって求めた流量を補正すると、PIV 法によって求めた流量と概ね一致し、その差は冷房運転で平均 2.5%、暖房運転で平均 0.8%となった。今後、直膨方式 GSHP の性能評価を行う際は、補正式を用いることで PIV 法の計測精度に準じた流量計測が可能となる。

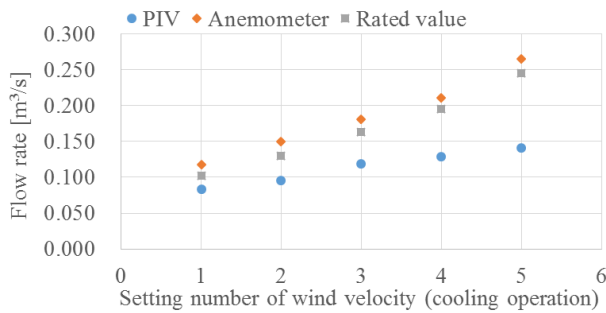


Fig.3 The experimental result in the cooling operation

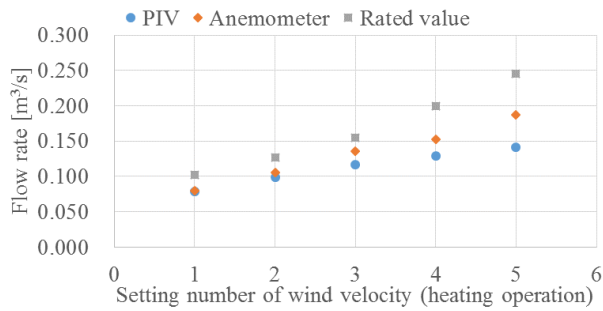


Fig.4 The experimental result in the heating operation

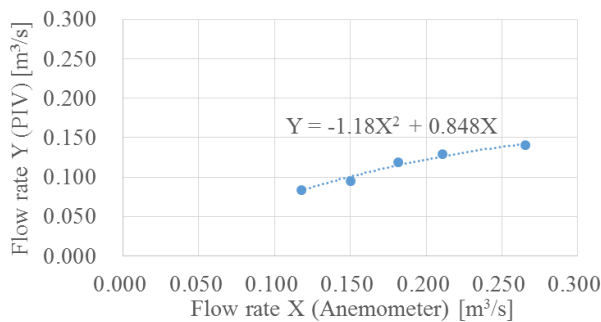


Fig.5 The compensation formula (cooling operation)

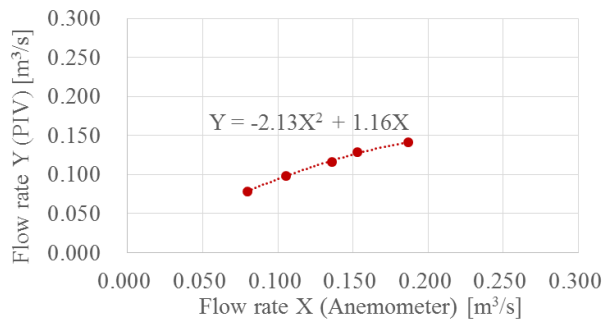


Fig.6 The compensation formula (heating operation)

4. 結言

室内機空気吐き出し口にて熱線風速計を用いた計測法と PIV 法のそれぞれで空気流量の計測実験を行った結果、以下の知見を得た。

- (1) 熱線風速計によって得られた空気流量はPIVによって得られた空気流量より大きな値となり、その差は冷房運転で平均 60.6%，暖房運転で平均 15.2%であった。
- (2) 熱線風速計の補正式を以下に示す。

$$Y = -1.18X^2 + 0.848X \quad (\text{冷房運転時})$$

$$Y = -2.13X^2 + 1.16X \quad (\text{暖房運転時})$$

これらの式は実験を行った本室内機で同様の簡易ダクトを用いた場合のみ使用できる。補正後の熱線風速計により求めた空気流量は PIV によって得られた流量と概ね一致し、その差は冷房運転で平均 2.5%，暖房運転で平均 0.8%であった。