

横風を受ける高温噴流の温度場推定法の開発

Development of Estimation Technique on Temperature Field of Heated Jet in Cross Flow

80816668 中谷恵三 (Keizo Nakatani)

Supervisor: 菱田公一 (Koichi Hishida)

1. 緒言

環境評価の観点から、煙突から排出される高温噴流の温度場を定量的に評価する事が望まれている。しかし、実際の煙突のスケールが非常に大きいことから熱電対などを設置して全体を直接計測することは困難である。そこで本研究では、画像処理と数値解析を組み合わせ、非接触かつ広範囲で温度場推定が可能となる手法を開発することを目的とする。

実際の屋外の環境では、自然光により噴流全体が体積照射される事に加えて周囲流体の風向きや速度が変化する為、常に同じ光量や角度で画像を得ることは出来ない。変化する周囲環境を特定するには、2方向より得られる噴流のステレオ画像を用いた手法が有用であると考えた。そこで、ステレオ画像から噴流の縁に現れる特徴的なせん断渦^[2]を用いて位置の対応付けを行い、風向きを算出する方法を考案した。そして、算出した風向きを用いて角度補正を行い、数値解析に与える煙突出口での速度と温度の境界条件を算出し、噴流全体の温度場を推定できるシステムの構築をした。

2. ステレオ撮像システム

図1にステレオ撮像システムの概略図を示す。実験は開放型風洞で行い、煙突を模したパイプには内径 $D=28\text{ mm}$ のアルミパイプを使用した。出口 Re 数 ($=V_0D/\nu_0$) は $2,000\sim 4,300$ 、出口での速度比 $VR (=V_0/U_\infty)$ は $1.0\sim 3.0$ の間で実験を行った。噴流の加熱は流路途中の鉄管にベルトヒータを巻きつけて行い、出口温度 T_0 は 360 K まで加熱可能である。光源には自然光を模擬したハロゲンランプを用いて、噴流全体を体積照射して可視化を行った。ステレオ画像の取得は、同機種の CMOS カメラ (IDT 社 M-3 : 12 bit , $1280\times 1024\text{ pixels}$) を2台使用し、外部信号により同期がとられている。

風向きに対して上流側のカメラを A、下流側を B とし、噴流までの距離を $D_a \cdot D_b$ 、角度を $\alpha_a \cdot \alpha_b$ と定義する。本研究ではカメラの角度を $\alpha_a = 10\sim 25\text{ deg}$ 、 $\alpha_b = 10\sim 40\text{ deg}$ の範囲で変化させて実験を行った。

3. 温度場推定アルゴリズム

3.1 概要 温度場推定手法の概要を図2に示した。画像処理と数値解析を組み合わせ手法では、煙突出口での境界条件となる風向き α [deg.], 噴流温度 T_0 [K], 噴流速度 V_0 [m/s], 横風速度 U_∞ [m/s] を適切に算出する必要がある。風向き α は2方向から同時撮像したステレオ画像を処理して決定する。決定した風向き α を用いて、 V_0 と U_∞ を算出する際に必要な噴流の速度の絶対値が最大である速度噴流軸^[1]の補正を行う。算出した速度を境界条件とし、出口温度 T_0 のみを変化させ繰り返し数値解析を行い、実際の画像から得られる噴流の傾きと比較することで T_0 を決定する。最後に算出した全境界条件を数値計算に代入して、噴流全体の温度場を推定する。数値計算には CDAJ 社の STAR-CD を使用し、 $1,129,776$ 個のヘキサメッシュを作成した。乱流モデルは標準 $k-\epsilon$ モデルを採用し、Boussinesq 近似により温度依存性を考慮して計算を行っている。

3.2 風向き α の算出

ステレオ画像を時系列で比較することにより風向き α を算出する方法を図3に示した。両画像から縁付近に生じる特徴的なせん断渦^[2]を検出することで、位置の対応付けをした領域 A と B を決定する。領域 A と B の位置対応の整合性を高めるために、領域 A を基準に領域 B の周囲で相関係数 R_{AB} を計算し、 R_{AB} が最大となる位置へ領域 B の再配置を行う。対応付けをした領域 A と B それぞれに対して時系列処理を行い速度 U_a 、 U_b を算出し、以下の式に代入して風向きを決定する。

$$\alpha_a = \arctan\left(\frac{U_b / U_a - 1}{\cos \alpha}\right) / \tan \alpha \quad (1)$$

速度 U_a 、 U_b は輝度差累積法を用いて算出しており、サブピクセル精度まで算出するアルゴリズムは取り入れてなく、速度の分解能は1 pixel までとなっている。輝度差累積法は相関関数を用いた手法より計算量が少なく済むことに加え、粒子画像ではなく濃淡画像を用いた場合では、精度が高くなる^[3]ことから採用した。

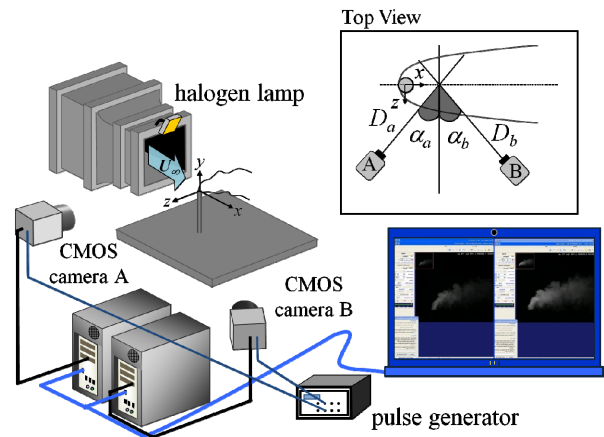


Fig. 1 Schematic of stereo imaging system.

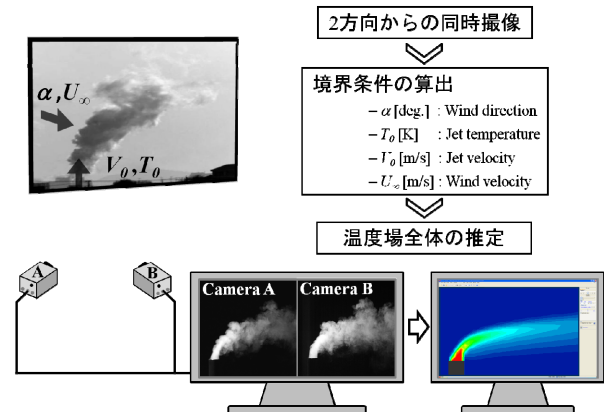


Fig. 2 Temperature estimation system.

3.3 角度補正手法 速度境界条件 V_0 , U_∞ は、決定した風向き α を用いて速度噴流軸の情報の補正を行うことで算出する。図4に正面から算出した U_c と斜めから算出した噴流軸上の x 方向速度 U_{ca} と U_{cb} を比較したグラフを示した。正面の分布 U_c と比較すると、上流側と下流側では算出される分布の傾向が異なっている。 U_{ca} の分布は、上流側では U_c とほぼ同じ値だが、下流側にいくに従い U_c より小さくなる傾向が確認できる。一方、下流側から算出される U_{cb} の分布は、上流側では U_c より小さいが、下流側にいくに従い U_c の値に近づいていくことが確認できる。 U_{ca} と U_{cb} 共に上述した傾向が角度と共に大きくなっている。これは斜めからの撮像面が正面に対して、流れ方向に倍率が異なることにより生じる為であると考え、速度 U_c の分布を角度補正する以下の式を構築した。この式を用いることで、下流側のカメラから算出される U_{cb} を正面から算出される U_c へ補正することが可能となる。

$$U_c = \frac{(X_B + U_{cb}) \times D_b}{D_b \cdot \cos(\alpha_b) + (OX_B + U_{cb}) \cdot \sin(\alpha_b)} \cdot \frac{X_B \times D_b}{D_b \cdot \cos(\alpha_b) + X_B \cdot \sin(\alpha_b)} \quad (2)$$

4. 実験結果及び考察

噴流と周囲流体の条件が $T_0 = 300$ K, $V_0 = 2.45$ m/s, $U_\infty = 1.00$ m/s, $\alpha_a = 20$ deg, $\alpha_b = 25$ deg の条件でステレオ画像から境界条件を算出した結果を示す。実際の環境では2台のカメラを噴流まで同距離に設置することは困難である。本提案手法がカメラの位置に影響されずに適用可能かを検証するため、カメラと噴流までの距離 D_a , D_b をそれぞれ 1120 mm, 2340 mm と大きく変化させて実験を行った。図5は時系列速度 U_b を(1)式に代入して算出した風向き α_{be} の500データの分布を表わしており、平均値は 26 deg. で標準偏差は 7.0 deg. である。目標値である 25 deg. に対して誤差が 1.0 deg. であり、適切に風向きを算出することが出来た。算出した風向き α_{be} を(2)式に代入して U_{cb} を得られた速度 U_c の分布を図6に示した。上流側の U_{ca} も同様に補正すると、2つの分布がほぼ一致している事が確認される。この結果から算出した風向き角度を用いた U_c の角度補正が正確に出来ることを証明できた。本システムを算出された全境界条件は $\alpha_b = 26$ deg., $V_0 = 2.30$ m/s, $U_\infty = 0.95$ m/s となり、ステレオ画像を用いた境界条件算出の有効性を示すことが出来た。図7に $\alpha_b = 10 \sim 35$ deg. の条件で算出した角度結果を示した。算出した風向き α_{be} はすべての条件において誤差が 5.0 deg. 程度であり、本提案手法が風向き角度 35 deg. まで算出出来ることが確認された。 V_0 に関しては、Shandrov の式⁽²⁾を用いて算出しているため、この式の適用範囲である $r = 1.4 \sim 4.7$ の範囲で算出可能となると見積もることが出来る。最後に $\alpha_b = 25$ deg., $T_0 = 335$ K, $VR = 2.75$ の条件で推定した全体の温度分布を図8に示した。算出した境界条件は $\alpha_{be} = 21$ deg., $T_0 = 345$ K, $VR = 2.29$ となった。以上により、変化する周囲流体にステレオ画像を用いて温度場全体を推定出来る事を示せた。

5. 結言

横風を受ける高温噴流に対して、画像処理と数値解析を組み合わせた温度場推定法の開発を行った。ステレオ画像を用いることにより、変化する風向きを誤差 5.0 deg. 程度で算出できる方法を考案した。さらに算出した風向きを用いて速度噴流軸の再構成を行うことで、実流動場を模擬した条件でも温度場全体の推定を可能とする手法の開発に成功した。

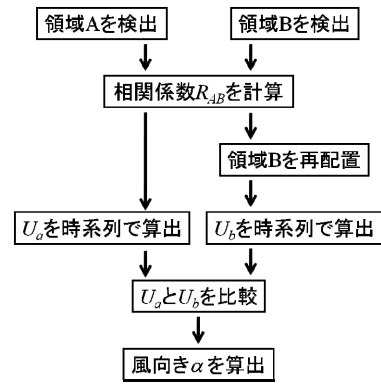


Fig. 3 Evaluation technique of wind direction α .

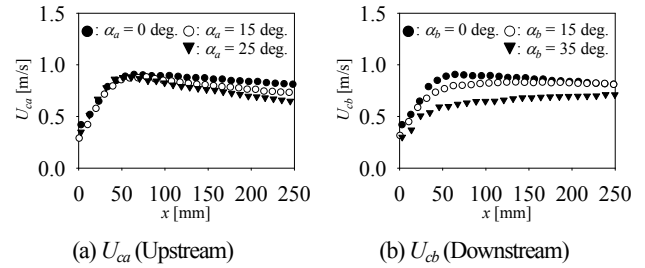


Fig. 4 Comparison of U_c profiles.

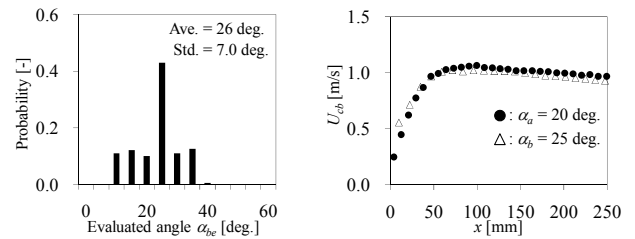


Fig. 5 Results of time-series α_{be} .

Fig. 6 Angular correction of U_c distribution.

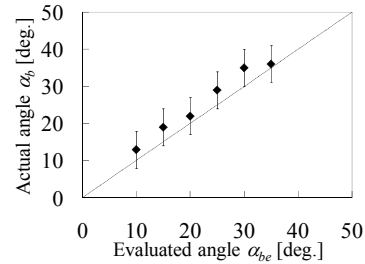


Fig. 7 Results of evaluated wind direction α_{be} .

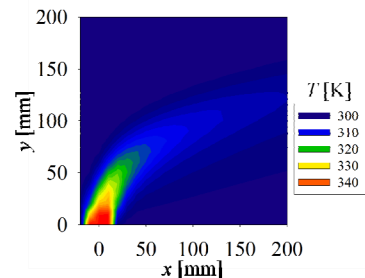


Fig. 8 Estimated temperature field from stereo images.

参考文献

- (1) K. Nakatani, et al., *7th Int. Thermal Fluid Eng. Conference*, **1122** (2008).
- (2) L. K. SU, et al., *J. Fluid Mech.*, **513** (2004), pp. 1-45.
- (3) A. Kaga, et al., *J. Vis. Society of Japan*, **14** (1994), pp.108-115.