

鉛直流速分布から算定した平均流速値の対比（実測値による検証）

(株)シーテック 正会員 ○伊藤 真行
(株)シーテック 正会員 前田 浩伸
(株)シーテック 正会員 土山 茂希

1. はじめに

水力発電所では、河川からの取水において法により許可された取水量の遵守が求められている。水力発電所の導水路の水深および流速は、取水流量に応じて大きく変動する。このため、著者らは、超音波ドップラー流速計を水路床に設置して水力発電所導水路で鉛直方向の流速分布を計測している¹⁾。

計測した鉛直方向流速分布から鉛直方向平均流速を三種類の手法で算定し算定値を対比した。

2. 鉛直方向平均流速の評価方法

使用した超音波ドップラー流速計（Sontek 社 Argonaut-SW）は、鉛直方向に同時多点の流速計測が可能であり、流れの非定常性を観測することが可能である。しかし、超音波ドップラー方式を用いた流速計には、その原理上、計測不能領域が存在する。これを補うため、べき乗則を適用し計測不能領域の流速補完を行っている。その精度を検証するためにGaussの平均値法および3点法を用いて実測値から鉛直方向平均流速を求め結果の対比を行った。

①べき乗則を用いる方法

超音波ドップラー流速計における測定不能領域（図1.2参照）を補間し、水路底部から水表面までの理論上正確な鉛直平均流速を算出²⁾する。

$$\frac{u}{u_0} = \left(\frac{y}{y_0}\right)^m \quad (1)$$

但し、 u ：壁面距離 y における流速

y ：壁面からの垂直距離

u_0 ：壁面からの距離 y_0 における既知流速

y_0 ：既知流速 u_0 における壁面境界からの距離

m ：指数

(1)式を基に、計測不能領域も含めた全区間に対する鉛直平均流速 V_{m1} を用いて水深 y における流速 u は(2)式となる。

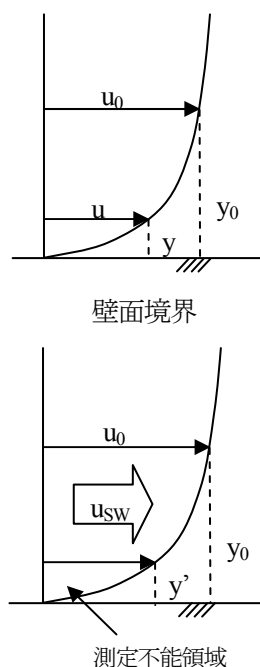


図1 べき乗則の例

$$u = (m + 1) \left(\frac{y}{y_0}\right)^m V_{m1} \quad (2)$$

一方、計測不能領域の底面からの高さを y' 超音波ドップラー流速計の区間平均流速を u_{sw} として、

「計測不能領域の面積＝全体の面積－計測面積」から、

$$\int_0^{y'} u dy = y_0 V_{m1} - (y_0 - y') u_{sw} \quad (3) \quad \text{図2 計測例}$$

を得る。 $m=1/6$ とすると、 V_{m1} が(4)式により算定できる。

$$V_{m1} = \frac{1 - y'/y_0}{1 - (y'/y_0)^{7/6}} u_{sw} \quad (4)$$

②Gauss の平均値法を用いる方法（Gauss の平均値法）

春日屋は、Gauss の平均値法から誘導される平均流速算定法を提案している³⁾。Gauss の平均値法から得られる鉛直平均流速式として平均値3点法を(5)式に示す。

$$v_{m2} = \frac{1}{18} (5(v_{0.113} + v_{0.887}) + 8v_{0.5}) \quad (5)$$

ここに、 v_{m2} は垂直線に沿って水底から水面までの鉛直平均流速、 $v_{0.113}$ は水表面から水深 11.3%の点での流速、 $v_{0.5}$ は水表面から水深 50%の点での流速、 $v_{0.887}$ は水表面から水深 88.7%の点での流速を示す。

③3点法⁴⁾（計測値の重みつき平均による方法）

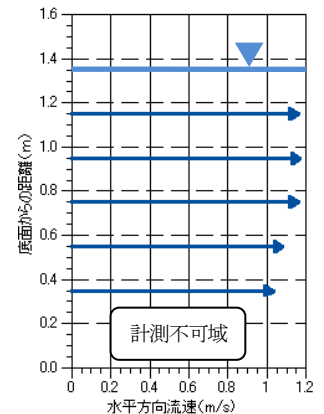
鉛直方向の平均流速を算定するために従来より用いられている算定方法であり、その鉛直平均流速算定式を下記に示す。

$$v_{m3} = \frac{1}{4} (v_{0.2} + 2v_{0.6} + v_{0.8}) \quad (6)$$

ここに、 v_{m3} は垂直線に沿って水底から水面までの鉛直平均流速、 $v_{0.2}$ は水表面から水深 20%の点での流速、 $v_{0.6}$ は水深 60%の点での流速、 $v_{0.8}$ は水深 80%の点での流速を示す。

3. 鉛直方向平均流速算出方法

超音波ドップラー流速計は、水路底面に設置して鉛直方向の多点同時測定を行い、1 測線で最大 10 測点の流速で



ータを取得できる。

ここで、超音波ドップラー流速計で実測した鉛直方向計測位置と Gauss の平均値法や 3 点法で必要となる水深が異なるため、Gauss の平均値法および 3 点法を適用するにあたり、下記の処置を行った。

・流速データが欠測する底面付近は、1/6 べき乗則で補完する。

・中間水深では、超音波ドップラー流速計で実測した流速値を線形補間し Gauss の平均値法および 3 点法に必要な値を算定する。

表 1 に実測した水路の規模を示す。

表 1 実測水路規模

	最大	最小	平均
水路幅(m)	6.00	0.80	2.29
フルード数	0.95	0.02	0.49
レイノルズ数	5.70.E+06	3.45.E+04	9.50.E+05
地点数 (データ数)	73 箇所(614 データ)		

4. 鉛直方向平均流速対比結果

①べき乗則と平均値法との対比

横軸にべき乗則((4)式。指数=1/6)により求められる平均流速(V_{m1})、縦軸に Gauss 平均値法((5)式)により求められる平均流速(V_{m2})とした散布図(図 3)により、両者を対比した。

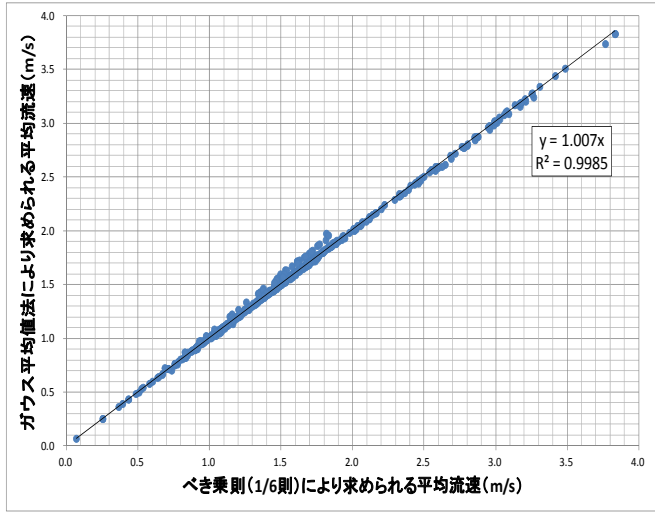


図 3 平均流速比較結果 (V_{m1} - V_{m2})

図 3 より、流速の実測結果からべき乗則により算出される平均流速と Gauss の平均値法により算出される平均流速は強い線形関係を示すことに加えて、線形近似で得られる傾きがほぼ 1.0 であることから、両者の間には良好な一致が見られることが確認できた。

②べき乗則と従来 3 点法との対比

横軸にべき乗則((4)式。指数=1/6)により求められる平均流速(V_{m1})、縦軸に従来 3 点法((6)式)により求められる平均流速(V_{m3}) 散布図(図 4) により両者を対比した。

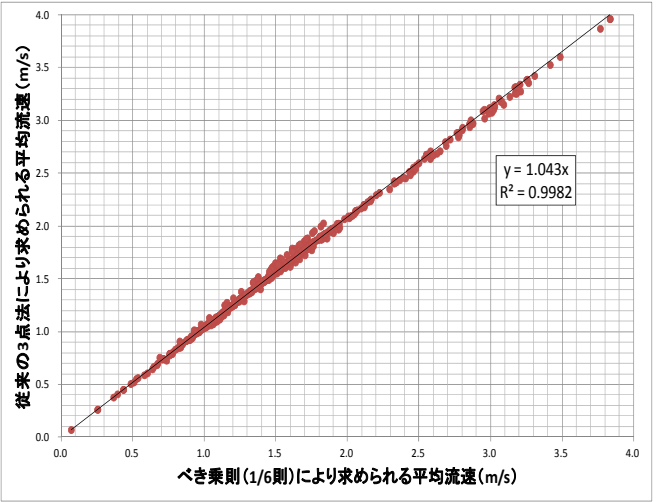


図 4 平均流速比較結果 (V_{m1} - V_{m3})

図 4 より、実測結果からべき乗則により算出される平均流速と 3 点法により算出される平均流速は強い線形を示し、線形近似で得られる傾きがほぼ 1.04 であることから、3 点法から算出される平均流速はべき乗則よりも約 4%大きい。

鉛直流速曲線法³⁾(鉛直流速曲線を囲む面積を方眼紙上により求め水深 h で割った得た流速)と 3 点法を極端に乱れた流速分布を生じる自然河川において適用した例では誤差の絶対値の相加平均が⁵⁾4.3%と報告されていることを参照すれば、図 4 における差異4%は流れの乱れの影響と考えている。

5. まとめ

本検討より、下記に示す知見を得た。

- ①測定不能領域を有する場合の平均流速算定式でべき乗則を用いて導出した平均流速と Gauss の平均値法から得られる鉛直平均流速は非常に良く一致した。
- ②Gauss の平均値法による鉛直平均流速は自然河川における適用性が良いとされている。一方、べき乗則による鉛直平均流速は等流水路で理論化されたものである。両者の一致が見られたことより、両者は等流水路および自然河川への適用性も良いと考えられる。
- ③3 点法により算定した平均流速はべき乗則による算定値より、4%程度大きい流速となった。

参考文献

- 1) 伊藤, 前田, 土山:暗渠部における流量把握方法の試み, 土木学会中部支部研究発表会(2010.3), II -25, pp.165-166
- 2) Cheng-lung Chen, Unified Theory on Power Laws for Flow Resistance,1991
- 3) 春日屋:流量測定, コロナ社
- 4) (社)電力土木技術協会:発電水力流量調査の手引き p74
- 5) 春日屋:縦平均流速算定式の精度について, 土木学会論文集第 54 号(昭和 33.2)pp.26-34