

開水路流れ死水域周辺の水面振動・流体混合特性 Characteristics of Fluid Oscillation around a Dead Zone in Open Channel Flows

木村 一郎*・細田 尚**・安永 良***・村本 嘉雄****

by Ichiro KIMURA, Takashi HOSODA, Ryo YASUNAGA and Yoshio MURAMOTO

In the nature-oriented river works, it is important to clarify the characteristics of the flow behavior around the dead zone attached to the main channel. The fluid oscillation and mass exchange in a rectangular dead zone are investigated experimentally and numerically. Large scale vortex due to the shear instability occurs along the interface between the main flow and the dead zone. The amplification processes of the vortices are influenced by the periodic free surface oscillation (seiche) in the dead zone. Froude number dependency in the resonance between the vortex and the free surface oscillation is clarified by the laboratory and numerical tests. These results are elucidated using the simple model which takes into account the motion of the vortices at the interface. The relation between the mass exchange and the free surface oscillation is also examined experimentally and numerically.

Keywords : open channel flow, shear instability, mass exchange

1. はじめに

河川側岸に存在するワンド等の死水域は、河道内の多様な生態系を維持する上で重要な役割を果たしており、人工的に死水域を設ける試みも行われている。死水域周辺の流れは死水域・主流界面の大規模渦の発生とそれに伴う流体振動に特徴づけられ、従来から実験的、数値解析的に研究が行われている^{1~4)}。この流体振動は、河川の抵抗則や河床変動等に影響を及ぼすと考えられるため、その特性を十分解明する必要があると考えられる。また、死水域内は流速が小さく、汚濁物質の停留に伴う水質悪化が懸念されるため、流体振動に伴う主流・死水域間の物質交換現象についての検討も重要と思われる。

本研究は、側岸に長方形の死水域が存在する開水路流れの非定常振動特性を実験的、数値解析的に検討するものである。特に、大規模渦と水面振動の共鳴現象に着目し、この共鳴現象とフルード数の関係について詳細に検討する。まず、実験と数値解析により水面振動のフルー

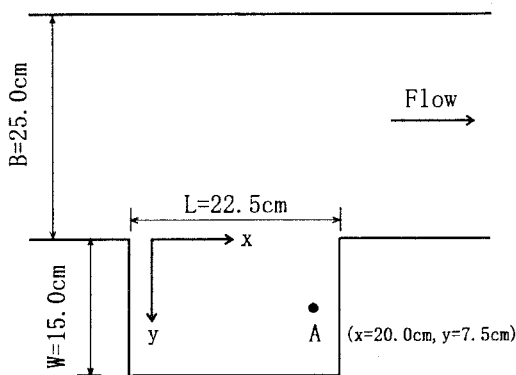


図-1 対象とした死水域と座標系

- | | | | |
|-----------|----|---------------|-------------------------------------|
| * 正会員 | 工修 | 和歌山工業高等専門学校助手 | 環境都市工学科
(〒644 和歌山県御坊市名田町野島 77) |
| ** 正会員 | 工博 | 京都大学助教授 | 工学研究科土木工学専攻
(〒606-01 京都市左京区吉田本町) |
| *** 正会員 | 工修 | 東京電力(株) | (〒101 東京都千代田区内幸町1-1-3) |
| **** フェロー | 工博 | 京都大学教授 | 工学研究科土木工学専攻 |

ド数依存特性について調べる。次に、界面上の渦の配置と進行を考慮した簡易モデルを提案し、実験結果、数値解析結果で示された渦と水面振動の共鳴現象について、解明を試みる。さらに、主流・死水域間の物質交換速度についても、実験的、数値解析的に検討を行うとともに、物質交換現象と水面振動の関係についても考察する。

2. 水理実験および数値解析の概要

2. 1 水理実験の概要

実験は長さ4m、幅25cm、水路床勾配1/300の亚克力製長方形断面水路を用いて行われた。水路側岸に図-1に示すような長方形の死水域を設けた。流量を一定とし、下流端水深を調節することによりフルード数を変化させて、水面振動と物質交換速度に関する実験を行った。水面振動に関する実験では、図-1の点Aにおける水面振動の時系列をサーボ式水位計（KENEK製）により計測した。実験条件は、表-1のRun h-1～Run h-11の11通りとした。一方、主流・死水域間の物質交換速度に関する実験では、一辺が3mmの正方形の紙片を死水域内に均等に散布し、上方からビデオ撮影を行った。死水域内の紙片の数の時間的変化から物質交換速度を求めた。実験の条件は表-1のRun k-1～Run k-10の10通りとした。

2. 2 数値解析の概要

数値解析は、静水圧分布を仮定した開水路平面2次元流れの基礎式を用いて行われた。渦動粘性係数の評価には、局所的な摩擦速度と水深の積に比例すると仮定した簡易的な0-方程式モデルを用いた。計算法としては有限体積法を用い、陽解法で時間方向に計算を進めた。運動方程式の移流項の離散化にはQUICKスキームを、時間積分には2次精度のアダムス・バシフフォース法を採用した。計算格子系としては、死水域・主流界面付近、および壁面近傍を細かくした可変格子系（最小格子幅0.22mm）とした。計算法の詳細については他の文献^{1,5)}に譲り、ここでは省略する。計算の条件は表-2に示す通り、フルード数を変化させたCal-1～Cal-14の14通りとした。

3. 水面振動とフルード数の関係

3. 1 水理実験結果

水理実験ではRun h-1～Run h-11の全ての条件において主流・死水域間に大規模渦の発振がみられた。フルード数が比較的大きい場合には、目視により死水域内に周期的な水面振動が観察され、その周期は死水域中央を節とする主流方向のセイシュの周期（ $=2L/(gh_0)^{1/2}$ 、L：死水域開口部長、 h_0 ：平均水深）、あるいはセイシュの2倍の周期と一致した。また、大規模渦の

表-1 水理実験の条件

Run	h_0 (cm)	Fr	
h-1	4.26	0.20	h_0 : 平均水深 単位幅流量 $q_0=54.1\text{cm}^2/\text{s}$ 水温: 16.5°C 水路床勾配 $\sin \theta=1/300$ $Re=4925$
h-2	3.47	0.27	
h-3	3.03	0.33	
h-4	2.64	0.40	
h-5	2.34	0.48	
h-6	2.02	0.60	
h-7	1.89	0.66	
h-8	1.81	0.71	
h-9	1.73	0.76	
h-10	1.69	0.79	
h-11	1.62	0.84	
k-1	4.43	0.18	単位幅流量 $q_0=52.4\text{cm}^2/\text{s}$ 水温: 16.5°C 水路床勾配 $\sin \theta=1/300$ $Re=4775$
k-2	3.45	0.26	
k-3	2.92	0.34	
k-4	2.46	0.43	
k-5	2.23	0.50	
k-6	2.02	0.59	
k-7	1.90	0.64	
k-8	1.76	0.72	
k-9	1.67	0.78	
k-10	1.58	0.84	

表-2 数値計算の条件

Run	h_s (cm)	Fr	
Cal-1	3.77	0.10	h_s : 下流端水深 単位幅流量 $q_0=23.0\text{cm}^2/\text{s}$ 動粘性係数 $\nu=9.17 \times 10^{-3}\text{cm}^2/\text{s}$ 水路床勾配 $\sin \theta=1/500$ $Re=2510$
Cal-2	2.38	0.20	
Cal-3	2.11	0.24	
Cal-4	1.90	0.28	
Cal-5	1.67	0.34	
Cal-6	1.58	0.37	
Cal-7	1.50	0.40	
Cal-8	1.45	0.42	
Cal-9	1.38	0.45	
Cal-10	1.29	0.50	
Cal-11	1.21	0.55	
Cal-12	1.14	0.60	
Cal-13	1.00	0.73	
Cal-14	0.94	0.80	

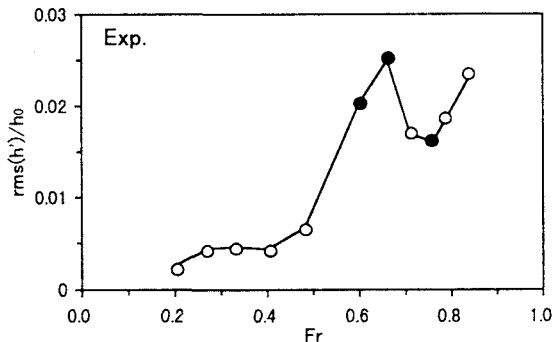


図-2 水面振動とフルード数の関係 (Exp.)

発生周期は水面振動の周期と一致した。フルード数が小さくなるに従って水面振動は減衰し、大規模渦の発生は、周期性が失われることがわかった。

図-2 は、サーボ式水位計により計測された水面振動の r. m. s. を各条件の時間平均水深で無次元化し、フルード数に対してプロットしたものである。○印はセイシュの周期で水面が振動している場合、●はセイシュの2倍の周期で振動している場合をそれぞれ示している。セイシュ、およびセイシュの2倍周期の水面振動の時系列の一例を図-3、図-4に示した。セイシュの周期の振動(○印)に関しては、フルード数が0.4付近で極小、0.3付近で極大を示している。セイシュの2倍周期の振動の発生原因は一列に並んで移動する渦列の不安定性⁶⁾に起因すると考えられるが、 $Fr=0.6\sim0.7$ 付近のみでの振動が発生する理由は不明である。

3. 2 数値解析結果

数値解析結果においても Cal-1~Cal-14 のすべての条件下で界面に大規模渦の発振が再現された。また、フルード数の比較的大きい条件では死水域中央付近を節とする主流方向のセイシュが再現された。セイシュの2倍周期の水面振動については明確には再現されなかった。しかし、Cal-13 では、図-5に示すようにセイシュの周期の振動とセイシュの2倍の周期の振動が重なったと思われる波形がみられた²⁾。

図-6 は、数値解析結果における点 A (図-1 参照) の水面振動の r. m. s. を、各条件の平均水深で無次元化した値とフルード数の関係を示したものである。振幅がフルード数が0.5付近で極小、0.4付近で極大となっている点は、極値の位置は若干異なるものの、実験結果(図-2)と適合する。しかし、実験結果の $Fr=0.6\sim0.8$ 付近の凹凸がここにはみられない。これは、前述のように数値解析ではセイシュの2倍周期の振動が明確に再現されていないことによるとと思われる。この点を除けば、(すなわち、図-2の○印のみを考えれば) 実験結果と数値解析結果の水面振動のフルード数依存特性はほぼ一致すると考えられる。

3. 3 簡易モデルによる検討

実験結果、および数値解析結果に示される水面振動のフルード数依存特性を検討するため、

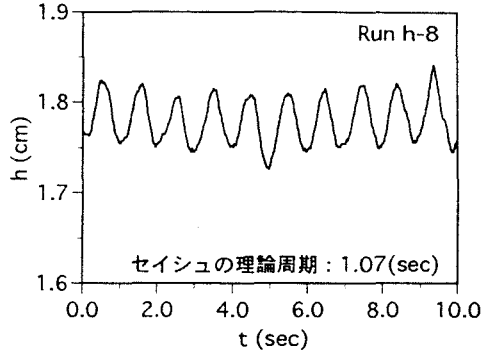


図-3 セイシュの周期の水面振動 (Exp.)

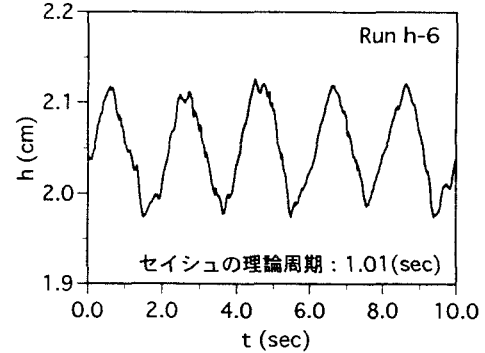


図-4 セイシュの2倍周期の水面振動 (Exp.)

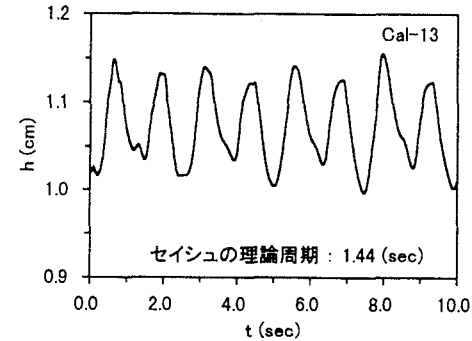


図-5 数値解析結果の水面振動 (Cal-13)

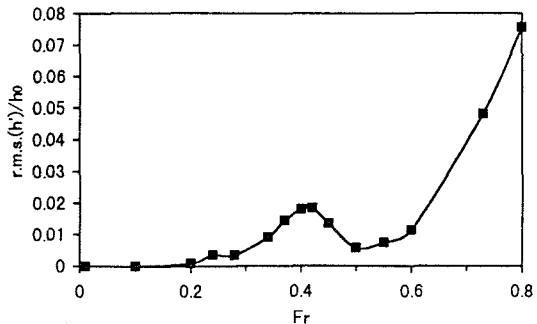


図-6 水面振動とフルード数の関係 (Cal.)

次のような簡易モデルを提案する。まず、次の3つの仮定をおく。

- 大規模渦の進行速度は主流流速の0.5倍とする。
(これは、時間に関する線形安定解析結果⁵⁾に対応する。)
- 大規模渦は主流方向に増幅しないとする。
- セイシュは節を1つ有する主流方向の振動のみを考え、大規模渦の発生周期はセイシュの周期に一致するものとする。

これらの仮定により、大規模渦の空間的な間隔 Λ は次式で表される。

$$\Lambda = \frac{U_0}{2} \cdot T = \frac{U_0}{2} \cdot \frac{2L}{\sqrt{gh_0}} = L \cdot Fr \quad (1)$$

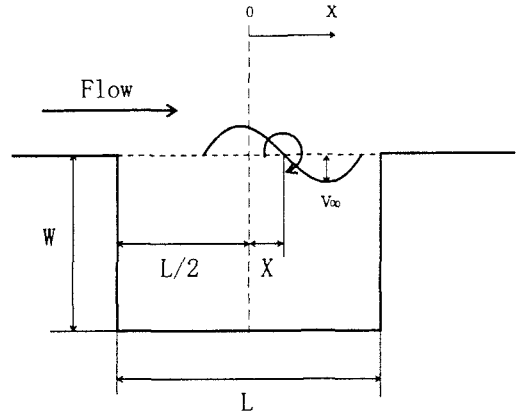


図-7 簡易モデルにおける座標系

図-7 は本簡易モデルで用いた座標系と記号を示したものである。ここに、 x : 主流方向の空間座標（死水域開口部中央を原点とする。）、 X : 渦の位置座標、 T : セイシュの周期、 L : 死水域の幅、 Fr : 主流のフルード数、 h_0 : 平均水深、 U_0 : 主流流速である。これらの仮定より、界面上に存在する渦の平均個数 n は、 $n=L/\Lambda=Fr^{-1}$ となり、フルード数のみに依存する。

次に渦とともに移動する界面上の横断方向流速分布を次のように正弦曲線分布で近似する。

$$v(x) = \alpha U_0 \sin \frac{2\pi(x-X)}{\Lambda} = \alpha U_0 \sin \frac{2\pi(x-U_0/2 \cdot t)}{\Lambda} \quad (2)$$

ここに、 α は流速分布の振幅である。また、渦が界面中央($x=0$)にあるときを $t=0$ とした。死水域下流側半分の界面横断流量（瞬間流量） $q(t)$ を求めるため、式(2)を次のように積分する。

$$q(t) = h_0 \int_0^{L/2} v(x) dx = \frac{\alpha h_0 U_0 L}{\pi} Fr \Theta \cos \left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi \right) \quad (3)$$

ここに、

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\sin \theta}{1 - \cos \theta}, \quad \theta = \frac{\pi}{Fr}, \quad Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gh_0}}, \quad T = \frac{2L}{\sqrt{gh_0}}, \quad \Theta = \sqrt{\frac{1 - \cos \theta}{2}} \quad (4)$$

である。ここで、式(2)の振幅 α については、渦とセイシュの共鳴効果を考慮し、渦の振幅が横断流量 $q(t)$ に比例する項を導入し、次のように仮定した。

$$\alpha = A(1 + \beta Fr \Theta) \quad (5)$$

ここに、 A および β は定数である。次に、 $t'=0 \sim t'=t$ 間の全流入量 $Q(t)$ は、 $q(t)$ を次のように時間で積分することにより求まる。

$$Q(t) = \int_0^t q(t') dt' \quad (6)$$

死水域中央に節をもつセイシュの水面振動 $h(t)$

は、 $Q(t)$ を死水域半分の面積（ $=WL/2$ ）で割ることにより求まる。さらに、 $h(t)$ を平均水深 h_0 で割ることにより、無次元化された水面振動 $h'(t)$ が次のように求まる。

$$h'(t) = h(t)/h_0 = \frac{Q(t)}{WL/2} / h_0 = \frac{2AL}{\pi^2 W} Fr^2 (1 + \beta Fr \Theta) \Theta \sin \left(\frac{2\pi t}{T} + \varphi \right) \quad (7)$$

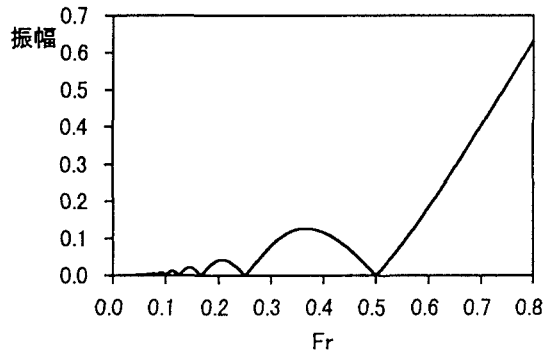


図-8 簡易モデルによる水面振動とフルード数の関係

図-8は、簡易モデル(式(7))で $\beta=0.1$ とした場合のフルード数と水面振動の振幅($=Fr^2\Theta(1+\beta Fr\Theta)\Theta$)の関係を示したものである。この結果は数値解析結果(図-6)と良好に一致する。しかし、実験結果(図-2)との比較では、 $Fr=0.6\sim 0.8$ 付近の凹凸がこのモデルでは表現できていない。これは、本モデルがセイシュの2倍周期の振動の発生を全く考慮していないためと思われる。この点を除けば本モデルは実験結果、数値解析結果の水面振動のフルード数依存特性をある程度表していると考えられる。

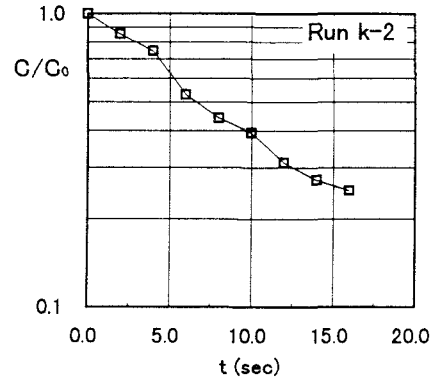


図-9 死水域内の紙片の数の時間的变化 (Exp.)

4. 物質交換速度とフルード数の関係

4. 1 水理実験結果

死水域・主流間の物質交換速度 k は、次の微分方程式を解くことにより求まる。

$$V \frac{dC}{dt} = -kCLh_0 \quad (8)$$

ここに、 V : 死水域内の流体の体積 ($=\pi Lh$)、 C : 時刻 t における死水域内の紙片の個数、 h_0 : 水深である。この方程式は以下のように解ける。

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\frac{k}{W}(t-t_0) \quad (9)$$

ここに、時刻 t_0 における死水域内の紙片の個数を C_0 とした。ビデオ撮影結果をもとに、横軸に t 、縦軸に $\ln(C/C_0)$ をとりグラフに表すと、いずれの条件のもとでもほぼ直線となった。一例として Run k-2 の場合 ($t_0=0$ とした。) を図-9 に示した。これらのグラフの傾きから交換速度 k を求め、さらに主流流速 U_0 で除した無次元交換速度 k' ($k'=k/U_0$) を Run k-1~Run k-10 について求めた。図-10 はこのようにして求められた k' とフルード数の関係を示したものである。この図と水面振動に関する実験結果(図-2)を比較すると、フルード数が比較的大きい場合 ($Fr \geq 0.3$ 程度) では、2つのグラフの形状は似通っており、交換速度と水面振動の間に強い相関があることが予測される。すなわち、この領域では大規模渦の発振とそれに伴う周期的な水面振動が交換現象を支配していると考えられる。一方、 $Fr \leq 0.3$ の範囲では、フルード数が小さくなるにつれて水面振動は減衰していくが、交換速度は逆に大きくなる傾向がみられる。これは、次のように解釈さ

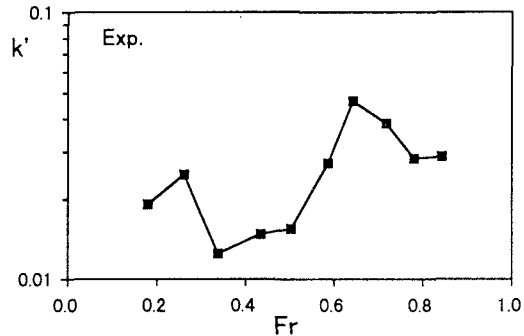


図-10 物質交換速度とフルード数の関係 (Exp.)

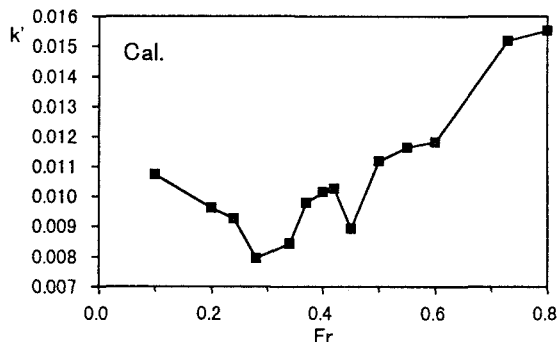


図-11 物質交換速度とフルード数の関係 (Cal.)

れる。すなわち、フルード数がある程度小さくなると、大規模渦の発振やセイシュのような流体振動は減衰し、定常現象に近づいていく。従って、この領域では流体振動が物質交換現象に与える影響は小さく、むしろ死水域内の定常的な循環流が交換速度を支配すると考えられる。よって、この領域においては、交換速度に及ぼすフルード数の影響は小さいと思われる。

4. 2 数値解析結果

数値解析の場合、主流・死水域間の無次元交換速度 k' ($=k/U_0$) を次式より求めた。

$$k' = \frac{1}{L} \cdot \int_{-} |v(x)| dx / U_0 \quad (10)$$

ここに、 $v(x)$ ：界面上の横断方向流速、 L ：死水域開口部長、 U_0 ：主流平均流速であり、積分記号 $\int_{-}$ は横断方向流速 $v(x)$ が負の領域についてのみ積分を行うことを意味する。式(9)により、表-2 の 1 4 通りの条件について k を求め、 k' とフルード数の関係をプロットしたのが図-11 である。図-10 の実験結果と比較して絶対値が異なるのは、流量等の条件が実験と計算で異なるためと思われる。フルード数が 0.3 程度より小さい領域で k の値が大きくなる点は実験結果 (図-10) と一致する。しかし、実験結果でみられる $Fr=0.6 \sim 0.8$ 付近の凹凸は計算結果にはみられない。これは水面振動特性の考察で述べた通り、数値計算ではセイシュの 2 倍周期の水面振動が明確には再現されていないことに起因すると考えられる。

5. 結 語

本研究は、側岸に長方形死水域を有する開水路流れを対象に、死水域内の水面振動特性、および主流・死水域間の物質交換特性について、実験的、数値解析的に考察を行ったものである。特に、界面の大規模渦と水面振動の共鳴現象について、簡易モデルを用いて詳細に検討した。得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 実験結果の水面振動には、死水域中央に節を一つ有する主流方向のセイシュの周期の振動と、セイシュの 2 倍の周期をもつ振動がみられた。
- 2) 計算結果では、セイシュの周期の水面振動が再現されたが、セイシュの 2 倍周期の振動については発生の兆候がみられたものの明確には再現されなかった。
- 3) 実験結果、および数値解析結果に示される水面振動のフルード数依存特性は、渦の配置と進行を考慮した簡易モデルにより、ある程度説明できることを示した。
- 4) 主流・死水域間の物質交換速度は、実験結果、数値解析結果ともに、フルード数が 0.3 以上の領域で水面振動との相関が認められたが、フルード数が 0.3 以下の領域では相関が認められなかった。これは、フルード数の比較的大きい場合には大規模渦の発振に伴う流体振動が交換現象を支配し、フルード数が小さい領域では定常的な循環流が交換現象を支配するためと考えられる。

今後、死水域の形状やスケール、レイノルズ数等を変化させて実験、計算を行っていきたい。

参 考 文 献

- 1) 木村一郎・細田尚：側岸に死水域を伴う開水路流れの非定常解析，日本流体力学会誌「ながれ」，vol. 12，pp. 399-408，1993.
- 2) 木村一郎・細田尚・友近文志：死水域を伴う開水路流れの非定常振動特性，水工学論文集，第 38 巻，pp. 425-430，1994.
- 3) 木村一郎・細田尚・村本嘉雄・安永良：開水路流れにおける死水域内の流体振動に及ぼす水理パラメータの効果，水工学論文集，第 39 巻，pp. 779-784，1995.
- 4) 中川研造・Jalil, M. A.・河原能久・菅和利：人工ワンド周辺部の流れに関する実験的研究，河道の水理と河川環境シンポジウム論文集，pp. 89-94，1993.
- 5) 木村一郎・細田尚・友近文志：開水路流れ混合層におけるせん断不安定波動の空間的増幅特性，土木学会論文集，No. 509/II-30，pp. 99-109，1995.
- 6) 日野幹雄：流体力学，朝倉書店，1992.