

# 流れを可視化するための 微小温度イメージング

宇都宮大学 先端光工学専攻 オプティクス教育研究センター  
ネイザン・ヘーガン

## 1. はじめに

3次元の乱流の速度と方向の測定は、1つの課題である。例えば、地面近くの風のパターンによって形成された複雑な渦を可視化するためには、コンパクトな機器と受動測定が大切である。多くの流れの可視化技術<sup>1)</sup>は、長年にわたって開発されてきたが、トレーサーやコヒーレントな光源を使用する必要がある、屋外での操作や大きな物体の周りの流れの分析が困難になる。例えば、煙のイメージングは、煙発生器および制御された煙流れを放出するための機構を有することが必要である。シュリーレンイメージングおよびシャドウグラフ法は共に、イメージングカメラに沿って空間的にコヒーレントな光源を必要とし、流れ内で屈折率のコントラストが必要となる。それらと比べ赤外線イメージングは、完全に受動的であり、単一の赤外線ビデオカメラと単純なビデオ処理しか必要としない。この技術は、大部分の容積流量よりもむしろ表面流量を測定することで、アプリケーションに応じては利点または欠点となり得るが、既存の流れ可視化方法とは異なる。Inagaki et al.は表面と大気との間の強い熱コントラストの良好な観察条件下での風表面流の赤外線イメージング、およびイメージを構成するための時間平均化を可能にする滑らかな流れの実行可能性を以前に実証している<sup>2)</sup>。そこで我々は、雨のような劣悪な条件で画像を撮ることが可能であるだけでなく、高速で強い乱流に対しても、リアルタイム（最大500フレーム/秒）に高速にビデオ測定することが可能となったので報告する。

## 2. 乱流との表面熱的相互作用の解析

図1は、小さな熱変化を強調表示するために処理された赤外線ビデオのフレーム例を示している。赤外線カメラを暖かい午後に直射日光の当たる場所を見たわせる駐車場に設置した。空気温度は35℃、相対湿度75%、コンクリート表面温度は50℃であった。この測定に使用されるカメラは、640×512の画像サイズ、20μmピクセル、および60フレーム/秒での14ビット出力を備えたInSb検出器（IRCameras LLC, QuazIR SD）である。検出器は77 Kまで凍結冷却され、2.95-4.97 μmを伝送するコールドフィルターを用い、MWIRスペクトル範囲全体で動作する。カメラは焦点距離50 mmのf / 2.3レンズ

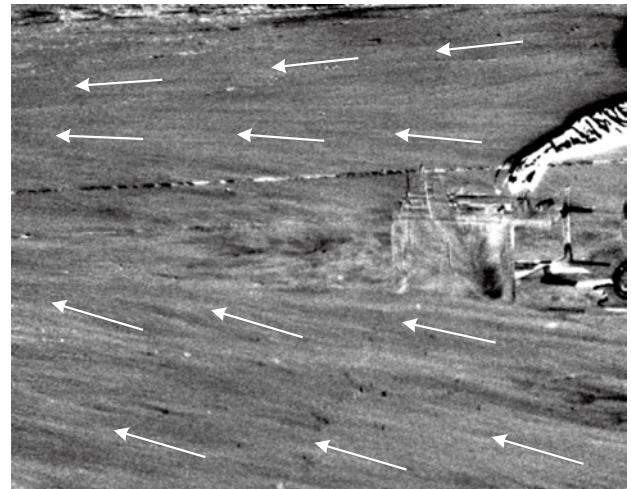


図1 微小な熱変化を強調するために処理された赤外線ビデオからの画像形。白い矢印は、ビデオデータを見るときに容易に現れるコンクリート流れ方向に沿う風の流れのローカル方向を示すために追加されている。画像ディスプレイは、±75 mKの輝度温度差で直線的に黒/白にスケールされている

ねいざん・へーがん

(Janos Technology Inc., ASIO 50mm)を使用している。この構成では、カメラNETDは15 mK (23 °Cでの計算)で、積分時間は2 msであった。積分時間がフレームレートを500 フレーム/秒に制限する点まで、画像を切り取るにより、より速い読み出し速度を達成することができる。

図1が示すデータは、乱気流の冷たい空気が暖かい表面を横切ると、表面幾何学的形状の差、表面を通過する空気の小さな温度差、および空気が表面と相互作用する方法である。これらの小さな温度差は、熱が表面下の材料に伝導するか、または異なる温度を有する空気の小片が表面を通過する際に減衰することを示している。流体(風)と固体表面の間の熱的相互作用の大まかなモデルは、コンクリートの場合、20 mKの表面温度の瞬間的な変化が、約5秒後にカメラの感度限界(<5 mK)に達する<sup>3)</sup>。

図1で見ることができる縞は、一般に、その横断(翼幅方向)寸法に沿って、互いに約3ピクセル離れており、この撮像距離8 mで12 mmの幅に対応する。コンクリート表面は $\theta \sim 75^\circ$ の斜めの角度で観察されるので、コンクリート表面に物理的に発生するよりも線条が $\cos \theta \sim 0.26$ のファクターによって互いに接近して見えるので、コンクリートの実際の物理的間隔は約46 mmとなる。多くの研究者が、乱流境界層や流線状の縞においても同様の大規模なコヒーレントな流れ構造を観測している<sup>3), 4), 5)</sup>。

図1で観測された熱線縞は、(暖かい)低速な空気が表面から押し上げられた(冷たい)高速な空気と急速に交換されることによって生成される可能性が高い<sup>6)</sup>。これらの交換は、流れ方向の渦によって誘発された空気の

流れ(翼幅方向)の運動を引き起こし、サーマルカメラによって示される表面温度の急激な変化を引き起こす。下にある材料基板との導通は、熱変化が測定ノイズを下回るまで、これらの熱変動を数秒間緩和させる。

それは赤外線ビデオシーケンスを時間的にフィルタリングすることで、場面内の物体の温度変化 $\delta T$ を数ミリケルビンレベルまで解析することができる。このレベルでは、明らかにこれまでとは違った熱的挙動を見るようになる。これらのダイナミクスを解析するために、さまざまな時間フィルターが可能であるが、それらのすべては、ノイズ抑制のための高周波カットオフと、ノイズ抑制のための最小周波数を規定する低周波カットオフとを有する1次微分フィルタの一形態を実装することで、最小のダイナミクス率を調整できる。単純な時間勾配フィルターを使用してフローを可視化することは可能であるが、この場合の生の測定ノイズは、最大振幅縞以外のすべてを見ることが困難になる。したがって、時間勾配を計算する前に時間平均を取ると、ノイズが大幅に減少し、一般に熱信号が減少しないため、2次微分またはそれ以上で完全な値に達することがある。しかし、平均が長すぎる場合、風速に起因するより速い局部熱力学に比べて、温度のゆっくりした全体的な変動が支配的になる傾向がある。このように、2次微分フィルタは、全体的な変化を除去し、ノイズを抑制しながら、中間周波数範囲を通過するように設計される。

ここで一般的な2次フィルターには、ガウシアン、ラプラシアン、ラプラシアンフィルターと離散ラプラシアンフィルターが含まれている。時間的フィルタリングの場合、後者は2つの時間的移動平均の差として容易に構成される(図2

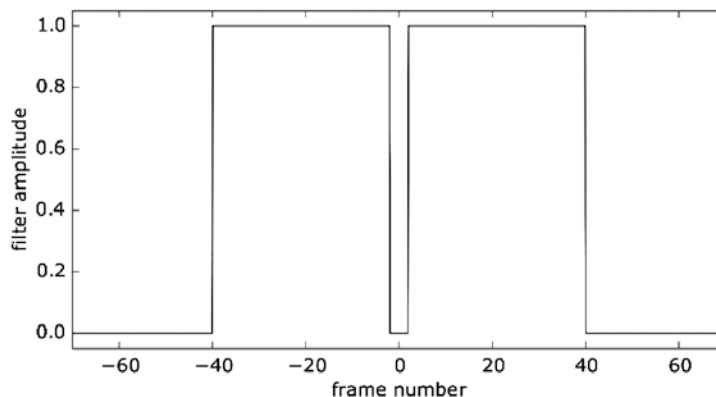


図2 風を可視化するビデオに使用される時間フィルター

参照)。この形式は、そのシンプルさのため高速処理に特に適しており、図1のビデオを生成するアルゴリズムが実装されている。

$$\delta T(x,y) = (N_1 \text{ フレームの平均}) - (N_2 \text{ フレームの平均}) = T_{\text{local}}(x,y) - T_{\text{trend}}(x,y)$$

議論しているすべての可視化ビデオでは、使用されたフィルタパラメータは  $N_1 = 4$  フレーム、 $N_2 = 80$  フレームで、平均時間はそれぞれ67 msと1.3秒に相当する。長いベースライン移動平均  $T_{\text{trend}}$  はデータの全体的な冷却傾向を除去し、短いベースライン移動平均  $T_{\text{local}}$  はノイズを低減するために数フレームにわたって平均化された現在の温度を与える。

一般に、ここに示されたビデオはパラメータ値にあまり敏感ではないので、 $N_1$  と  $N_2$  の値の選択にはかなりの柔軟性がある。例えば、図1のビデオでは、 $N_1 = 1$  にしても良好な結果が得られるが、ノイズが約40%増加した場合には、より速い時間的変化をイメージングする機能と交換する。同様に、 $N_1 = 10$ 、 $N_2 = 120$  とすることもでき、このデータでは妥当な結果が得られる。

縞の予想される信号強度に使用する有用なメトリックは、ピクセルの「熱コントラスト」 $\Delta T$ 、またはシーンと周囲空気との間の温度差によって与えられるシーンの平均熱コントラストであり、

$$\Delta T = T_{\text{bkg}} - T_{\text{air}}$$

で表す。一般に、良好な熱コントラストを  $\Delta T > 15^\circ\text{C}$  と

定義している。これは、多くの一般的な材料が直射日光に曝されると達成できる。

図3からは、 $T_{\text{local}}$ 、 $T_{\text{trend}}$ 、および  $\delta T$  が得られる、図1のビデオシーケンスから得られた単一ピクセルの温度動力学を示す。ピクセルを横切る暗い線は、図3の細い灰色曲線で見られるくぼみを生成し、ビデオの約35 s点での強いくぼみは、近くの装置からの空気の破裂による表面の冷却を示す。この変動は、ピクセルの熱コントラストが  $\Delta T \sim 12^\circ\text{C}$  である場合に、熱線縞によって誘起される10~20 mKの温度変化を示す。

図4は、完全に曇った雨の日に撮影されたシーンを示しているため、ここでは空気と地面の熱的コントラストはるかに小さい ( $\Delta T \sim 5^\circ\text{C}$ )。ビデオ中に小雨が当たっているシーンがあるが、シーケンスの途中で停止している。バケツまでの距離は8 mである。このように測定条件が悪いにもかかわらず、フィルタリングされたビデオは複雑な風の動きを難なく可視化することができる。

### 3. 測定条件

風面の流れを良好に測定するためには、ノイズの存在下で熱構造を見るのに十分な信号対雑音比 (SNR) が必要である。より大きな熱変動は、物体表面と風との間のより大きい熱的コントラスト  $\Delta T$  により生じ、表面放射率が高いときに良好な視認性 (放射輝度の変化) を有する。屋外測定の場合、 $\Delta T$  は通常、表面上の太陽光の吸収によって引き起こされ、周囲の空気の温度以上に加熱

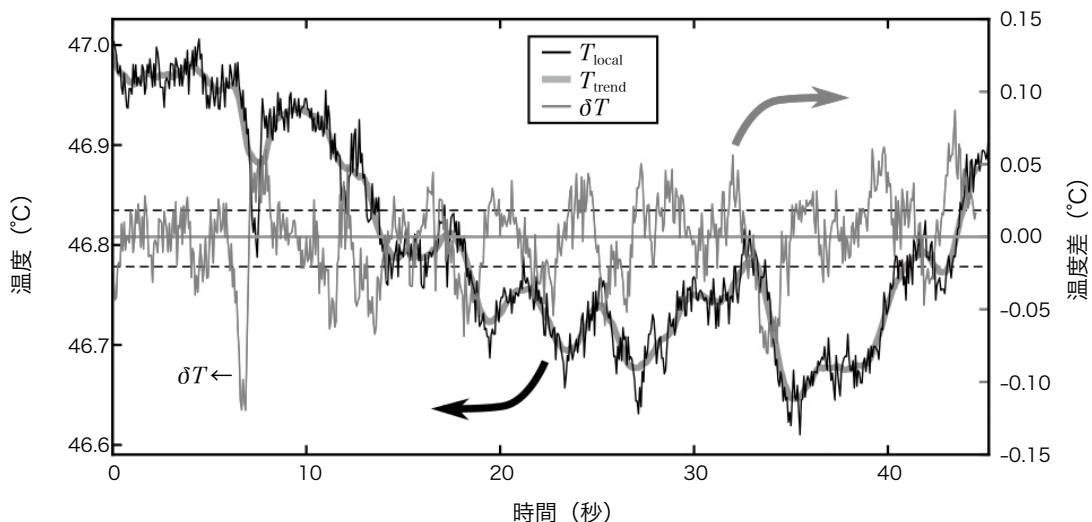


図3 対象の  $T_{\text{local}}$  (黒線)、80フレームの時間平均  $T_{\text{trend}}$  (太い灰色線)、および2つの  $\delta T$  の中央の差異の4フレームの時間平均温度を示す経時的なサンプルピクセルの温度解析 (細い灰色線)。

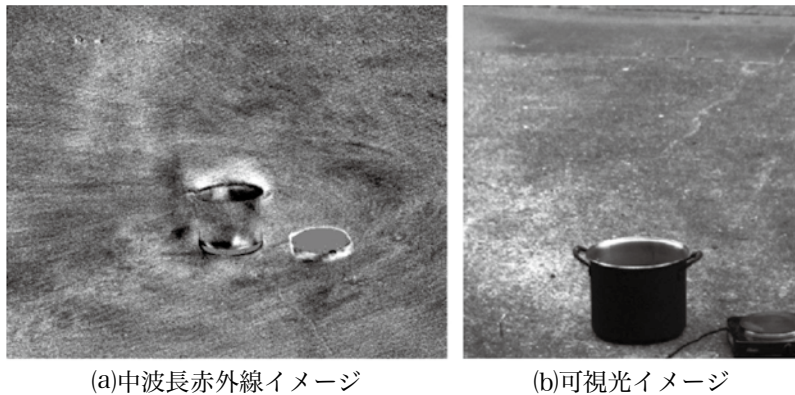


図4 曇りにコンクリートの駐車場の赤外線ビデオを処理したフレーム。シーンの中央には、電気ホットプレート（120 °Cでカメラを飽和状態にする）にバケツが表示される。

される。図1のように、接触サーミスタを用いて、コンクリート（約50°C）と大気（約35°C）が得られ、同様に、光サーモメーターを用いてコンクリート（約49°C）を得ることで、 $\Delta T$ を約15 °Cを決めることができる。曇った空と少雨が降っている間に、図3が撮影されたので、熱コントラストはわずか5 °Cであった。また、ここで撮影されたシーンの風速は1~2 m/sであった。より強い風速は、一般に、シーン内の表面と周囲空気との間の熱的コントラストを減少させ、困難な測定環境となる。図1と図4に示すデータの場合、温度測定から $\Delta T$ を知ることができ、図3に示したように、例示的なピクセルの温度履歴を解析することによって熱構造信号を推定することができる。ビデオの構造をピクセルの熱履歴と関連させることによって、図を破線で示したように、ピクセルを横切る明暗の縞が $\delta T \sim 10\text{mK}$ 程度の熱変化を生じることがわかる。

SNRを評価するには、ノイズの尺度も必要となる。NETD値はサーマルカメラの基本的なノイズ測定値であるが、NETDはイメージングされるサーフェスの温度に

よって変化する。夏の暑い日には、日に焼けたコンクリートは50 °Cに達し、アスファルト舗装は60°C以上の温度に達することがある<sup>7)</sup>。これらの高温はNETDを大幅に改善する。検出器の通過帯域にわたって積分され、検出器の応答性によって重み付けされた各温度での表面の黒体放射スペクトルをモデル化すると、表1に示すさまざまな対象温度についての推定NETD値が得られる。雑音が限られているため、ノイズレベルは光子束からのポアソン分布としてスケールすると仮定できる。

考慮するもう1つの要因は、複数のフレームの合計によるノイズの減少である。図1と図4に使用されるアルゴリズムは、4フレームと80フレーム幅の移動平均を適用する。静的オブジェクト統計を仮定すると、表1は、移動平均データの結果のノイズ推定値を示している。2つの移動平均の差をとることによって、得られるノイズはおおよそ直角に加算されたペアになるので、結果の差分画像のノイズは4フレーム移動平均のノイズとほぼ同じになる。したがって、50 °Cでのコンクリート表面の撮像、12.5 mKの熱変動、6.3 mKのカメラNETDが

表1 QuazIR SDカメラの異なる表面温度を撮像し、表面放射率を0.95と仮定した場合の推定NETD値

表面温度 (°C)	NETD (mK)	4 フレーム平均 NETD (mK)	80 フレーム平均 NETD (mK)
23	15.0	7.5	1.7
30	14.3	7.2	1.6
50	12.5	6.3	1.4
60	11.7	5.9	1.3

SNR=2に相当することになる。

#### 4. 結論

ここで示したパッシブイメージング法は、表面近くの乱流風パターンを測定する方法を提供する。赤外線イメージングは場面の準備を必要とせず、リアルタイムで見ることができるので、広い視野および複雑な形状の上でこれらの現象を可視化する便利な手段をユーザに提供できる。高放射率断熱材は測定のための最良の背景を提供するが、塗装された導電性材料を使用することも可能であるため、車や飛行機などの物体の周りにイメージング風が流れる可能性がある。このような複合的な利点により、サーマルエンジニアは、例えば、複雑な設備の表面上の空気流の冷却効果だけでなく、3D流体モデルを構築することなく流れの方向を可視化することができる。

表面と風との熱的コントラストはこの方法の必要条件であるが、不利な条件（曇りの空と雨）であっても、目に見える流れパターンを作り出すことが可能であることを示したので、広く適用可能である。冷却カメラ（MWIRまたはLWIRのいずれか）は、良好なSN比のため、これらの測定には最適な選択である。

以前の研究ではなく、単一の画像において、高い熱コントラスト条件下、および（フレームあたりのピクセル

の点で）非常に遅い風の動きに、風の表面流の赤外線画像を示した<sup>2)</sup>。冷却カメラは、我々が示した条件によって実用化することができた。特に、ビデオ測定を可能にすることによって、固有の乱気流のダイナミクスを捉えることができる。

#### 参考文献

- 1) N. T. Clemens: "Flow imaging", in Encyclopedia of Imaging Science and Technology, J. P. Hornak, ed., pp. 390-419 (Wiley, New York, 2002).
- 2) A. Inagaki, M. Kanda, S. Onomura, and H. Kumemura: "Thermal image velocimetry", Boundary Layer Meteorology 149, pp. 1-18 (2013).
- 3) B. J. Cantwell: "Organized motion in turbulent flow", Ann. Rev. Fluid Mech. 13, pp. 457-516 (1981).
- 4) T. Itano and S. Toh: "The dynamics of bursting process in wall turbulence", J. Phys. Soc. Japan 70, pp. 703-716 (2001).
- 5) J. Jiménez: "Turbulent flows over rough walls", Ann. Rev. Fluid Mech. 36, pp. 173-196 (2004).
- 6) G. Kawahara: "Theoretical interpretation of coherent structures in near-wall turbulence", Fluid Dynamics Research 41, 064001 (2009).
- 7) T. Asaeda, V. T. Ca, and A. Wake: "Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere", Atmospheric Environment 30, pp. 413-427 (1996).