

最大エントロピー法による表面流速係数を考慮した STIV による流量計測

Discharge measurement using STIV considering Surface velocity coefficient estimated by Maximum Entropy Method

藤 田 一 郎 大 森 嘉 郎 渡 辺 健
Ichiro Fujita Yoshiro Omori Ken Watanabe

1. はじめに

河川表面を撮影したビデオ画像を利用する STIV などの非接触型手法の流量算定は、通常、表面流速に表面流速係数を乗じた平均流速から区分求積法を用いる。一方、河川の鉛直流速分布は河岸からの距離によって変化し、最大流速位置が水面下となる velocity dip も生じる場合があり、一定の表面流速係数の適用は便宜的処置にすぎない。そこで、藤田ら¹⁾は、STIV から得られた表面流速から、鉛直流速分布を理論的に誘導した Chiu²⁾による最大エントロピー法（以下、MEM）の概念に基づく手法を組み合わせる方法を開発し、実河川における計測精度を検討している。

既検討^{1,3)}では、MEM の計算に必要なエントロピーパラメータ M について ADCP 観測結果を基に設定し、複数洪水へ適用した結果、ADCP 観測流量との流量差が数%であることを報告している。一方、エントロピーパラメータ M の設定のために ADCP 観測が 1 度は必要となることから、本手法を新規地点へ適用する場合の課題となっている。そこで、本研究では、「iRIC⁴⁾ (International River Interface Cooperative)」の「Nays CUBE」を用いた 3 次元の数値解析を基にエントロピーパラメータ M を初期値として推定する手法を提案し、その有効性を検討した。その結果、本手法と ADCP 観測流量の流量差は±10%以下と ISO/TR 8363⁵⁾に示されている浮子観測の不確かさ 10%と同等以下であることから実用に供することを確認した。

2. 最大エントロピー法（MEM）の概要

2. 1 鉛直流速分布モデル

河川表面流の横断流速分布を河川流量に変換するためには、任意の断面の鉛直流速分布を推定することが不可欠である。既往の最もよく知られている鉛直流速分布モデルは、次の対数分布である。

$$\frac{u(y)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0} + \psi \left(\frac{y}{H} \right) \quad (1)$$

ここで、 u は河床から y の高さの平均流速、 u_* は摩擦速度、 κ はカルマン定数、 y_0 は粗度高さ、 H は水深、 ψ は水面に近い外側の領域の対数分布からの偏差を表す補正項である。

別の鉛直流速分布モデルとしては、べき乗則がある。

$$\frac{u(y)}{u_{surface}} = \left(\frac{y}{H} \right)^{1/m} \quad (2)$$

ここで、 $u_{surface}$ は表面での平均速度を表し、 m はパラメータである。以下、上記 2 モデルを従来手法と呼ぶ。

2. 2 Velocity dipが生じる場合の鉛直流速分布

上記の鉛直流速分布モデルでは、流速は水面に向かって単調に増加し、最大流速は水面で発生する。ただし、横断面のアスペクト比（川幅／水深）が小さい場合は、水面に向かうにつれて速度低下が発生しやすくなる。長方形の水路では、アスペクト比が5未満のときに最大流速が表面よりも下で発生する velocity dip が発生する⁶⁾。発生の要因は、乱流の異方性により断面内に発生する二次流である。また、河岸の植生によっても velocity dip が発生する場合がある。例として、図-1は、幅40mの川で ADCP により観測された鉛直流速分布を示している。この観測事例では、河岸部の植生の影響も受けて、最大流速は川岸近くの水深の半分で発生している。

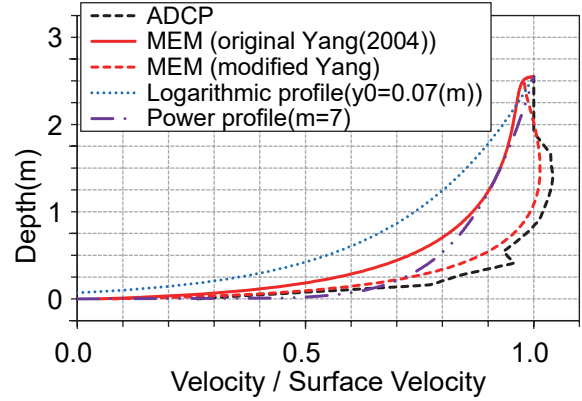


図-1 鉛直流速分布の比較 島田橋観測地点

(左岸から10m)

(2019年10月12日14:20, $U_{10} = +4.89\text{m/s}$)

2. 3 最大エントロピー法による鉛直流速分布

Chiu²⁾によって開発された鉛直流速分布は、確率論の概念に基づいており、その理論は Moramarco ら⁷⁾によって単純化された。鉛直流速分布は次のとおりである。

$$\frac{u(x_i, y)}{u_{max,i}} = \frac{1}{M} F(M, h_i/H_i, y/H_i) \quad (3)$$

$$F\left(M, \frac{h_i}{H_i}, \frac{y}{H_i}\right) = \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{y/H_i}{1 - h_i/H_i} \exp \left\{ 1 - \frac{y/H_i}{1 - h_i/H_i} \right\} \right] \quad (4)$$

ここで、 M はエントロピーパラメータ、 H_i は x_i での水深、 y は河床高から測定された距離、 h_i は x_i での velocity dip が生じる水面からの深さ、 $u(x_i, y)$ は流下方向の流速である。 $u_{max,i}$ は、セクション x_i での最大流速である。MEMによる鉛直流速分布を算定するための各パラメータの概略図を図-2に示す。Chiuの理論²⁾によれば、 M は次の最大流速と平均流速の関係式から計算できる。

$$\phi(M) = \frac{U}{u_{max}} = \frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \quad (5)$$

ここで、 U は断面平均流速を表し、 u_{max} は断面での最大流速である。

式(3)と(4)を表面流速 $u_{surf,i}$ で表すと、 $u_{surf,i}$ から鉛直流速分布が算定できる。

$$u(x_i, y) = u_{surf,i} \frac{F(M, h_i/H_i, y/H_i)}{G(M, h_i/H_i)} \quad (6)$$

$$G\left(M, \frac{h_i}{H_i}\right) = \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{1}{1 - h_i/H_i} \exp \left\{ 1 - \frac{1}{1 - h_i/H_i} \right\} \right] \quad (7)$$

Velocity dip の無い $h_i=0$ の場合、 $G(M, 0) = M$ および $u_{surf,i} = u_{max}$ となり、式(6)は次の形式になる。

$$u(x_i, y) = \frac{u_{surf,i}}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{y}{H_i} \exp \left\{ 1 - \frac{y}{H_i} \right\} \right] \quad (8)$$

ここで、式(6)または式(8)は、鉛直方向の流速分布を表すために表面流速のみを使用しているため、画像解析手法と組み合わせることで、流量を算定できる。また、実用的な目的のために M と表面流速係数 α の離散データを基に図-3のとおり累乗近似すると、式(6)より $1 < M < 9$ の範囲で式(9)のとおりとなる。

$h/H=0$ の dip が無い場合、

$$\alpha = 0.7706M^{0.0932} \quad (\text{決定係数 } r^2 = 0.997) \quad (9)$$

前述のように、velocity dip は主に側面境界付近の二次元流れによって発生する。実際、この現象に加えて、大規模なコヒーレントな乱流構造が流下軸に沿って川の中心に沈下する流れや底面から湧き上がる二次流を引き起こす可能性がある。しかし、そのようにして発生する velocity dip の深さを予測することは困難である。一方、水理模型実験や実観測による断面流速分布の詳細な測定に伴い流速低下の位置、大きさは過去数十年で詳細に調査されてきた。評価に使用した測定データは異なる条件下で測定されているため、velocity dip の位置の式は大きく異なるが、本研究では実測流量の再現性から、Yang ら⁸⁾が提案した次の式 (10) を使用した。

$$\frac{h_i}{H_i} = 1 - \frac{1}{1 + 1.3 \exp\left(-\frac{x_i}{H_i}\right)} \quad (10)$$

ここで、 x_i は、図-2 に示すように、川岸から i 番目のセクションまでの距離である。

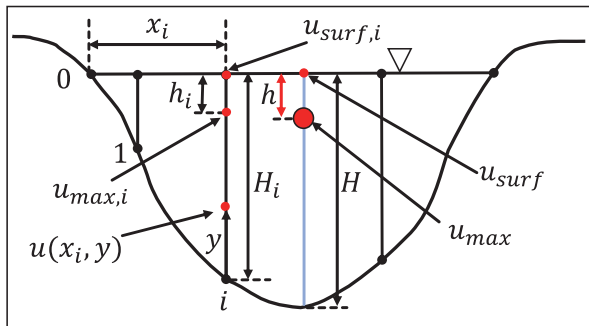


図-2 MEM による鉛直流速分布を算定するための各パラメータの概略図

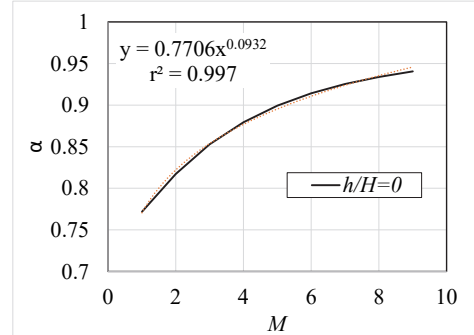


図-3 エントロピーパラメータ M と表面流速補正係数の関係

2. 4 エントロピーパラメータ M の初期設定値の提案

MEM による流量推定の精度は、主にエントロピーパラメータ M の設定に影響される。エントロピーパラメータ M は対象断面における最大流速と断面平均流速の関係を規定しており、水位に依存せず断面固有の値を示すことが既往研究で報告されている^{9,10)}。適切なエントロピーパラメータ M の設定には ADCP などによる断面流速分布（最大流速と断面平均流速）の計測が少なくとも 1 度は必要であり、このことが MEM を新規の観測地点へ適用する場合の課題となっている。この課題への対処方法として、新規地点におけるエントロピーパラメータ M の自動推定手法も提案されているが¹¹⁾、解析による断面平均流速 U と断面最大流速 u_{max} の比 U/u_{max} が 0.5 程度となるようなケースでは、適切なエントロピーパラメータ M が推定できないことも明らかとなっている¹²⁾。本研究では、「iRIC (International River Interface Cooperative)」の解析ソルバー「Nays CUBE」を用いた 3 次元の数値解析結果を基にエントロピーパラメータ M を推定した場合の適用性検証を行った。

3. 実河川への適用

3. 1 飯室観測地点における流量算定

3. 1. 1 飯室観測地点諸元と STIV による表面流速算定

実河川への適用例として、太田川水系の飯室観測地点を示す。ビデオ画像は遠赤外線カメラ (FLIR 製 FC-632-O) で撮影した。解像度は 640×480 ピクセルで、焦点距離 19mm のレンズを使用して、水面幅約 120m を撮影した。計測機の位置を図-4 に示す。カメラの画角付近を ADCP (River Pro ADCP, Teledyne RD) によって計測した。対象洪水は、2020 年 6 月 19 日 4:00 と 2020 年 7 月 14 日 3:00 である。測定時のハイドログラフを図-5 に示し、STIV (deep learning)¹³⁾から

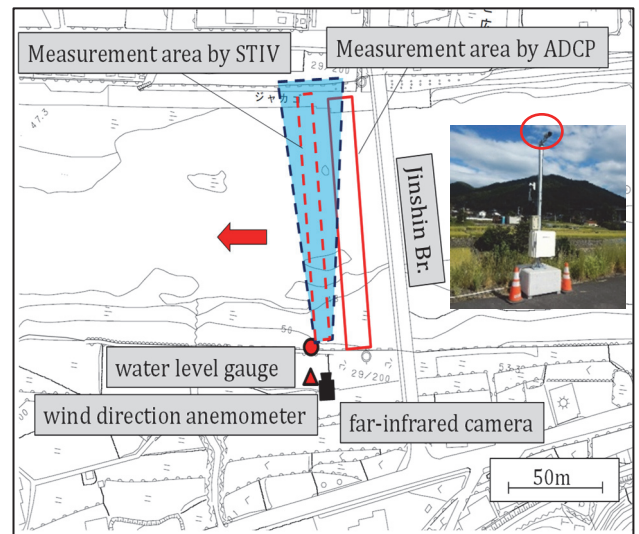


図-4 飯室観測地点位置図 (写真中の赤丸はカメラ)

求めた表面流速分布と ADCP 観測の比較を図-6に示す. 作成した STI を図-7に示すが, 深夜の観測にも関わらず STI の縞パターンは明瞭に確認できる. なお, 風速は無風であった.

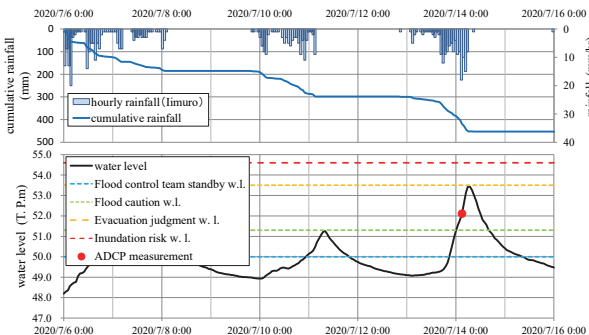


図-5 飯室観測地点ハイドログラフ (2020 年 7 月 14 日)

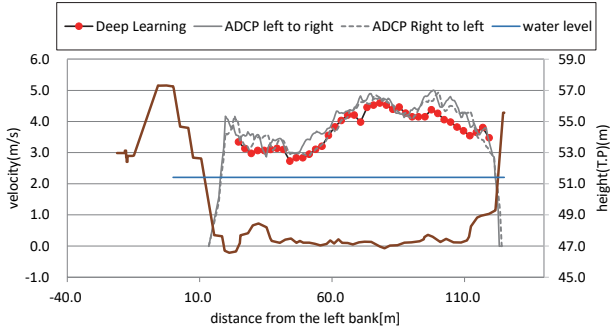
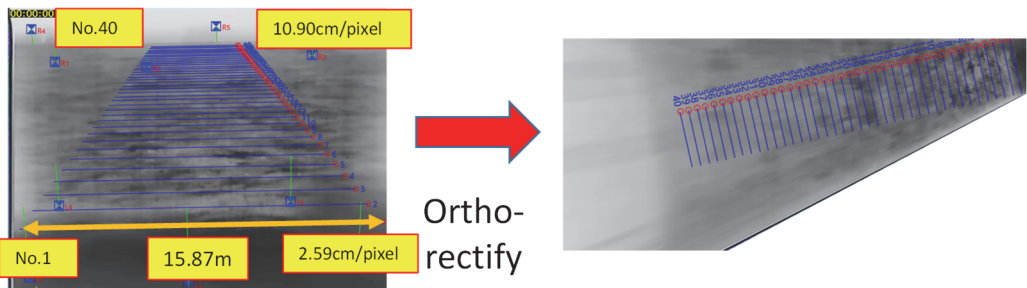
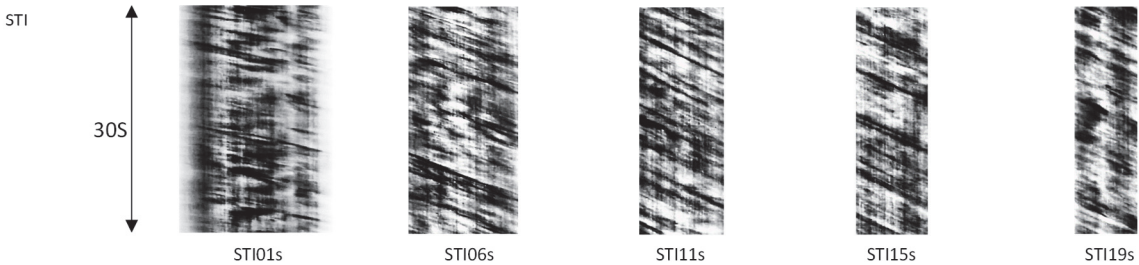


図-6 表面流速分布の比較 (2020 年 7 月 14 日 3:00)



STI	No.1	No.6	No.11	No.15	No.19
distance(m)	27.26	39.43	51.59	61.33	71.06
resolution(cm/pix)	2.59	3.66	4.72	5.57	6.42
Depression angle(deg)	20.16	14.24	10.98	9.27	8.02
Velocity(m/s)	3.42	2.98	3.14	3.68	4.20



STI	No.23	No.27	No.31	No.35	No.40
distance(m)	80.80	90.53	100.27	110.00	122.17
resolution(cm/pix)	7.28	8.14	9.02	9.86	10.90
Depression angle(deg)	7.06	6.31	5.70	5.20	4.68
Velocity(m/s)	4.52	4.18	4.33	4.15	3.22

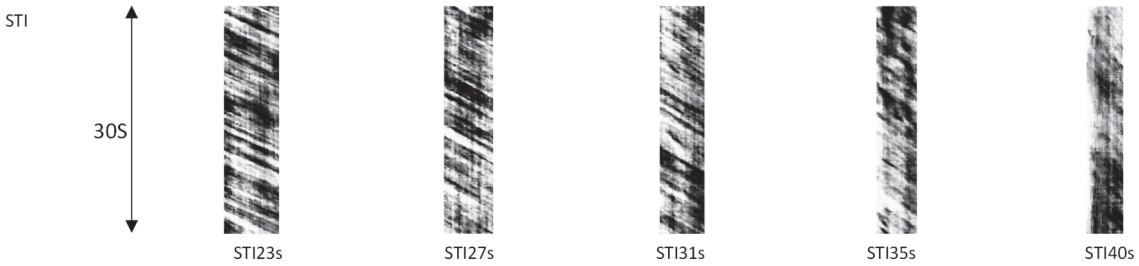


図-7 生成された STI の諸量 (2020 年 7 月 14 日 3:00)

3. 1. 2 iRICによるエントロピーパラメータ M の推定

エントロピーパラメータ M は図-9に示すとおり、iRIC を用いて流量規模を変化させた断面平均流速 U と断面最大流速 u_{max} の比を基に推定した。解析条件を表-1に示し、横断流速分布のコンター図を図-8に示す。本研究における MEM の適用地点は、浮子観測地点であり、通常第1断面から第2断面間の断面変化が少ない直線区間である。このような地点では、断面平均流速 U と断面最大流速 u_{max} の比が概ね一定のため、数値解析は、一定勾配で同一横断面が続いていると仮定し、3断面のみを用いた周期境界条件で横断面内の流速分布を求めた。数値解析の結果、 $\phi(M) = 0.659$ となり、式(5)よりエントロピーパラメータは $M=2.04$ となった。表面流速係数に換算すると $\alpha=0.824$ になる。

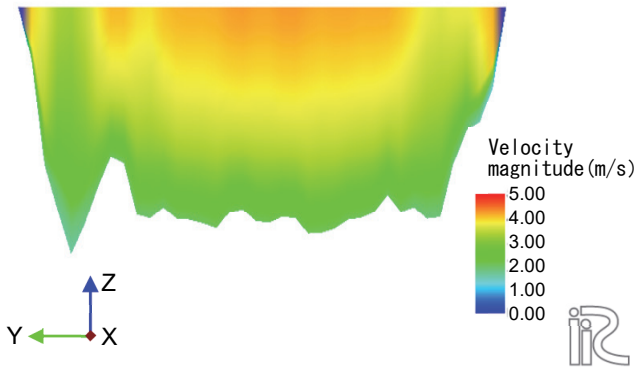


図-8 iRIC (Nays CUBE) を用いた横断流速分布
(2020年7月14日3:00 ADCP 観測流量:1,322m³/s)

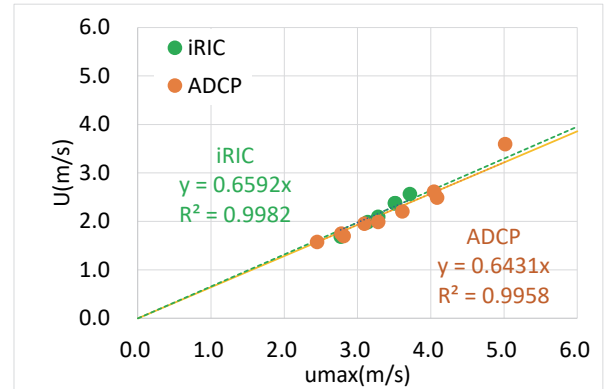


図-9 iRICによる $\phi(M)$ の算定
(ADCP 観測による $\phi(M)$ の算定も示す)

表-1 解析条件基本パラメータ

基本パラメータ	横断方向格子サイズ	飯室：約 3.0m メッシュ 島田橋：約 0.5m メッシュ
	鉛直方向格子分割数	10
	固定床/移動床	固定床
	乱流モデル	二次元非線形 $k-\varepsilon$ モデル
	移流項の空間差分スキーム	三次精度 TVD-MUSCL スキーム
時間に関する条件	計算終了時間 (s)	3600
	計算時間間隔	CFL 条件による可変 Δt
流れに関する条件	流量 (m³/s)	ADCP 観測流量
	下流端水位 (m)	等流水深
	初期水面勾配	飯室:1/370, 島田橋: 1/360
	底面のマンニングの粗度係数	河道計画における設定値
主流方向の周期境界条件	通常周期境界条件	
横断方向の周期境界条件	左右岸対象条件	通常境界条件

3. 1. 3 MEMによる流量推定とADCP観測との比較

画像解析手法による流量は、STIV から得られた横断流速分布から MEM により鉛直流速分布を算定し、区分求積法より算定した。ADCP 観測と画像解析手法による流量の対比結果を図-10に示す。本手法の ADCP 観測との流量差は±3%以下と ISO/TR 8363⁵⁾に示されている浮子観測の不確かさ 10%と同等以下であることから実用に供すると判断した。なお、従来手法の内、べき乗則は ADCP 観測との流量差は±3%以下であったが、対数分布は±10%以上の流量差となるデータもあった。

横断流速分布、鉛直流速分布の対比結果を図-11、図-12に示す。いずれも良好な一致が確認され、左岸から 4m 付近で生じていた Velocity dip についても再現ができていた。ただし、左岸からの距離 70m の橋脚付近の流速分布は一部再現ができていなかった。この理由は、両者の計測断面に 20m 程度のずれがあったことが一因と推定される。

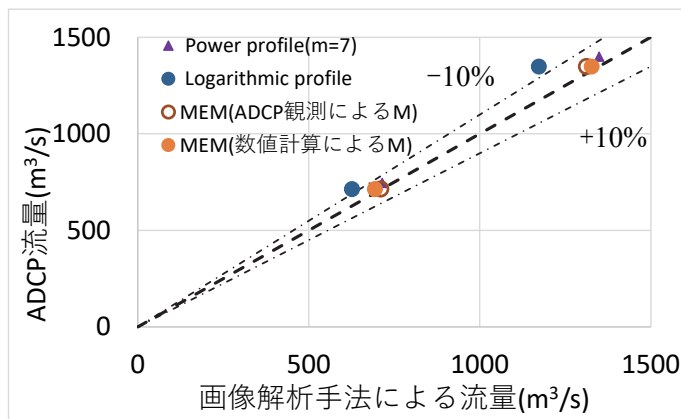
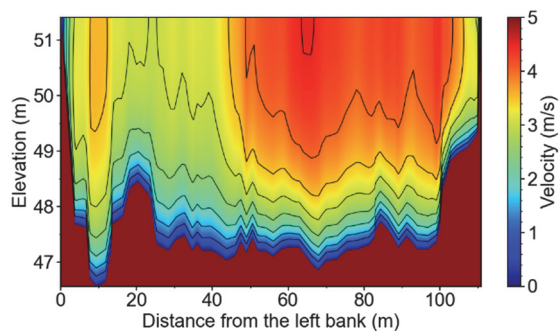
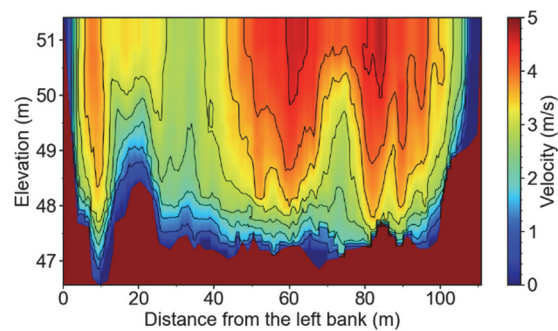


図-10 ADCP 観測と画像解析流量の比較

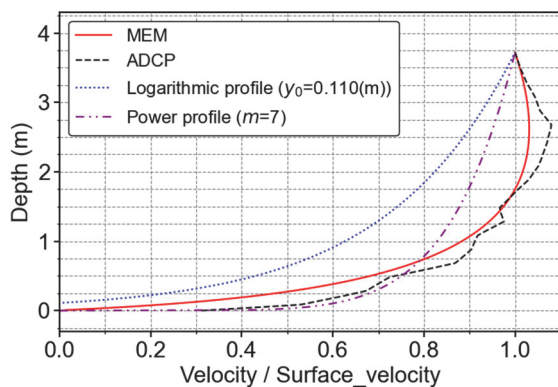


(MEM 再現 #=2.04)

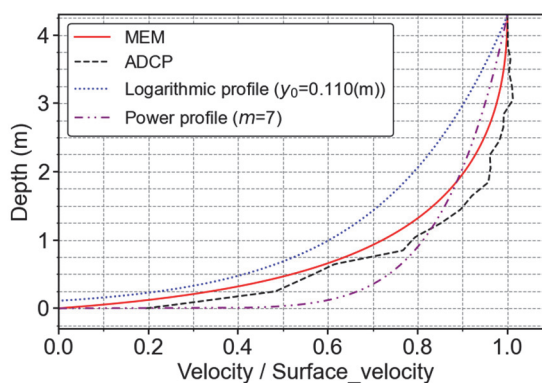


(ADCP 観測)

図-11 横断流速分布の比較 (2020 年 7 月 14 日 3:00)



左岸から 4m



左岸から 56m (河央)

図-12 鉛直流速分布の比較 #=2.04 (2020 年 7 月 14 日 3:00)

参考として、従来の MEM による流量推定方法と同様に、ADCP 観測から算定したエントロピーパラメータ $M=1.81$ ($\phi(M)=0.6431$) を用いて計算した場合も ADCP 観測流量との流量差は $\pm 10\%$ 以下であった(図-10). 表-2 にエントロピーパラメータ M を変化させて流量の感度を確認した結果を示す. 流量の相対誤差 ΔQ は、ADCP 観測流量に対して計算されるが、 M の 1.0 程度以下の違いは、流量に大きな影響を与えないことを確認した.

なお、本研究では、iRIC の計算における粗度係数を当該河川の河道計画検討時の値とした. 実際の洪水時の観測水位、ADCP 観測結果と合致させるため粗度係数などを変化させた場合には、平均流速と最大流速の比 (ϕ) が若干変化することに注意する必要がある. ただし、上述のとおり M の 1.0 程度以下の違いは、流量に大きな影響を与えないため、本手法はエントロピーパラメータ M の一次推定値としては問題なく使用できるものと考えられる.

表-2 エントロピーパラメータ M の感度分析 (2020 年 7 月 14 日 3:00)

M	1	1.5	2	2.04	2.5	3	3.5	4	4.5	5
α	0.77	0.80	0.82	0.82	0.84	0.85	0.87	0.88	0.89	0.90
$\Delta \alpha (\%)$	-6.43	-2.83	-0.18	—	1.91	3.66	5.16	6.48	7.65	8.71
$Q(m^3/s)$	1,254	1,291	1,324	1,326	1,353	1,379	1,401	1,420	1,436	1,451
$\Delta Q (\%)$	-5.44	-2.65	-0.16	—	2.04	3.97	5.63	7.07	8.31	9.38

3. 2 島田橋観測地点における流量算定

3. 2. 1 島田橋観測地点諸元と STIV による表面流速算定

小規模河川への適用例として、雲出川水系中村川の島田橋観測地点を図-13に示す. ビデオ画像はカラーカメラ (2019 年 10 月 12 日出水: Panasonic, WV-SUD638, WV-SUD6FRL1, 2020 年 10 月 10 日出水: Watchcam WIIV-V200D14) で撮影されたことを除けば解析条件などは飯室観測地点と同様である. エントロピーパラメータ M は、先述と同様に iRIC による解析結果(図-14)より図-15のとおり $\phi(M)=0.7226$ ($M=3.06$) と設定した. 表面流速係数に換算すると $\alpha=0.855$ になる. なお、STI の作成結果は図-16に示すとおり、STI の縞パターンは明瞭であった.

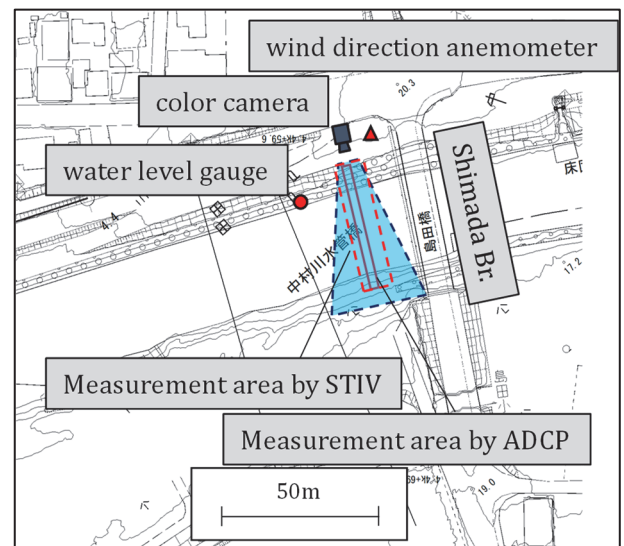


図-13 島田橋観測地点位置図



図-14 iRIC (Nays CUBE) を用いた横断流速分布
(2019 年 10 月 12 日 14:20)

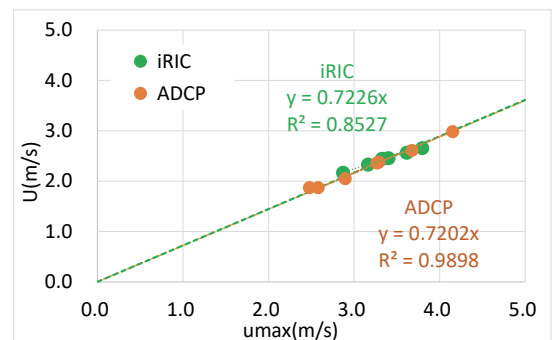
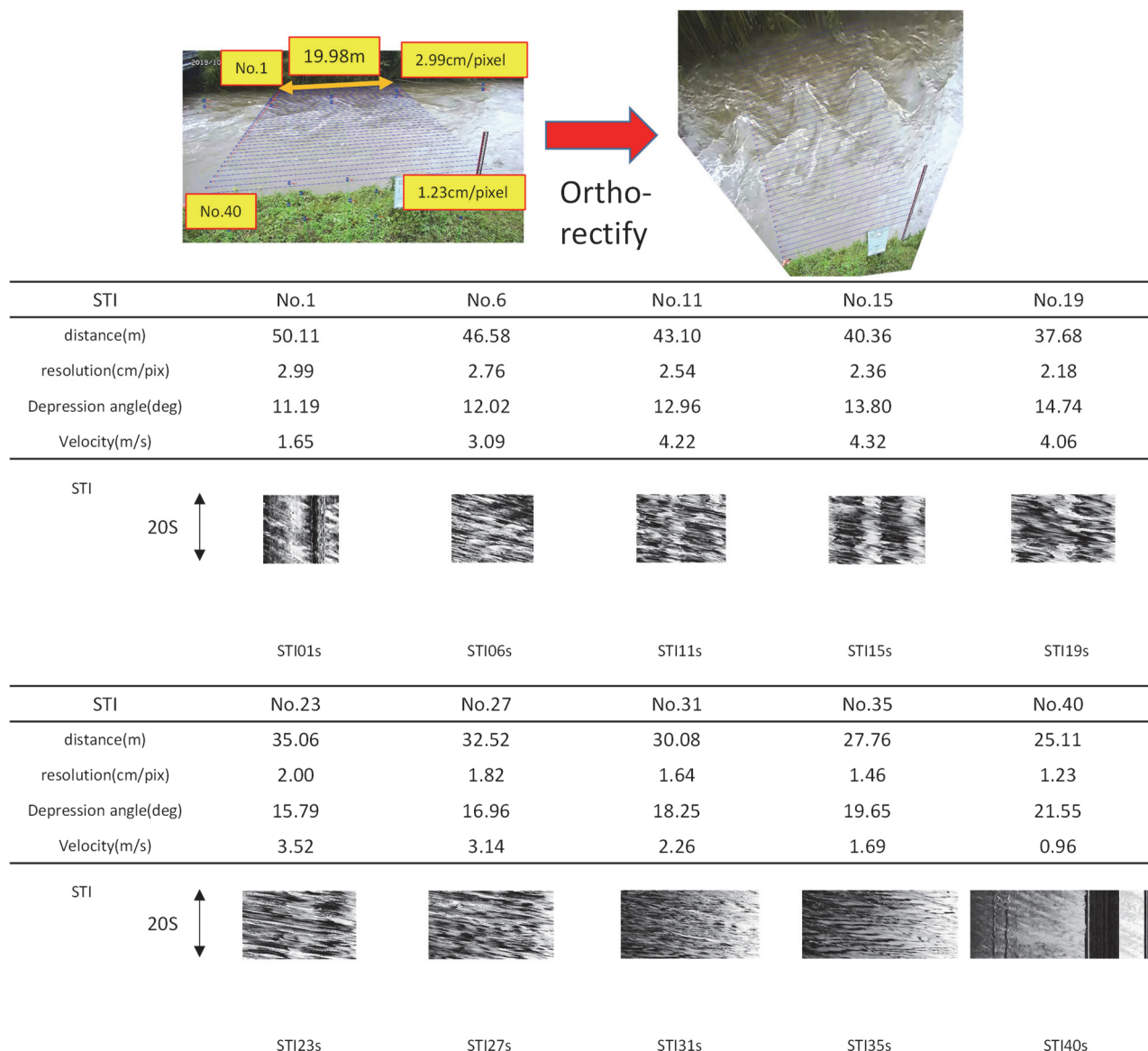


図-15 iRIC による $\phi(M)$ の算定
(ADCP 観測による $\phi(M)$ の算定も示す)



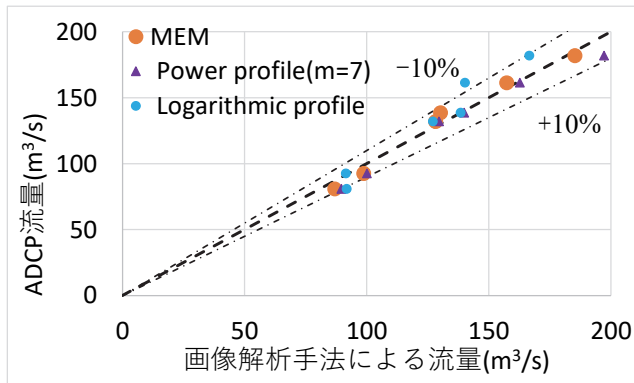
図ー 1 6 生成された STI の諸量 (2019 年 10 月 12 日 14:20)

3. 2. 2 MEM による流量推定と ADCP 観測との比較

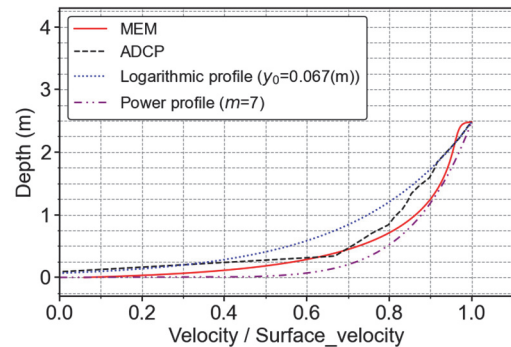
ADCP 観測と画像解析手法による流量の対比結果を図ー 1 7 に示す。本手法及び従来手法の ADCP 観測流量の流量差は、対数分布の 1 データを除き ±10% 以下であり、河道中央の鉛直流速分布の再現性についても図ー 1 8 に示すとおり良好であった。また、図ー 1 9 に示す横断面全体の流速分布については、水面近くに加えて、内部も概ね一致していた。これは、今回、対象とした出水規模が小さく、橋脚の影響が小さいためと考えられるが、本手法はアスペクト比の小さい河川でも適用できることが示唆された。

一方、図ー 1 に示す左岸から約 10m における河岸付近の植生の影響により発生した velocity dip は、再現できなかった。これは、式 (10) に示す Yang の式は、 x_i と h_i のアスペクト比が 4 以下の河岸で生じる velocity dip を示す経験式のため今回のようにアスペクト比が 5 付近で生じた velocity dip は表せない。そこで、アスペクト比に関連する x_i と h_i の項の係数を式 (11) のとおり試算的に変更した結果 (図ー 2 0)、velocity dip の傾向が図ー 1 のとおり再現できた。なお、植生とアスペクト比の関連に関する研究は十分に行われていないので今後の検討課題である。

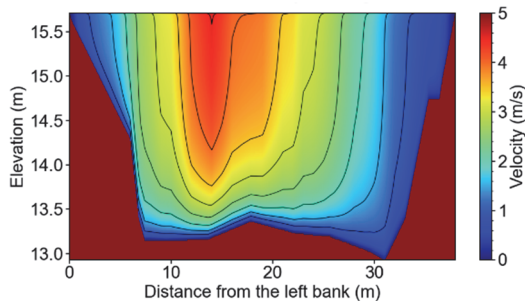
$$\frac{h_i}{H_i} = 1 - \frac{1}{1 + 1.3 \exp\left(-\frac{x_i}{6H_i}\right)} \quad (11)$$



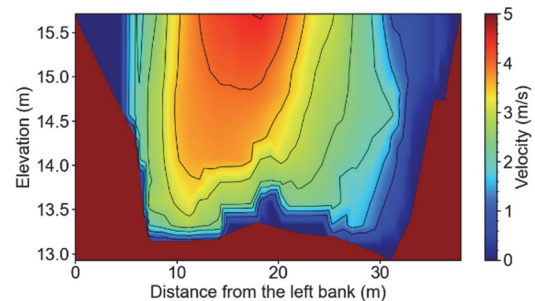
図－１７ ADCP 観測と画像解析手法による流量の比較



図－１８ 鉛直流速分布の比較 左岸から 20m(河央)
(2019 年 10 月 12 日 14:20)

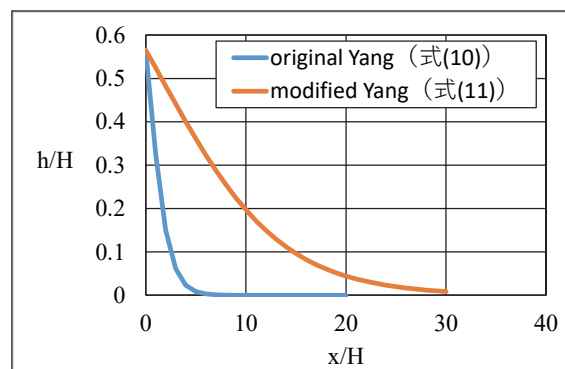


(MEM 再現 ($M=3.06$))



(ADCP 観測)

図－１９ 流速横断部分布の比較 (2019 年 10 月 12 日 14:20, $U/U_0 = +4.89\text{m/s}$) ($M = 3.06$)



図－２０ アスペクト比と velocity dip が生じる水面からの深さの関係

4. 結論

本研究では STIV と MEM を組み合わせた流量測定手法の適用性を ADCP 観測と比較することで議論した。また、エントロピーパラメータ M を「iRIC (International River Interface Cooperative)」を使用した 3 次元の数値解析結果より推定した場合の適用性検証を行った。得られた結論は以下のとおりである。

- ・STIV から表面流速分布を算定し、MEM により流量を求めた結果、ADCP 観測流量を $\pm 10\%$ 以下の流量差で再現でき、今回対象とした地点では、流量値の再現性は従来手法のべき乗則と同等、対数分布より改善が図れた。
- ・3 次元の数値解析結果から得られた最大流速と断面平均流速の関係よりエントロピーパラメータ M を設定する手法

は、ADCP 観測流量を±10%以下の流量差で再現できたことから、新規観測地点へ MEM を適用する場合に有効的な手法であることを確認した。

- ・MEM は河岸付近の植生により生じた **velocity dip** を再現できることから、対数則法などの従来手法よりも流量算定の自由度が高いことを確認した。

- ・エントロピーパラメータ M を変化させて流量の感度を確認した結果から M の 1.0 程度以下の違いは、流量に大きな影響を与えないことを確認した

謝辞:本研究の遂行にあたりデータのご提供をいただきました国土交通省中部地方整備局、中国地方整備局に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 藤田一郎, 濱田拓也, 西山貢平, 谷昂二郎:最大エントロピー法による流量観測の高度化と時空間画像を用いた河川表面乱流場の計測, 土木学会論文集 B1(水工学), 第 75 巻, NO. 2, pp. I_631- I_636, 2019.
- 2) Chiu, C.L.:Velocity distribution in open channel flow, Journal of Hydraulic Engineering, 115(5), pp. 576-594, 1989.
- 3) 大森 嘉郎, 藤田一郎, 渡辺健, 井口真生子:最大エントロピー法と STIV を組み合わせた流量測定, 河川技術論文集, 第 28 巻, pp.1-6, 2022.
- 4) iRIC HP, <https://i-ric.org/about/>
- 5) ISO/TR 8363.: Measurement of liquid flow in open channels – General guidelines for selection of method, 1997.
- 6) Chiu, C.L., Tung, N.C.: Maximum velocity and regularities in open-channel flow. Journal of Hydraulic Engineering, 128(4), pp. 390-398, 2002.
- 7) Moramarco, T., Barbetta, S., Tarpanelli, A.: From surface flow velocity measurements to discharge assessment by the entropy theory, Water, 9(2), pp.1-12, 2017.
- 8) Yang, S.Q., Tan, S.K., Lim, S.Y.:Velocity distribution and dip-phenomenon in smooth uniform channel flows, Journal of Hydraulic Engineering, 130, pp.1179-1186, 2004.
- 9) Moramarco, T., Saltalippi, C., and Singh, V. P.: Estimation of Mean Velocity in Natural Channels Based on Chiu's Velocity Distribution Equation, J. Hydrol. Eng., Vol. 9, No. 1, pp. 42-50, 2004.
- 10) Luo, H. and Singh, V. P.: Entropy Theory for Two-Dimensional Velocity Distribution, J. Hydrol. Eng., Vol. 16, No. 4, pp. 303-315, 2011.
- 11) Farina, G., Alvisi, S., Franchini, M., and Moramarco, T.: Three Methods for Estimating the Entropy Parameter M Based on a Decreasing Number of Velocity Measurements in a River Cross-Section, Entropy, Vol. 16, No. 5, pp. 2512-2529, 2014.
- 12) 渡辺健, 藤田一郎, 南良忠, 大森嘉郎, 井口真生子:STIV 計測値を用いた最大エントロピー法のパラメータ自動推定手法の検証, 土木学会論文集 B1(水工学), 第 78 巻, 2022. (掲載予定)
- 13) 藤田一郎, 渡辺健, 井口真生子, 長谷川誠:深層学習を用いた STIV 解析の高性能化, 土木学会論文集 B1(水工学), 第 76 巻, No. 2, I_991-I_996, 2020.

著 者

藤田 一郎	所員, 学術博士, 河川工学
大森 嘉郎	中電技術コンサルタント株式会社, 修士 (工学)
渡辺 健	株式会社ハイドロ総合研究所, 修士 (理学)