解説シリーズ「都市気象学の体系化に向けた最近の研究から」

熱画像風速測定法（TIV）による 風の空間分布計測

稲垣 厚至¹⁾

¹⁾ 東京工業大学 大学院理工学研究科
(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1 I4-9)

熱画像風速測定法（Thermal image velocimetry, TIV）とは、地表面の熱画像動画から画像相関解析を用いて地表面近傍風速を測定する手法である。本報告ではその測定原理及び、これまでに行われた観測事例（屋外建物壁面の熱上昇流、人工芝グラウンドで発生した塵旋風、山岳斜面に沿う流れ、ヘリコプターによる空撮の利用）について紹介し、本手法がどのような場面で使えるのか、その適用可能性を探る。

キーワード：Thermal image velocimetry, 空間分布計測, サーモカメラ, 山岳斜面の流れ, 空撮

I. はじめに

地表面近傍では、大気乱流の組織的な運動、地表面の幾何的・熱的な不均一性、人間活動等による不均一な風速分布、特に水平方向に変化する風の場合が形成される。例えば、一般的な風の収束・発散から竜巻や塵旋風などの局所的な渦運動、都市街区の複雑な流れ、局地循環など、我々の生活に直接的な影響を及ぼす現象も多く見られる。これらを定量的に取り扱うためには風速の空間分布計測が不可欠であり、それによって大気環境の診断、予測、あるいは制御に役立てることができる。本報告では2次元面上の速度分布の新たな計測手法である、熱画像風速測定法（Thermal Image Velocimetry, TIV, Inagaki *et al.*, 2013）について、その測定原理及び各種観測事例について紹介する。

地表面付近における水平2次元速度場を計測する手法としては、ドップラーレーダーやドップラーライダーといった気象観測用リモートセンシングの利用（Fujiwara *et al.* 2011）、PIV（Particle Image Velocimetry）の屋外大気観測への応用（Takimoto *et al.* 2011）、超音波風速計等を用いた定点観測の多点計測（Inagaki and Kanda, 2010）などが挙げられる。各手法が測定対象とする空間スケールを考えると

（図-1）、気象リモートセンサの空間解像度は概ね10～100 m程度であり、一方PIVの測定範囲は最大で10 m程度である。超音波風速計等を用いた風速の多点同期計測では、測定範囲を任意に広げることができるが、先述の方法のように高密度な面的計測を行う事は、フローディストーションの影響を考えると現実的ではない。以上より、10～100 mの間に観測手法のスケールギャップが存在していると言え

図-1 各種気象現象と観測手法の時空間スケール（大野 2001 を加筆修正）

Fig. 1 Spatio-temporal scale of velocimetry techniques and meteorological events (After 大野, 2001).

る。空間スケール10~100 mオーダーの気象現象としては、個々のサーマルプルームや筋状構造（例えば、Kanda *et al.* 2004, Watanabe 2004, Inagaki *et al.* 2010）などの大気境界層の乱れに関連したものが主である。これらの構造は地表面と大気間の熱・水・運動量等の直接的な輸送を担っており、各種地表面過程のモデリングにおいてその特性を把握することは重要である。この他に、図-1に示される dust devil（塵旋風）もこの空間スケールに含まれる（Fujiwara *et al.* 2013）。竜巻や海風前線（Iwai *et al.* 2011）の水平スケールはそれらに比べやや大きいものの、概ね同オーダーの現象である。

本報告が取り上げる、熱画像から水平2次元風速分布を測定する手法は、上記のスケールギャップを補うものとして期待される。本手法はサーモカメラにより地表面輝度温度分布を高周波で撮影し、輝度温度分布の変位についてPIVで使われる画像相関解析に基づき算出し、風速ベクトル分布を定量的に計測することができる。PIVとのアナロジーを考え、粒子画像の代わりに熱画像を使うことから、TIV（Thermal Image Velocimetry）と呼ぶこととする。この手法の計測範囲はサーモカメラの撮影範囲とほぼ同じであるため、先述したリモートセンシングとPIVのスケールギャップを埋めることが期待される。また、他の速度計測機器に比べて比較的安価に風速を測定できる利点がある。その他の特徴として、本来の用途である表面輝度温度分布が風速分布と同時に測定されることや、測定対象が平面ではない場合は対象面に沿った流れを推定することができることなどが挙げられる。

本報告において、TIVの測定原理及び特徴、実用の際の注意点、これまでの観測実績について紹介する。本手法に関して記述のあるその他の資料として、本稿のベースとなったInagaki *et al.* (2013) 及び稲垣・神田 (2013) を挙げておく。

II. TIVの特徴と測定原理

図-2に測定原理の概念図を示す。日射が壁面（地表面）を加熱し、気温と壁面（地表面）温度に大きな温度差がある場を考える。壁面や地表面上では後述する乱流組織構造が発達し、それが上空を通過することにより壁面近傍の風速あるいは気温の空間分布に不均一性が生まれ、それが壁-空気間の熱交換を部分的に促進あるいは抑制し、表面温度の不均一

図-2 測定原理の概念図（稲垣・神田, 2013）

Fig. 2 Schematic of velocity measurement by TIV.

性が作られる。この表面輝度温度分布の時系列変化をサーモビデオカメラで計測する。

撮影された輝度温度分布の時系列変化に対し、PIVで使われている画像相関解析を適用する。画像相関解析では時系列的に連続した2枚の画像（画像A、Bとする）を使い、それぞれの画像内において、大きさの等しいある小領域内（検査領域）の輝度温度分布の相関係数を計算する。画像Aの検査領域の場所を固定し、画像Bの検査領域の位置を動かして最も相関係数の高い地点を探索する。その地点を、Aの検査領域で観測された輝度温度分布の移動先であると考え、その移動量を画像A、B間の経過時間で除することで2次元方向の移動速度ベクトルを算出する。Aの検査領域を移動させて同様の操作を行うことで、面的な移動速度ベクトルの分布を得ることができる。ここで、乱流構造の移流速度が壁面近傍における任意の高度の風速の関数として表現されたと仮定し、その関数形を用いることで、乱流構造の移流速度から任意の高度における壁に沿った風速を見積もる。

以上が本計測手法の大まかな手順であるが、以下において、輝度温度画像の取得、流れの可視化、速度場の推定について詳しく述べる。各手順の所々でPIVの技術が応用されるが、本解説ではTIVの特徴に焦点を当てて解説する。これらに加え、本手法に適したサーモカメラの性能について述べる。また、乱流組織構造が計測手法及び観測対象としても重要な位置づけにあることから、まずこれについて簡潔に述べる。

1. 乱流組織構造

屋外の壁面や地表面上では摩擦抵抗や熱的不安定性により乱流境界層が発達している。その中の乱流変動は空間的に無秩序に分布しているのではなく、乱流組織構造と呼ばれる秩序だった空間構造を形成している。例えば先に述べた筋状構造とは流れ方向に伸びた、流れの遅い部分と早い部分が隣り合わせで交互に出現する構造を指し、様々な壁面条件で観測されていることから（例えばTomkins and Adrian 2003, Kanda *et al.* 2004, Watanabe 2004）、対数層のように鉛直シアが卓越する境界層乱流の代表的な構造であると考えられている。また近年の室内及び屋外での観測結果から、super-structureと呼ばれる境界層高度の10倍程度の長さを持つ、境界層内で最大の大きさを持った筋状構造の重要性が検討されており、それが乱流境界層内全ての乱流現象を従属的にコントロールしている可能性が指摘されている（Marusic *et al.* 2010）。浮力が支配的な場ではベナールセル型の熱対流構造（例えばMoeng and Sullivan 1994）が形成される。

これらの乱流組織構造は階層性を持っている。大小様々な構造が境界層内で混在しており、その大きさはそれぞれ境界層高度で概ね規定されることが明らかにされている（Hutchins and Marusic 2007, Yagi *et al.* 2016）。大きい構造（背が高い）ほど壁面から離れた速い風速場の影響を受けることから速い速度で移流しており、小さな（背の低い）構造ほど移流速度は遅い。そのため、見る高度によっては乱流構造の移流速度と平均風速は一致しない。

これら大小の構造はそれぞれ壁面に直接的な影響を及ぼしている。つまり壁面で観測される輝度温度の分布は、大小様々な乱流構造の足跡が重ね合わされた結果である。そのため、輝度温度分布を見るスケール（例えばサーモカメラによる撮影範囲、あるいは画像相関解析における検査領域の大きさ）によって視認される乱流構造の大きさが変わる。

2. 輝度温度画像の取得

本手法が適用しやすいのは、熱容量（ $C_p \rho \Delta z$ ）の小さな壁面及び地表面である。 C_p は比熱、 ρ は密度である。 Δz は表面熱収支の影響を受ける深さであり、熱伝導率（ λ ）や対象物の物理的な厚みで決まる。このパラメータが小さいと、与えられた熱量に対しての表面温度の変化量が大きくなるため、対流熱伝達に対応した温度変動をサーモカメラで捉えやす

い。具体的な例として、植生（人工芝）、砂地、断熱材などは適用しやすく、コンクリートや土壌面といった熱容量の大きな素材については比較的適用困難となる。その他の物質・地表面についてはChristen *et al.*（2012）らにより、微気象学の観点から詳細にまとめられている。測定対象となる面の熱特性及び幾何特性は一樣であるほうが良いが、後述するフィルター操作によって、不均一性をある程度除去できる。

広い撮影領域を確保するにはカメラを対象から十分離さなくてはならないが、距離を取りすぎると水蒸気等による大気放射が無視できなくなる。なおここでいう大気放射の影響とは、物体表面の絶対（輝度）温度に対してではなく、表面温度変動に対する相対的な大きさが重要である。対象物の熱容量が大きい場合は風によって奪われた熱量に対する表面温度変動が非常に小さくなり、微小な水蒸気濃度変動等がもたらす輝度温度の時空間分布変動が無視できなくなることがある。この影響を評価するためには場の水蒸気濃度変動等を計測し、それによる放射影響を見積もることが必要であるが、実用に際した目安として、対象との距離が100 m以内であれば無視できる（Inagaki *et al.*, 2013）。

3. 流れの可視化

輝度温度の空間分布は乱流の働きの他に、対象面の熱特性や表面性状（幾何形状）の不均一性、遮蔽物に因る入力放射の不均一性などにももたらされ、それらは画像解析による追跡精度を悪くする。これに対し、各ピクセルで測定された輝度温度の時系列情報にハイパスフィルターを施すことで（Vogt, 2008）、場に固定された幾何形状や表面熱特性の影響を低周波成分として除去することができ、乱流の影響のみを効果的に抽出できる。フィルターの大きさは観測対象の流れの速度と画像の空間解像度で決められる。つまり画像の解像度が大きいほど、あるいは流れが遅いほど撮影画面内での温度分布の移動量が小さくなるので長時間のフィルターを掛ける必要がある。雲の影が作る地表面の輝度分布はある速度で動くため、本手法で除去することが困難な場合があることから、極力雲の無い条件下での観測が望ましい。

4. 速度場の推定

時間的に連続した2枚の輝度温度画像を画像相関解析にかけて2次元速度ベクトルを算出する。この

速度ベクトルは輝度温度分布の移流速度に対応し、つまりは乱流構造の水平移流速度に相当する。この移流速度を実際の風速にスケリングする必要があるが、それには観測領域内における風速を別途風速計で実測し、その値を参照して変換式を実験的に導く。これまでの観測事例から、両者は概ね線形関係にあるが、大気安定度によって係数の値が変化する結果が得られている(岩塚ら, 2015)。

先述の通り、壁面で発達する乱流構造は様々な大きさを有する渦の集合体であり、それぞれが異なる移流速度で動く(Adrian *et al.*, 2000)。つまり、個々の乱流構造の移流速度と任意の高度の風速を一つの式で関連付けることは困難である。サーモカメラで観測されるのは壁にくっついた乱流(wall-attached turbulence)の足跡であり、それらは乱流構造の大きさ(高さ)によって移流速度が異なる。

一方、これまでの観測結果は移流速度と風速の間の線形関係を示しており、上記の推論に反する。この理由は、ハイパスフィルター操作が追跡する乱流構造のスケール幅をある程度制限し、その限られたスケールの中で最も卓越した表面温度変動の動きを追跡しているためと考えられる。加えて、画像相関係数解析を行う際に検査領域内の空間平均値を差し引くが、これ操作により検査領域より大きな構造の足跡が除去されるため、追跡する構造の大きさが制限される。

5. サーモカメラの選定

本手法を適用する際、サーモカメラの性能に要求される最も重要な点は温度解像度である。熱容量が大きな物体は与えられた(あるいは奪われた)熱量に対する表面温度の変化量が小さくなることから、本手法での流れの可視化が困難である。例えばこれまでの実績として、日中の森林や人工芝では0.1℃程度の温度解像度が必要となるが、アスファルトや表面の粗いコンクリート面、土壌面などではそれより細かい温度解像度を有する機器が必要となる。また、輝度温度のダイナミックレンジが十分細かくても、ノイズが上記の有意な信号に対して十分小さくなければ用をなさない。白色ノイズはハイパスフィルターでは除くことができず、画像相関係数解析においては致命的な誤差を生み出す。ノイズの大きさは機器選定において重要な項目である。

次に重要な点はカメラの画素数である。画像相関係数解析ではより多くの画素(大きな検査領域)を使っ

て輝度温度の移動ベクトルを求めると精度が上がるが、空間解像度が荒くなる。これを解消するにはカメラを近づけて撮影すればよいが、その場合撮影領域が狭くなる。撮影領域と空間解像度はトレードオフの関係にあるため妥協点を見つけて撮影する必要があるが、元々の画素数が大きければ両者両立させることができ、適用可能性が大きく広がる。

撮影周期に関しては、空間解像度が細くなるほど単位時間当たりの移動量(pixel/秒)が大きくなり、移動量が大きすぎると画像相関係数で追跡することが困難となるため、より高い周波数で撮影する必要がある。つまり最適な撮影周期は空間解像度と現象の時間スケールに依存する。これらの目安について以下の観測事例を参照されたい。

III. 観測事例

次に各観測事例について紹介する。事例1, 2の鉛直壁面及び人工芝グラウンドは平面上の流れの測定に適用した例である。事例3の山腹斜面は起伏のある面への適用例であり、流れの可視化結果のみを示す。事例4は空撮で得られた画像を処理したもので、これも流れの可視化結果のみを示す。

1. 鉛直壁面観測

東京工業大学大岡山キャンパス石川台3号館の南側壁面(高さ22.2 m)において熱画像計測を実施した。壁の素材はコンクリートであり熱容量が大きく、乱流変動に起因の輝度温度変動を精度よく測定することができなかった。そこで熱容量の小さいポリスチレンボード(RG-GK-II, Dow Kakoh K.K.)を壁面に添付し、縦壁面近傍の流れを観測した。面積0.91 m × 1.82 mのポリスチレンボード36枚を地上から建物屋上まで、幅2.73 mに渡り隙間なく貼付した(図-3)。これを約8 m離れた向かいの建物から、サーモカメラ(Apiste, FSV-1100)を用いて輝度温度分布を30 Hzで撮影した。画像のピクセル数は240 × 320 pixel、ポリスチレンボードの撮影範囲は14.7 × 2.7 m、1 pixelあたりの空間解像度は最大38 mmとなる。精度検証のため、超音波温度風速計(Kaijo DA600, TR90-AH)を高度21.7 mの位置に、壁面から35 mm離して設置し、50 Hzで風速3成分を測定した。測定期間は2010年12月17日～19日であり、その内快晴で壁面に日射が一様に当たっていた12月17日の11時29分から11時59分に得られた結

図-3 屋外壁面観測領域の模式図 (Inagaki et al. 2013, 稲垣・神田, 2013)

Fig. 3 Schematic of experimental setup in a building wall.

図-4 輝度温度・変動温度・移流速度ベクトルの面分布 (Inagaki et al. 2013, 稲垣・神田, 2013)

(a) 輝度温度, (b) 変動温度, (c) 移流速度ベクトル, (d) ポリスチレンボードの配置

Fig. 4 Distribution of (a) brightness temperature, (b) brightness temperature fluctuation, (c) velocity vectors, and (d) tiling of polystyrene boards.

果を紹介する。

図-4に表面輝度温度、ハイパスフィルターを施

した輝度温度の変動値、移流速度ベクトルの分布を示す。なお、鉛直方向、壁面に平行な水平方向、壁面法線方向をそれぞれ (x, y, z) とし、それに対応した風速を (u, v, w) とする。図中の $x=13.5$ mにある矢印は超音波風速計で計測された30分平均風向を示している。

図-4aの壁面輝度温度分布から、(1) 風向に沿った筋状の構造、(2) 風上側 (左下) の輝度温度が低い領域、(3) ポリスチレンボードの継ぎ目の低温箇所、といった特徴的な分布が確認できる。上記 (1) は風速変動に対応した輝度温度の変動、(2) は移流の影響 (エッジ効果)、(3) は板の継ぎ目の起伏からの剥離の影響と考えられる。つまり、(2) と (3) は壁の幾何形状に起因したものであり、画像相関解析を行う前に除去すべきである。そこで各ピクセルの時系列データにハイパスフィルターを施したのが図-4bである。今回の測定対象については3秒間のハイパスフィルターを施した。これにより風上の低温域と板の継ぎ目の影響がほぼ解消され、コヒーレントな温度分布が得られた。次にハイパスフィルターにより得られた、時間的に連続な2枚の変動温度画像を用いて画像相関解析を行い、輝度温度構造の移流速度を算出した (図-4c)。なお、画像の時間間隔は0.16秒とし、検査領域の大きさは 21×21 pixelとした。風速計の平均風向と比べるとどちらも上昇流を示しており、壁面加熱による熱上昇流が観測されたものと考えられる。このような大局的な流れに加え、壁面上の空間分布として、局所的な風の吹き込みや、発散流などといった複雑な速度分布が確認できる。

次に画像解析から得られた移流速度と、超音波風速計で測定された風速の関係について見てみる。超音波風速計の測定値と最も相関の高かった点 (図-4の $x=13.5$ mにおける円の中心) の移流速度と比較する。図-5は風速及び移流速度をそれぞれ10秒平均してプロットした図であり、両者は概ね線形関係にあることがこの図より確認できる。つまり、この傾きの逆数を移流速度に掛けることで、移流速度から任意の高度 (壁面から35 mmの位置) の風速を推定することができ、これがTIVの風速測定値となる。

ここで、本解析で用いた時間フィルターの大きさの妥当性について述べておく。図-6は時間フィルターの大きさと、風速 (超音波風速計による実測値) と移流速度 (TIVによる測定値) の相関係数についてプロットしたものである。この相関係数をTIVの

図-5 壁面温度の移流速度と壁面近傍風速の比較 (Inagaki *et al.* 2013, 稲垣・神田, 2013)
各プロットは10秒平均値を表す
 u_{SA} : 風速, u_{adv} : 移流速度

Fig. 5 Relationship among wind velocities measured by sonic anemometer and TIV.

図-6 時間フィルターの大きさと測定精度の関係 (Inagaki *et al.* 2013, 稲垣・神田, 2013)
Fig. 6 Dependence of accuracy of measurement by TIV on the size of local high-pass filtering.

精度として考えると、フィルター幅が3秒のところで相関係数が極大となり、最高の計測精度が得られたことになる。その理由として、フィルター幅が大きすぎると低周波の輝度温度変動（例えば日周期など）の影響を除去できず、小さすぎると風に対応した有意な温度変動が除去されランダムノイズに埋もれてしまうためである。

2. 人工芝運動場での観測

2013年2月20日の10時40分から約1時間半、東京工業大学大岡山キャンパスのスポーツグラウンド（人工芝）で表面輝度温度観測を行った。本観測では地表面温度計測にFLIR社のSC5000を用い、地表

面を 320×256 pixel の画像解像度、100 Hz の時間解像度で撮影した。カメラはグラウンド脇にある建物の屋上（地上高49 m）に設置した。これにより水平 41×65 m 以上の領域を撮影することができた。なお、この時の空間解像度は $0.16 \sim 0.25$ m/pixel となり、個々の人工芝葉面は解像されない。この日に観測されたデータより、11時30分から10分間の観測結果を紹介する。

各種解析パラメータとして、画像解析に使用する画像の時間間隔は0.1秒、時間フィルターとして0.04～3秒のバンドパスフィルターを使用した。検査領域については、画像が少し俯角を持っているため、奥行き方向に短い矩形の 15×9 pixel とした。

図-7aは撮影されたグラウンド表面の輝度温度分布位であり、可視画像で視認できる人工芝の模様とグラウンドに引かれた白線が、輝度温度内にも確認できる。この輝度温度分布に時間フィルターを施すと図-7bのようになる。フィルター操作により地表面の模様に対応した輝度温度分布が解消され、生画像からは判別できなかった巨大な渦構造が確認された。なお、この渦は直径約30 m、持続時間は3分以上であり、塵旋風（ダストデビル）と同規模の渦であったと考えられる (Fujiwara *et al.*, 2011)。

図-7cは画像相関形跡より得られた移流速度ベクトル分布であり、上記の塵旋風に対応した渦構造を確認できる。ダストデビルの観測研究ではドップラーレーダー (Bluestein *et al.*, 2004) やドップラーライダー (Fujiwara *et al.*, 2011) を用いた研究が存在するが、それらと比べて格段に時空間解像度が高い点が本手法の特徴であり、相補的な意味で、局所的な気象現象の観測にも有効であると言える。

3. 山岳斜面の流れ

木々が繁茂している山岳斜面への適用を試みた。木々の葉面は薄いので熱容量が小さく、風の影響により輝度温度が大きく変動するものと考えられる。撮影範囲を極力大きくとるため、高所からの撮影が可能な千葉県鋸山の地獄覗きから山々を俯瞰して撮影した。測定範囲は数百m（手前）～数km（奥）であり（図-8参照）、そのため個々の葉面は解像されず、ピクセル内の平均的な輝度温度が測定される。

図-8aは輝度温度の生画像であり、日の当たり方による輝度温度の違いが見て取れる。図-8bはハイパスフィルターを掛けた温度変動値である。動画像にすると画像左（海側）から右（陸側）への流れの

図-7 地表面（人工芝）温度と風速ベクトル分布（稲垣・神田, 2013）

(a) 輝度温度, (b) 変動温度, (c) 移流速度ベクトル

Fig. 7 Horizontal distribution of (a) brightness temperature, (b) brightness temperature fluctuation, (c) velocity vectors on the sports ground.

様子がよく分かるものの、この画像だけでは判別が難しい。そこで図-8bの四角に囲った箇所を抜き出し、その時系列変化を見てみると（図-9）、矢印で示した手前側山腹斜面の低温（黒）部分が時間と共に右側へ移動している様子が分かる。観測領域の左側は東京湾であり、海風による西風に対応した流れ

図-8 山岳斜面の熱画像

(a) 輝度温度, (b) フィルターを施した輝度温度変動
Fig. 8 Brightness temperature on a mountain forest (a) brightness temperature, (b) brightness temperature fluctuation.

図-9 山岳斜面における輝度温度変動の時系列変化
Fig. 9 Temporal evolution of brightness temperature transition.

が観測されたものと考えられる。なおこの時、頻度は少ないが積雲が陸から海（画面右から左）へ流されていたことを目視で確認している。つまり図-8及び図-9で示した輝度温度の変動は雲の影ではない。また、雲の流れで可視化されたリターンフローより下層の流れを観測したものと考えられる。

この図から斜面に沿った輝度温度分布の移動量を計算するには、各ピクセルの値を実際の標高に投影して実空間スケールに直す必要がある。そのため、カメラの位置と角度を正確に計測しておくか、あるいは目印となるものを撮影範囲に入れておく必要がある。対象領域の標高データも必要となる。

4. ヘリコプターを利用した広域観測の試み

より広い面積を撮影するために、ヘリコプターから撮影した画像を使うことを試みた。ヘリコプターを使う利点は撮影範囲の他に、比較的自由な場所で

図-10 空撮による明治神宮周辺の地表面輝度温度

(a) 輝度温度変動の時系列変化, (b) 輝度温度, (c) 可視画像

Fig. 10 Brightness temperature around Meiji-shrine observed from a helicopter

(a) Temporal evolution of filtered brightness temperature, (b) brightness temperature, (c) visible image.

撮影できることが挙げられる。問題点は機体の揺れであり、画像相関解析のみならずハイパスフィルターを用いる際にも大きな誤差となる。揺れの影響を除去する方針としてはソフトによる画像補正、ハードによる姿勢制御が考えられる。後者については、風の影響で数m機体が流されることもあり、ある程度限界があると考えられる。今回は前者の画像補正を用いることで対処した。

観測に関して、2013年の3月21日の正午頃ヘリコプター（B206B ジェットレンジャー、日本フライトセーフティ株式会社）で明治神宮周辺の森を高度900 mから撮影した。この機体は真下を撮影するための窓が設けられており、俯角をあまりつけずに地表面を撮影することができた。天気は快晴であり、大手町の気象観測データを参照すると、この期間風速風向は3.9 m s⁻¹で北北西の風であった。サーモカメラ（SC5000, FLIR）の撮影周期は50 Hzとし、5分間観測対象地点上でホバリングして撮影を行った。図-10は撮影領域を示した図となっているが、長辺で1 km程度の撮影領域が確保された。

得られたデータはまず座標変換により、撮影画像

をグローバル座標に落とし込む操作を行った。その際、平行移動、回転、拡大縮小だけでは画像を一致させることはできず、奥行き方向の回転も考慮する必要があることが分かった。そこで目印となる4点のグローバル及びローカル座標を衛星写真及びカメラ画像から読み取り、射影変換を用いてグローバル座標に投影した。合計、1秒間隔のデータを116枚座標変換し、50秒間のハイパスフィルターを施した。図-10aはハイパスフィルターを施した画像の時系列を示しており、x=500 m, y=700 m付近に見られる高低温のフロント（矢印先端）が左下（南南西）の方に移動している様子が確認でき、同時刻にアメダスで観測された10分平均風向と概ね一致している。なお、図-10b, cはそれぞれ輝度温度の生画像と可視画像である。

以上より、空撮に基づく流れの可視化についてはある程度の成果が得られたものの、画像相関解析から輝度温度の移動ベクトル量を算出するには、さらに高い精度で位置補正をする必要があり、今回の解析では至らなかった。これについては今後の課題である。

IV. まとめ

本報告ではTIVの原理及び、いくつかの適用事例を紹介し、どのような観測が可能であるかについてまとめた。本手法の特徴の一つとして、これまでの手法とは測定原理が大きく違うことが挙げられる。それには一長一短あるものの、とらえず情報量が増えるということであり、他の手法と相補的に使うことで観測精度の向上や、新しい発見につながる可能性を秘めている。

しかしながら本手法はまだ発展段階にあり、いくつかの不確定な理論や技術的に未熟な点が存在する。例えば屋外大気における乱流構造と移流速度（あるいは対数速度分布）との関係性や、平面ではない複雑形状に沿った流れなど知見が少なく、これらについては別途観測および数値解析による検討が必要である。技術面では、画像相関解析の方法、空撮画像の揺れ補正、光学フィルターの利用など、現在確立されている技術の導入による改善の余地は多分にあると考えている。以上のような更なる発展とともに、様々な用途への応用を期待する。

謝辞

本研究は文部科学省の委託事業「気候変動適応研究推進プログラム」及び、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究（A）（課題番号：25249066）において実施した。ここに謝意を表する。

引用文献

- Adrian R. J., Meinhart C. D. Tomkins C. D. 2000. Vortex organization in the outer region of the turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics* 422: 1-54.
- Bluestein H. B., Weiss C. C., Pazmany A. L. 2004. Doppler radar observation of dust devils in Texas. *Monthly Weather Review* 132: 209-224.
- Christen A., Meier F., Scherer D. 2012. High-frequency fluctuations of surface temperatures in an urban environment. *Theoretical and Applied Climatology* 108: 301-324.
- Fujiwara C., Yamashita K., Nakanishi M., Fujiyoshi, Y. 2011.

Dust devil-like vortices in an urban area detected by a 3-D scanning Doppler lidar. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50: 534-547.

Hutchins N., Marusic I. 2007. Evidence of very long meandering features in the logarithmic region of turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics* 579: 1-28.

Inagaki A., Kanda M. 2010. Organized structure of active turbulence developed over an array of cube within the logarithmic layer of atmospheric flow. *Boundary-Layer Meteorology* 135: 209-228.

Inagaki A., Kanda M., Onomura S., Kumemura, H. 2013. Thermal image velocimetry. *Boundary-Layer Meteorology* 149 (1): 1-18.

Kanda M., Moriwaki R., Kasamatsu F. 2004. Large-eddy simulation of turbulent organized structures within and above explicitly resolved cube arrays. *Boundary-Layer Meteorology* 112 (2): 343-368.

Marusic I., Mathis R., Hutchins N. 2010. Predictive model for wall-bounded turbulent flow. *Science* 329: 193-196.

Moeng C. H., Sullivan P. P. 2014. A comparison of shear- and buoyancy-driven planetary boundary layer flows. *Journal of the Atmospheric Sciences* 51(7): 999-1022.

Takimoto H., Sato A., Barlow J. F., Moriwaki R., Inagaki A., Onomura S., Kanda M. 2011. Particle image velocimetry measurements of turbulent flow within outdoor and indoor urban scale models and flushing motions in urban canopy layers. *Boundary-Layer Meteorology* 140: 295-314.

Tomkins C. D., Adrian R. J. 2003. Spanwise structure and scale growth in turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics* 490: 37-74.

Vogt R. 2008. Visualisation of turbulent exchange using a thermal camera. *Proceeding of 18th Symposium on Boundary Layers and Turbulence*: 9-13.

Yagi A., Inagaki A., Kanda M., Fujiwara C., Fujiyoshi Y. 2016. Nature of streaky structures observed by a Doppler lidar. (in revision)

稲垣厚至・神田 学 2013. 熱画像風速測定法TIVによる地表面近傍の大気乱流計測. *ながれ*32:307-312.

岩塚英治・稲垣厚至・張 逸群・神田 学 2015. サーモカメラで観測した屋外地表面温度の移流速度と近傍速度の関係. *土木学会論文集B1 (水工学)* 71 (4) :I_427-I_432.

大野久雄 2001. 雷雨とメソ気象. 東京堂出版;309.

（受付：2015年6月3日，受理：2016年2月4日）

この論文への討議・コメントを，2016年11月末日まで受け付けます。

Application of the Thermal Image Velocimetry to Measure and Visualize Spatial Distribution of Near Surface Wind

Atsushi INAGAKI ¹⁾

¹⁾ Tokyo Institute of Technology
(〒152-8552 Ookayama2-12-1 14-9, Tokyo, Meguro, Japan)

Thermal image velocimetry (TIV) is a method to measure 2-dimensional velocity distribution of near surface wind by using time-sequential thermal images with an image correlation technique. This report introduces the principle of the method and some applications in outdoor environment (e.g. thermal updraft along a heated vertical wall, dust-devil like vortex observed in a sports ground, near surface wind along a complex terrain, and measurement by helicopter) to figure out potential use of this method.

Key words : Thermal image velocimetry, spatial distribution, thermal infrared camera, near surface flow over complex terrain, helicopter observation