

ワンド水表面の物質交換速度に関する研究

松江工業高等専門学校 生産・建設システム工学専攻 学生会員 ○日向雄人
松江工業高等専門学校 環境・建設工学科 正会員 荒尾慎司
長岡技術科学大学 環境システム工学課程 非会員 小池 勝

1. はじめに

我が国の河川は一般的に急流で短く、そのために安全度は低いといわれている。古くから、梅雨期や台風が来襲したときに河川はたびたび氾濫し、人命や財産等に甚大な被害を及ぼしてきた。そのため、我が国の河川改修事業は治水に重点を置いて行われてきた。その結果、コンクリートで覆われた河川が増加し、生物多様性が失われてきた。

近年は、地球環境についての関心が高まり、河川改修事業は、治水・利水に加えて環境にも配慮した事業へ移行されてきた。その中で、「多自然型川づくり」が重要視されてきており、河道内に瀬や淵、植生を意図的に配置し、より自然に近い状態で生物の生息空間を確保することが求められている。その手法の一つにワンドが挙げられる。しかし、ワンドの設計方法は未だ確立されておらず、実際の施工は試行錯誤的なものとなっている。その理由として、ワンド内の流れは複雑であるため、生物の生息空間として最適な形状を決定することができないということが挙げられる。そのため、ワンド周辺の生態系や、水理特性のさらなる解明が求められている。

2. 研究目的

河岸の植生や樹木などの落ち葉がワンド内に流れ込むと、水中に日陰ができる。そのような場所は生物にとって棲みやすい空間になっていると考えられる。また、動植物プランクトン、有機物、粘土粒子などの浮遊物質の挙動など、ワンド水表面付近で起こる物質交換現象を把握することは重要である。物質交換現象は、式(1)に示すように、物質交換速度 k (cm/s) というパラメータで表わされる。この k は河道の主流部の平均流速で除すことによって無次元化し、式(5)のように、無次元物質交換速度 k' として表す。

平成 21 年に著者が行った研究¹⁾では、実験条件によっては、物質交換速度とフルード数との間に負の相関があることがわかった。物質交換速度の算出式を、フ

ルード数を含んだ式(7)のように変形すると、フルード数が増加すると、 k' は減少するということになり、著者の実験結果の妥当性が理論的に裏付けられることになる²⁾。しかし、式(7)には、変数である C' が含まれているため、このままでは利用することができない。 C' は式(2)で表わされ、実験により求めなければならない。そこで、本研究では、ワンド水表面における浮遊粒子の挙動を調べ、 C' を定式化することを目的とする。

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\frac{k}{W}(t-t_0) \quad \text{..... (1)}$$

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = C' \quad \text{..... (2)}$$

$$t-t_0 = t' \quad \text{..... (3)}$$

$$k = -\frac{C'}{t'}W \quad \text{..... (4)}$$

$$k' = \frac{k}{U_0} \quad \text{..... (5)}$$

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gh_0}} \quad \text{..... (6)}$$

$$k' = -\frac{C'}{t'}W \times \frac{1}{Fr\sqrt{gh_0}} \quad \text{..... (7)}$$

上記の式中に用いたパラメータは以下の通りである。

C_0 : 時刻 t_0 におけるワンド内の粒子数

C : 時刻 t におけるワンド内の粒子数

t_0 : 粒子投入時の時刻 (s)

t : 粒子流出後の時刻 (s)

h_0 : 主流部の平均水深 (cm)

W : ワンドの奥行き (幅) (cm)

L : ワンド開口部長さ (cm)

U_0 : 主流部の平均流速 (cm/s)

Fr : フルード数

g : 重力加速度 (cm/s)

k : 物質交換速度 (cm/s)

k' : 無次元物質交換速度 (cm/s)

3. 実験方法

水理環境実験室に設置されている循環型可変勾配水路の一部に発砲スチロールを用いて人工ワンドを作成する。図 1 に実験水路の平面図を、図 2 にワンドの平面図を示す。まず、水路に水を流し、ワンド内に平均直径約 2mm の発砲スチロール粒子を投入し、その様子をデジタルカメラにより撮影する。次に、投入から一定時間(60 秒)経過後のワンド内の粒子の様子を撮影する。

実験は、アスペクト比(L/W)を 1, 2, 4 の 3 種類設定し、各アスペクト比について Fr を 0.2, 0.5, 0.8 とした。実験は、Fr が所定の値になるように水深、水路勾配、流量を変化させながら行った。表 1 に実験条件を示す。なお、水深 h_0 は 3cm~7.5cm の間で 10 種変化させており、同一の実験条件で実験を 5 回繰り返し行った。

C' の算出には粒子の個数を数える必要がある。しかし、投入する粒子が小さく、また、数が非常に多いので、目視で数えるのは非常に困難である。そこで、本研究ではデジタルカメラにより撮影された画像をビットマップイメージに変換し、さらに二値化することにより粒子の個数を算出した。例として $L/W=2$, $Fr=0.5$, 平均水深 4.0cm とし、粒子を投入した直後の画像を図 3 に示す。図 4 は粒子投入後 60 秒経過したものである。また、図 5 及び図 6 は、それぞれ図 3 と図 4 を二値化処理したものである。

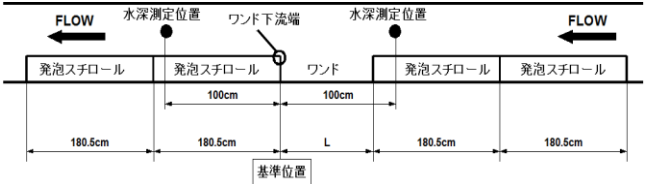


図 1 水路平面図

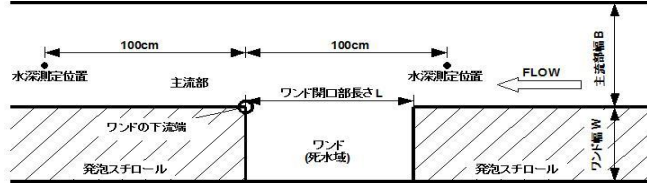


図 2 ワンド平面図

水深設定条件(cm)									
No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9	No.10
3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
主流部幅 B(cm)	ワンド幅 W(cm)	ワンド開口部長さ L(cm)	比率			平均水深 h_0 (cm)	フルード数 Fr		
			B/W	B/L	L/W				
18.75	11.25	11.25	1.666	1.666	1	3.0~7.5	0.20		
		22.50		0.833	2		0.50		
							0.80		
							0.20		
							0.50		
							0.80		
							0.20		
							0.50		
							0.80		
		45.00		0.416	4		0.50		
			0.80						

表 1 実験条件

4. 実験結果及び考察

アスペクト比を 1 とした場合の Fr と C' に関する実験結果を図 7 に示す。 Fr を 0.2 と 0.8 とした場合の C' はほぼ同じ値となった。 Fr を 0.5 とした場合、 Fr を 0.2, 0.8 にした場合よりも、 C' はやや小さな値となった。これは、アスペクト比を 1 とした場合に Fr を 0.5 にすると、物質交換が最も頻繁に行われることを表している。これに関してはワンド内に発生する大規模渦の回転速度が関係していると考えられる。粒子がワンドから主流部へ流出するためには、大規模渦から抜け出す必要がある。大規模渦の回転速度は Fr の増加に伴い速くなる。そのため、 Fr を 0.8 とした場合は、

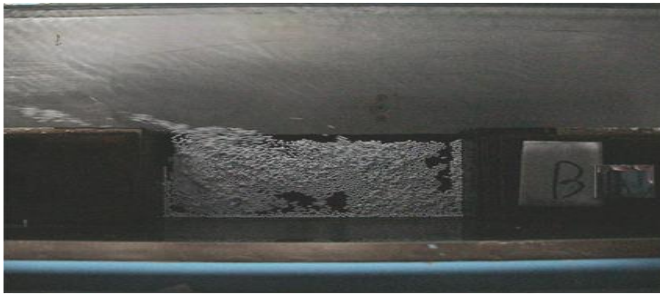


図 3 粒子投入直後の様子



図 4 投入から 60 秒経過した様子

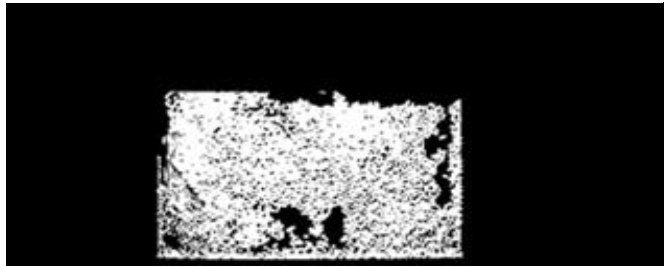


図 5 図 3 を二値化処理したもの

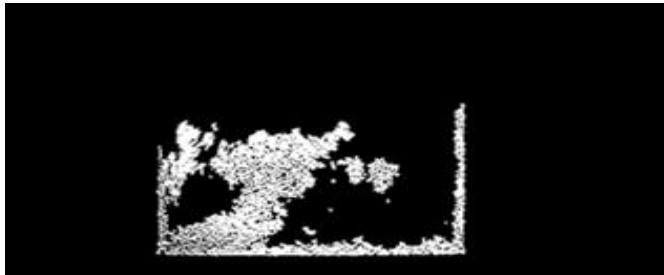


図 6 図 4 を二値化処理したもの

Fr を 0.5 とした場合よりも大規模渦の回転速度が速くなり、粒子が渦から抜け出しにくくなったため、このような結果になったと推察される。Fr を 0.2 にすると、大規模渦の回転速度は、Fr を 0.5 とした場合に比べて遅い。しかし、それでも C' が大きくなっているのは、ワンド内の大規模渦の回転速度が遅いために、渦が主流部へはみ出すことができなかったため、物質交換が少なくなったと推察される。これらの現象をより把握するには、大規模渦の回転速度を算出する必要がある。

アスペクト比を 2 とした場合の実験結果を図 8 に示す。Fr が 0.20 と 0.5 では、 C' はほぼ同じ値になった。Fr を 0.8 にすると C' は少し減少し、粒子が流出しやすくなったことがわかる。

アスペクト比を 4 とした場合の実験結果を図 9 に示す。アスペクト比を 4 にすると、 C' はアスペクト比を 2 としたときと同様の傾向を示している。しかし、アスペクト比を 4 とした C' の方がアスペクト比を 2 としたときよりも大きな値を示し、粒子があまり流出しないことがわかった。アスペクト比を 4 とした場合は開口部長さを 45cm としており、主流部の流れ方向にワンドが長くなっている。その結果、ワンド内の流れが主流部と比較して穏やかになり、粒子がワンド内に留まるが多くなる。そのため、アスペクト比を 4 とした場合がワンドから最も粒子が流出しにくくなるという結果になったと推察される。Fr と C' に関する実験結果をまとめたものを図 10 に、Fr と k' に関する実験結果をまとめたものを図 11 に示す。

本研究の目的は C' の定式化にあるが、図 10 に示す通り、 C' はアスペクト比ごとに異なる結果を示した。ここでは、アスペクト比 1 の結果と、アスペクト比 2・4 の結果とに分けて定式化することとした。式(8)と式(9)は得られた計算式である。

主流部の平均水深 h_0 について整理した k' (実測値) と、式(8)、式(9)を用いて C' の計算値を算出し、その結果を式(7)に代入して求めた k' (計算値) を図 12 ~17 に示す。図 12 と図 13 はアスペクト比 1 の結果、図 14 と図 15 はアスペクト比 2 の結果、図 16 と図 17 はアスペクト比 4 の結果を示している。図 16 に示す通り、アスペクト比を 4 としたときのいくつかのケースで計算値と実測値との間にかなり差があるものの、その他のケースでは、計算値は実測値をほぼ表現できている。

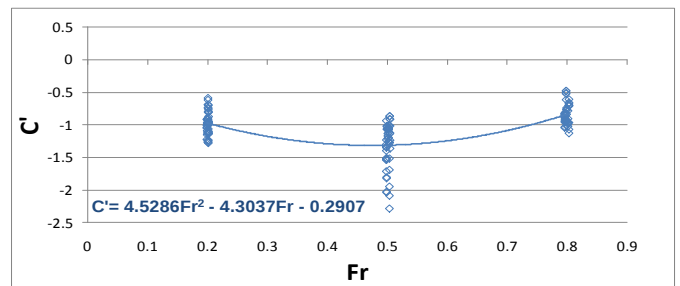


図 7 Fr と C' に関する実験結果 アスペクト比 1

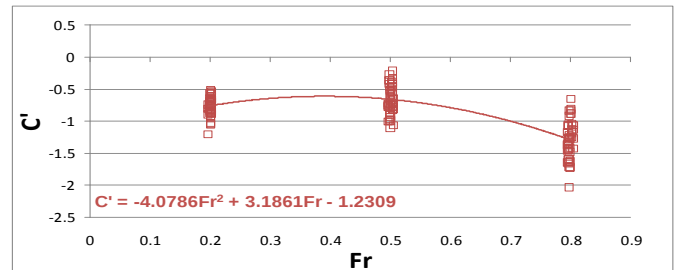


図 8 Fr と C' に関する実験結果 アスペクト比 2

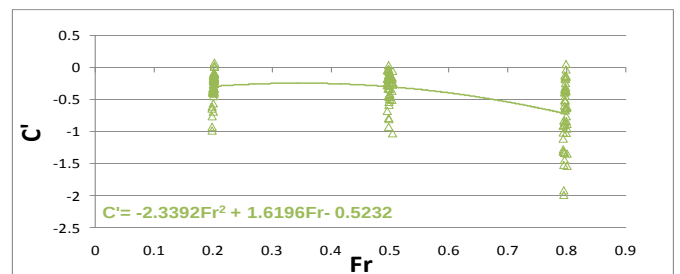


図 9 Fr と C' に関する実験結果 アスペクト比 4

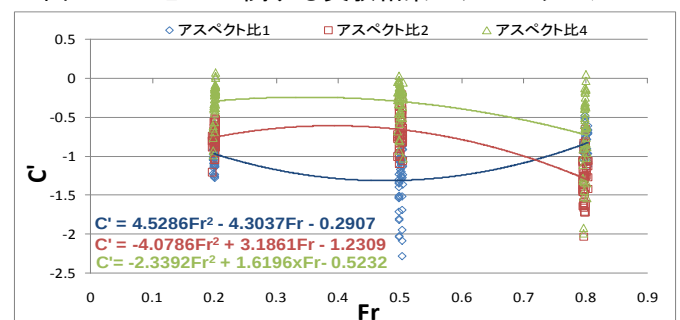


図 10 Fr と C' に関する実験結果 まとめ

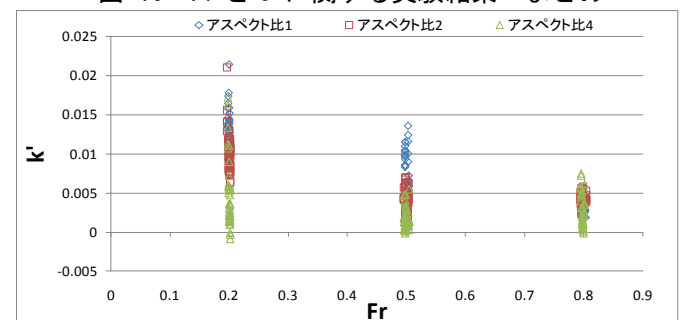


図 11 Fr と k' に関する実験結果 まとめ

$$C' = (-8.60719L/W + 13.13575)Fr^2 + (7.48973L/W - 11.79340)Fr + (-0.94019L/W + 0.64952) \quad (1 \leq L/W < 2) \quad \text{..... (8)}$$

$$C' = (0.86970L/W - 5.81804)Fr^2 + (-0.78321L/W + 4.75249)Fr + (0.35386L/W - 1.93858) \quad (2 \leq L/W \leq 4) \quad \text{..... (9)}$$

Fr が 0 となる場合は流体が存在しないか、完全に静止した状態である。そのため、Fr が 0 となる場合は物質交換が行われないことになる。しかし、計算値では k' が 0 にはならない。式(8)と式(9)は Fr が 0.2~0.8 の範囲のみに適用され、Fr が 0.2 よりも小さいところでは、別途計算式を構築する必要がある。

5. まとめと今後の課題

本研究では、ワンドの奥行きを固定して、開口部の長さを 3 種変化させることにより、様々な水理条件のもとで C' の値を実験的に求めた。その結果、 C' はアスペクト比やフルード数により変化し、アスペクト比が大きくなるほどワンドから流出する粒子数が少なくなり、物質交換が行われにくいことがわかった。

本研究で得られた実験結果をもとに C' を定式化した。が、本式の適用範囲が $Fr=0.2\sim0.8$ に限られるといった課題も残された。今後は、本実験以外のフルード数やワンドの奥行き長さも考慮した実験を追加し、より適用範囲の広い算定式を検討する予定である。

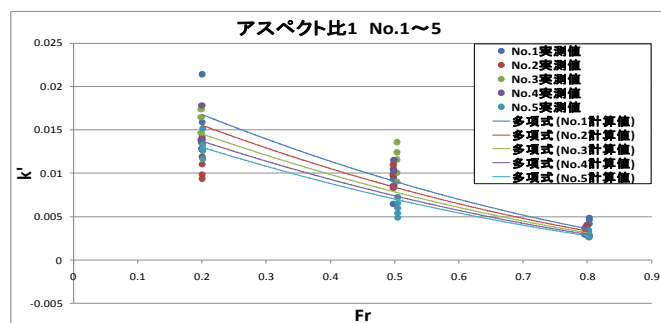


図 12 Fr と k' に関する実測値と計算値の比較
アスペクト比 1 No. 1~5

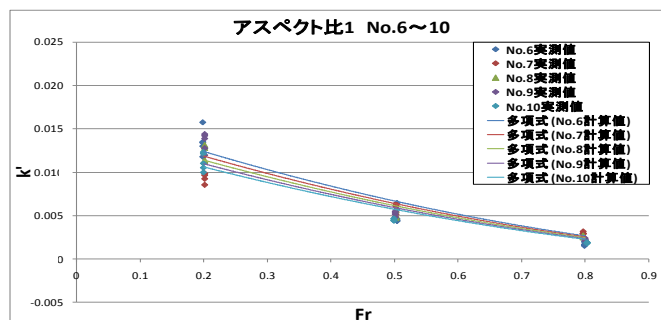


図 13 Fr と k' に関する実測値と計算値の比較
アスペクト比 1 No. 6~10

参考文献

- 1) 日向雄人, 画像解析を用いたワンドの水理特性に関する研究, 松江工業高等専門学校環境・建設工学科 平成 21 年度卒業研究, 2009.
- 2) 小池 勝, ワンド水表面における物質交換速度の定式化に関する検討, 松江工業高等専門学校環境・建設工学科 平成 22 年度卒業研究, 2010.

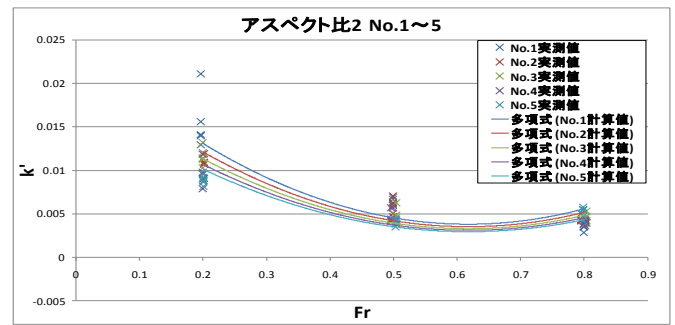


図 14 Fr と k' に関する実測値と計算値の比較
アスペクト比 2 No. 1~5

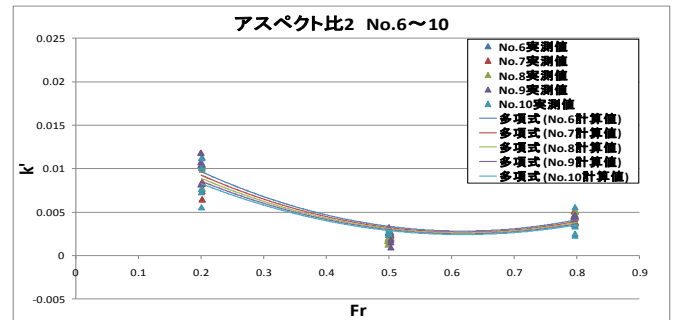


図 15 Fr と k' に関する実測値と計算値の比較
アスペクト比 2 No. 6~10

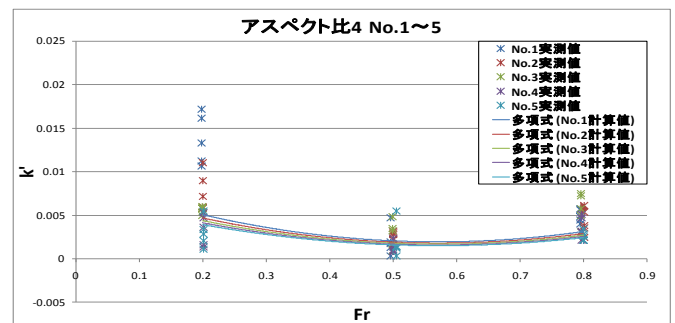


図 16 Fr と k' に関する実測値と計算値の比較
アスペクト比 4 No. 1~5

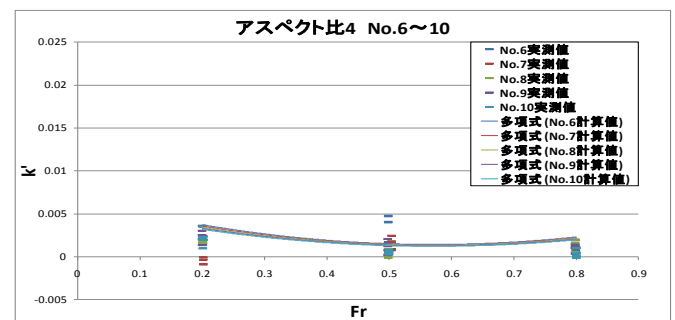


図 17 Fr と k' に関する実測値と計算値の比較
アスペクト比 4 No. 6~10