

# 熱赤外センサによる流れの可視化

日大生産工（院）○大畑 政人

日大生産工 西川 肇

日大生産工 藤井 寿生

木更津高専 大木 正喜

## 1.はじめに

近年、超音波のドップラー効果を用いて横断面の線上平均流速を直接求める超音波測定法および超音波やレーザーのドップラー効果を利用したドップラー流速計による流速測定法が確立されている。しかしながら、これらのドップラー流速計による流速測定法はあくまでも点流速の測定である。さらに、川幅の広い河川において測定にかなりの時間を要してしまうため、流量変動が激しい出水時には流量・流速がともに変化してしまい、中間流速を得られないというデメリットを有している。

本研究では、対象物から放出される赤外線放射エネルギーを面の温度分布として捉え、可視化情報として表示できる赤外線センサを用い、河川流動面に対する横断方向の流速分布を定量的に推定する手法の構築を目的とした。

## 2.熱赤外の基本概念

### 2-1.熱と熱赤外線について

あらゆる物体の表面温度と放射エネルギーの関係は20世紀の初頭にプランク（Planck）の黒体放射理論として確立されており、絶対温度が0℃以上の物体は構成する粒子が熱運動しており、その運動により電磁波が放射される。その波長域は紫外線域からマイクロ波長域に及び、電磁波の中でも赤外線は物体の温度が上昇するに従いピーク波長が短波長域に移動し、放射するエネルギーが増加する。

近年、物体表面の熱情報を面的に測定する熱撮像装置（熱赤外センサ）の利用が様々な分野で試みられている。この装置は物体表面から放射される熱赤外線の波長の変化から表面温度を面的に測定する装置である。本研究では、この特徴を生かし、流動する河川流路面から放射される電磁波及び放射エネルギーを対象とし、表面流速との検討を行った。

### 2-2.赤外線センサ・システム

現在の赤外線サーモグラフィ及び赤外線カメラのほとんどが2次元センサを使用している。小型軽量化が進み、性能も高画質、高解像度、高温度分解能のものが普及し、その種類も非常に多くなっている。特に赤外線カメラは検出した赤外線エネルギーを輝度で表示するだけであり、地表面や水表面が放射している赤外線放射エネルギーを反射鏡で集め、眼に見える映像に変換して記録する装置である。赤外線センサで得られた熱映像は、測定対象物体の表面温度分布のパターンを温度段階に対応したシュードカラー（高温～低音→赤色～紫色）で表したものとなる。

本研究で対象とする水温は約10℃～30℃であり、表面から放射される電磁波はウィーン（Wien）の変位則より約10μmとなることから、8～14μm（解析温度の範囲：-20～150℃）での赤外線波長域に応答する日本アビオニクス株式会社製の熱赤外センサ（TVS-700シリーズ）を使用した。

---

*Experimental Study on Visualization of Current Using Thermal Infrared Sensor*

*by Masato OHATA, Hajime NISHIKAWA,*

*Hisao FUJII, Masaki OHKI*

### 2-3.温度変換の方法

赤外線センサでは、検出した赤外線放射エネルギーから温度に変換する方法として、温度テーブル方式や計算方式を用いる。いずれの方式も黒体炉を基準に温度校正を行う。

すべての信号処理がデジタル化された今では、温度変換方式は温度テーブル方式と計算方式が主流である。

赤外線センサに入射する赤外線エネルギーは次のとおりである。

$$W_0(T, \lambda) = \underbrace{\varepsilon \cdot (T, \lambda)}_{\text{①}} + \underbrace{(1 - \varepsilon) \cdot W_a(Ta)}_{\text{②}} - \underbrace{W_b(Ta)}_{\text{③}} \quad (1)$$

①熱源からの放射      ②熱源表面での環境反射

③センサ自体の放射

$\varepsilon$  : 放射率 (水の表面放射率=0.96)

$T$  : 熱源温度

$Ta$  : 環境温度

赤外線センサには熱源からの放射エネルギーだけでなく、熱源表面での環境反射と赤外線センサ自体の放射エネルギーも入射する。従って環境温度も同時に測定して温度変換式より、②と③項を除く補正処理を行った上で温度 ( $T$ ) を前途した方程式で求めることになる。

### ステファン・ボルツマン (Stefan-Boltzman) の法則

物質の放射率が定まり、物体表面から毎秒放射されるエネルギーが分かれば物体の表面温度を知ることが分かる。電磁波の全波長にわたる放射エネルギーの総量と絶対温度との関係は

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

$E$  : 絶対放射熱量

$T$  : 周囲温度

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン係数

の式で表される。

### 3.測定手法

#### 3-1.実河川および実験水路における測定

本研究における対象河川として、

- ・福島県会津若松を流れる湯川 (写真-1)  
(平成 15 年 7 月 11 日～12 日)



写真-1 対象河川 (湯川)

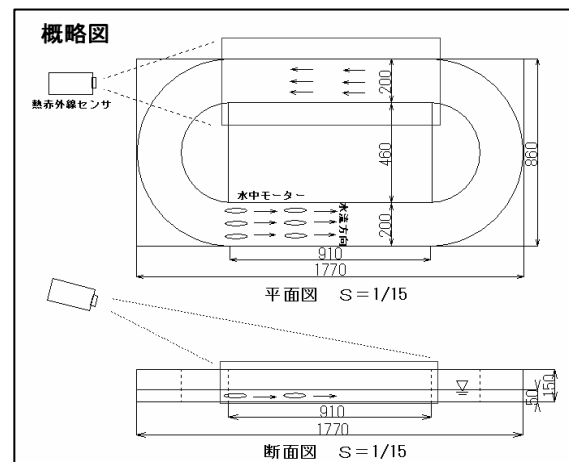


図-1 サーキット型実験水路概略図

- ・長野県白馬を流れる姫川および姫川の支流である犬川

(平成 15 年 10 月 3 日～5 日)

を選定し、調査ならびに測定を行った。

また、検証として、

- ・本学部実験水路 (平成 15 年 8 月～平成 16 年 9 月)
  - ・サーキット型水路 (図-1) (平成 16 年 10 月 22 日)
- を利用して室内実験を行った。

#### 1) 表面温度測定

測定方法は、熱赤外センサを観測面に対して下向きに設置し、下流側から見た上流側の温度分布を観測した。

#### 2) 流速測定

各対象河川における流速は、横河電機製微流速計 CR-7 型を用い、横断方向に 25m ピッチで測定した。測定水深は 6 割水深に固定をして測定を行った。

### 3-2.室内検証実験

#### 1) 水工実験水路

測定における自然条件の影響のない本学科水工実験室の水路を利用して、自然河川と同様の手法による検証実験を行った。これは、バルブ操作により流量を5段階に変化させたときの流動面を対象に、水路の下流側に下向きに設置した熱赤外センサを利用して、上流側の温度分布の観測を行なった。

なお、実験水路の流末に設けた直角三角堰により流量測定した。

#### 2) サーキット型水路

水工実験水路における流量は膨大であり、水温を変化させるのは困難である。そこで最大流量が $0.047\text{m}^3$ であり、水温変化を行えるサーキット型水路を用い実験を試みた。測定条件は以下の通りである。

室内温度： $23.0^{\circ}\text{C}$       水深： $5.0\text{cm}$

全長： $4.60\text{m}$       流量： $0.039\text{m}^3$

水温： $11.0^{\circ}\text{C}$ 、 $19.5^{\circ}\text{C}$ 、 $30.0^{\circ}\text{C}$

なお、水路内に設置したプロペラ式モーターの個数を変えることで、流速を3段階に変化させ、 $4\text{cm}$ ピッチで測定した。

### 4.表面温度と流速との相関解析

#### 1) 自然河川

図-2 に熱赤外センサにより抽出した熱分布画像を示した。

図-3 に、熱分布画像から得られた測定横断ライン上の温度分布ならびに同地点の流速分布を示した。これより、図-4 に、湯川における「流速分布と温度分布との相関」を示した。これを見ると、流速が速くなるに伴い、水表面温度が低く表示されるという良好な負の相関を確認できた。

また、他の自然河川においても多少のバラツキは有るものの、同様に負の相関を確認できた。

#### 2) 室内実験

図-5 に、本学部水工実験水路における相関を示した。これより、自然河川と同様の負の相関関係を確認できた。

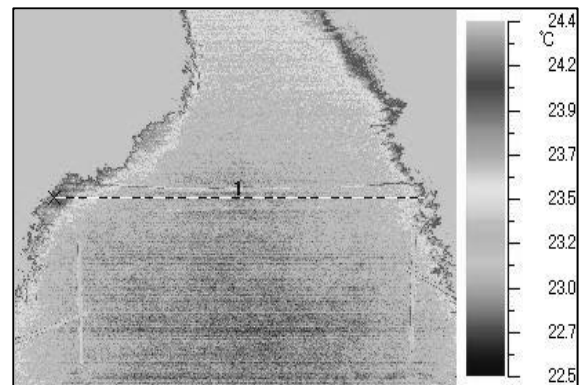


図-2 熱分布画像（湯川）

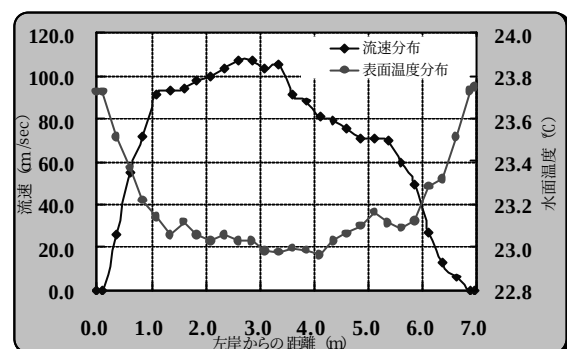


図-3 水面温度—流速グラフ

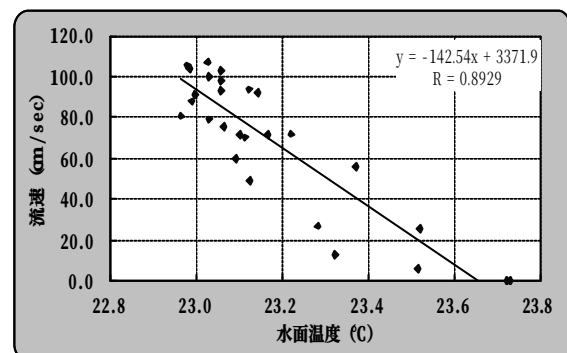


図-4 相関グラフ（水面温度—流速）

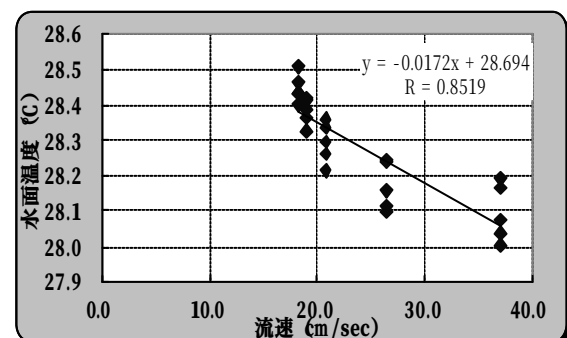


図-5 相関グラフ（水工実験水路）

また、図-6 にサーキット型水路の水温 11℃における流速別熱分布画像を示し、図-7 に各流速における表面温度分布を示した。

さらに表-1 にピクセルごとの最大流速時（平均流速 18.8cm/sec）と静水時（流速 0cm/sec）との表面温度差分を示した。

この結果より、低水時においても流速が速くなるに連れ、表面温度分布が低く表示されることを確認した。

## 5. 総括

本研究より以下の知見ならびに検討課題を得た。

- 1) 各地点での流速分布は流速の遅い範囲では水面温度が高く、逆に流速が速い範囲では水面温度が低く表示される傾向が見られた。
- 2) 自然河川および室内実験のいずれにおいても「流速分布と表面温度分布」との間に比較的良好な相関関係を確認することができた。
- 3) 水の放射率は波長によっても異なるが、0.95～0.98 程度であり比較的放射率は高いほうである。しかし、日中の気温や日射量等の大気の影響は避けられない。したがって測定時のカメラの配置、水表面を観測する角度、場合によっては測定の時間帯などを考慮しなければならないと思われる。

## 6. 参考文献

- ・日本アビオニクス株式会社 TVS-700 AVIO PE Professional 取り扱い説明書 (2000)
- ・赤外線工学 ―基礎と応用― 赤外線技術研究会 オーム社
- ・遠赤外線リモートセンシング熱計測法 岡本 芳三 コロナ社(1994)
- ・熱赤外線映像法による吹き付けのり面の老朽化診断に関する共同研究報告書 建設省 土木研究所 材料施工部 土質研究所 (1996)
- ・宮本仁志ほか：「流速と水面の同時画像

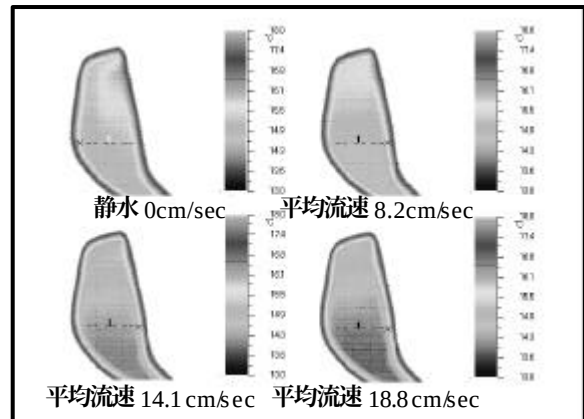


図-6 熱分布画像（水温 11℃）

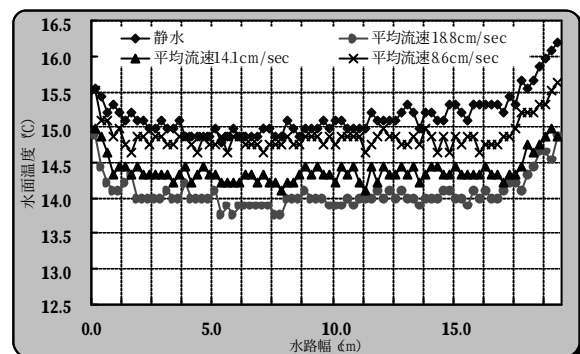


図-7 表面温度分布グラフ

表-1 表面温度差分による定性評価

| PixNo | 最大流速時の水表面温度 (°C) / 静水との水表面温度差 (°C) |               |               |               |
|-------|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|
|       | 左岸からの流速測定距離 (m)                    |               |               |               |
|       | 4                                  | 8             | 12            | 16            |
| 0     | 14.21 / -0.78                      | 14.10 / -1.00 | 13.99 / -1.11 | 14.21 / -1.00 |
| 1     | 14.10 / -0.89                      | 13.99 / -0.89 | 13.99 / -1.00 | 14.10 / -1.11 |
| 2     | 14.10 / -1.11                      | 14.10 / -1.00 | 14.10 / -1.00 | 14.10 / -1.33 |
| 3     | 14.21 / -0.56                      | 13.99 / -1.00 | 13.99 / -1.11 | 13.99 / -1.11 |
| 4     | 14.21 / -0.89                      | 14.10 / -0.89 | 14.21 / -0.89 | 13.99 / -1.33 |
| 5     | 14.21 / -0.67                      | 13.76 / -1.12 | 13.99 / -1.22 | 13.99 / -1.22 |
| 6     | 13.99 / -1.00                      | 14.10 / -0.89 | 14.10 / -1.22 | 14.10 / -1.11 |
| 7     | 14.10 / -0.67                      | 13.99 / -0.89 | 13.88 / -1.22 | 14.10 / -1.00 |
| 8     | 13.99 / -0.56                      | 13.99 / -0.78 | 13.99 / -1.00 | 13.99 / -1.00 |
| 9     | 14.10 / -0.67                      | 13.99 / -0.78 | 14.10 / -0.78 | 13.88 / -1.11 |
| 10    | 13.99 / -1.11                      | 14.10 / -0.89 | 13.99 / -1.22 | 13.99 / -1.22 |

計測による開水路流れの解析」 環境水理部会研究集会 2002 資料

・西川肇・藤井寿生・工藤勝輝・岩下圭之 河川の熱赤外リモートセンシング 日本リモートセンシング学会 第 7 回 学術講演会論文集 (1987)