

中波赤外線カメラを用いた河川表面流計測の試み

岐阜大学工学部 正会員 ○吉村 英人
 中電技術コンサルタント株式会社 正会員 大森 嘉郎
 中電技術コンサルタント株式会社 正会員 小橋 力也
 建設工学研究所 正会員 藤田 一郎
 名古屋大学大学院工学研究科 正会員 椿 涼太

1. はじめに

近年、河川の流量観測では LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) ¹⁾ や STIV (Space-Time Image Velocimetry) ²⁾ など画像解析による表面流速計測が行われるようになってきた。これらはいずれも河川表面に現れる波紋や人為的に散布した浮遊物をトレーサとして追跡することで流速を求めるが、多くの場合トレーサの分布は疎であるため、主に平均場を求めるために利用されている。本研究では新たに河川表面のわずかな温度差を検知できる中波赤外線カメラを用いて、河川表面流の高密度な平均場と瞬時場の計測を試みた。本報では広島県根谷川において現地観測を行った結果について報告する。

2. 現地観測および中波赤外線カメラ概要

広島県の根谷川丸太橋にて 2022 年 11 月 1 日の平水時に中波赤外線カメラによる撮影を行った。図-1 に観測地点の概要、図-2 に河道断面（低水敷部分）をそれぞれ示す。撮影時には低水敷にのみ流れがあり、最大水深は 0.39 m であった。また、河床には 0.4×0.2 cm 程度の矩形ブロックが点在している。

中波赤外線カメラは河川表面の熱輸送に起因する微小な温度分布を計測することが可能であるため、温度分布による濃淡パターンをトレーサとして追跡することで表面流速を算出する。中波赤外線カメラは FLIR 社製の X8501SC（温度分解能：0.02°C、解像度：1280×1024 pixel、フレームレート：30 Hz）を用い、橋の上から約 10 秒間河川表面を撮影した。撮影は日射の影響が弱い時間帯に行った。得られた動画は幾何補正を行ったうえで画像解析に用いた。

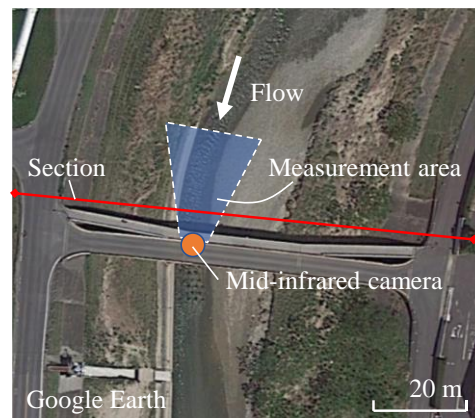


図-1 観測地点概要

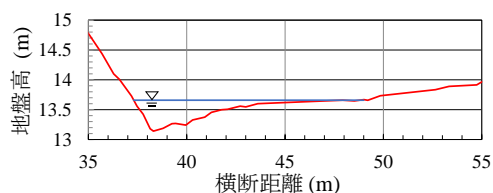


図-2 河道断面（低水敷部分）

3. PIV 解析

画像解析は PIV (Particle Image Velocimetry) により行った。PIV では異なる 2 時刻の画像の輝度分布を比較して移動量を算出するが、粒子画像の場合には相互相関法を用いて比較することが多い。一方、中波赤外線カメラで得られる画像は輝度の濃淡が滑らかに変化しているため、相互相関法では移動量が正しく得られない場合がある。そのため本研究では、式(1)で表される輝度の二乗差 D を用いる MQD (Minimum Quadratic Difference) により移動量の算出を行った。

$$D(m, n) = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [g_1(i, j) - g_2(i + m, j + n)]^2 \quad (1)$$

ここで、 M および N はテンプレートサイズ、 g_1 および g_2 は 1 枚目および 2 枚目画像の輝度、 m および n は画像

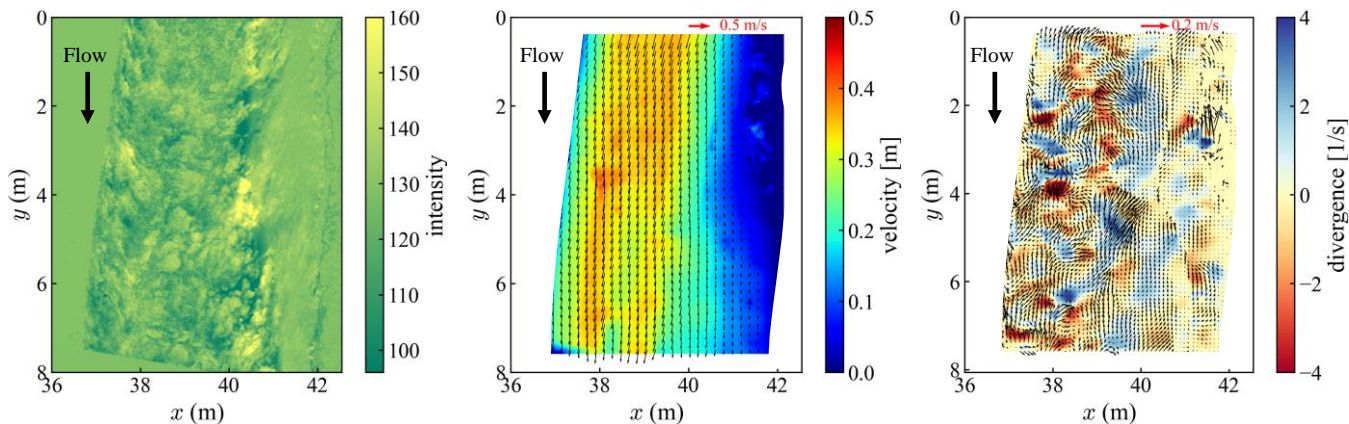


図-3 中波赤外線カメラによる可視化結果

(a) 平均流速分布

(b) 瞬時ベクトルと発散値

図-4 PIV 解析結果

間のピクセル移動量である． D が最小となる m と n を最適な移動量とし，ガウシアンフィッティングによりサブピクセル移動量を求めた．テンプレートサイズは大きいものから再帰的に小さくしていき，最小 32×32 pixel (物理サイズ 0.192×0.192 m) とした．画像のピクセル解像度は 6 mm/pixel であり，2枚の画像間のフレームレートは 5 Hz とした．誤ベクトルはメディアンフィルタにより除去した．

4. 結果および考察

図-3に中波赤外線カメラにより得られた河川表面の可視化結果を示す．図は輝度の時間平均値からの変動成分を抽出して示している．なお，図中 $x \approx 41$ m以上の右岸側では水深が浅く，それ以外の範囲と水温が異なったため，それぞれの範囲で濃淡が明瞭になるように輝度を調整した画像を組み合わせで示している．輝度の濃淡は温度差を表しており，輝度が大きい箇所は相対的に水温が高いことを示している．図より河川中央には水深の数倍程のパッチ状構造があり，河岸にはそれよりも小さいスケールの構造が確認できる．これらはいずれも河川乱流における組織構造を表していると考えられる．

図-4にPIV解析により得られた平均流速分布と瞬時ベクトルを示す．瞬時ベクトルは平均値からの変動成分で示し，表面での発散値 $d = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y$ も合わせて示している．温度分布に起因する濃淡のパターンを追跡することで均一かつ高密度な平均流速分布が得られていることがわかる．河川中央部での平均流速は約 0.35 m/s であり，別途 STIV による求めた結果と概ね一致していた．瞬時ベクトルと発散値からは水深規模の構造が確認できるとともに，湧き出しと潜り込みの流れの様子も見られ，表面における乱流構造が計測できていると考えられる．

5. おわりに

本研究では中波赤外線カメラを用いて河川表面流の可視化計測を行った．河川表面の微細な温度分布を計測することにより水深規模の乱流構造の可視化が可能であることを示した．また，得られた画像を PIV 解析することにより均一かつ高密度な平均場および瞬時場が計測できることを示した．今後は計測データの精度検証を行うとともに，乱流統計量の算出およびそれらを活用した河川乱流場の現象理解を進めていく予定である．

6. 参考文献

- 1) Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A.: Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3), 397–414, 1998.
- 2) Fujita, I., Watanabe, H., & Tsubaki, R.: Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry (STIV). *International Journal of River Basin Management*, 5(2), 105–114, 2007.