凹部アスペクト比の違いが透過性および不透過性の 側岸凹部流れに与える影響

Effects of Aspect Ratio of Side Cavity on Open-Channel Flow with Permeable and Impermeable Side Cavities

田中貴幸*・大本照憲**

Takayuki TANAKA and Terunori OHMOTO

*工博 豊田工業高等専門学校講師 環境システム工学科 (〒471-8525 愛知県豊田市栄生町2丁目)

** 工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2丁目)

The cavity zone along riverside is expected to produce native habitats of various ecosystems and water-friendly environment. However, effects of side cavities on flow resistance and turbulent flow structures are ambiguous. In this paper, Effects of aspect ratio of side cavity on open-channel flow with permeable and impermeable side cavities were examined experimentally. Velocity fluctuations were measured by using a particle-image-velocimetry (PIV). We revealed the flow resistance could be explained by the difference of mass exchange and momentum transport through the interaction between the side cavity and main flow region.

Key Words: cavity flow, turbulent flow structure, momentum transport, PIV

1. はじめに

河道内における植生やわんどは、多様な生物の生息環境や親水性の高い水辺環境を形成する上で重要な役割を担っている。しかしながら、植生やわんどの存在により河川の流れが複雑化し、流れの抵抗が変化するという治水面への影響が懸念される。その中で、実河川において植生は流下方向に連なって群落を形成している様子がみられるが、河川の多様性や生態系の連続性、植生群落内が死水域となることによる水質悪化の懸念など、諸問題を考慮すると主流部と流れの交換が促進されるような領域を設けることが望ましい。このような背景を受け、植生や側岸凹部を有する流れの抵抗特性や流動機構については様々な研究がなされている。

植生群落を有する流れの抵抗特性や流動機構に関する研究として、柔軟な植生の密度を変化させた Carollo ら¹⁾、Järvelä²⁾の研究や、植生群落の配置を変化させた富永ら³⁾、中矢・池田ら⁴⁾の研究などが挙げられる。その中で、関根ら⁵⁾は植生群落を低水路河岸に左右交互に配置することで、流下方向に不連続な植生配置における流動機構と河床変動に関して検討を行っている。著者ら⁶⁾は流下方向に不連続な植生群落を有する流れについて、形成された凹部のアスペクト比を変化させたときの流れの抵抗特性と流動機構について検討した。

また、側岸凹部を有する流れの流動機構に関する研究と

しては、単独の凹部流れにおいて凹部のアスペクト比を変化させたときの流動機構に関する禰津ら⁷⁾、藤田ら⁸⁾の研究が挙げられる。その中で、Uijtewaal ら⁹⁾は連続的なわんどを有する流れにおいて凹部アスペクト比が異なる条件における流動機構について検討している。著者ら¹⁰⁾は流下方向に連続的側岸凹部を有する流れにおいて、凹部アスペクト比の違いが流れの抵抗特性および流動機構に与える影響について検討した。さらに禰津ら¹¹⁾は、浸透流を導入した凹部周辺での流れの特性および物質交換特性に関する可視化実験を行っている。

このように、植生群落のように透過する凹部流れや周囲が固体壁で囲まれた不透過の凹部流れに関して、流れの抵抗特性や流動機構について様々な研究がなされている。しかしながらこれらは別々に論じられており、透過性と不透過性の違いが流れの抵抗特性や流動機構にどのような影響を与えるかについて検討している研究はあまり見られない。

そのため著者ら¹²⁾は、流下方向に連続的透過性及び不透過性の側岸凹部を有する流れについて、凹部のアスペクト比を変化させたときの抵抗特性について検討するとともに、流れの抵抗が同程度となった1つの凹部アスペクト比に関して平均流特性や凹部周辺の動圧力分布に関して検討した。しかしながら、凹部アスペクト比を変化させたときの連続的透過性および不透過性の側岸凹部流れにおける流動機構については検討がなされていない。

図-1 実験水路概要

図-2 凹部のアスペクト比と水深の関係¹²⁾

そこで本研究では流下方向に連続的に透過性および不透過性の側岸凹部を有する流れにおいて、凹部アスペクト比の違いが平均流特性や運動量輸送特性といった流動機構に与える影響について検討する。

2. 実験装置および実験方法

実験は全長 10m、幅 $B=40\text{cm}$ 、高さ 20cm のアクリル樹脂からなる循環式可変勾配水路を用いて行った。植生帯のモデルにはプラスチック板に水流に追従して撓む 6.10 ナイロンブリュスル（直径 0.242mm、曲げ剛性 $EI=1.45 \times 10^4 \text{g} \cdot \text{cm}^2$ ）を $H_v=5.5\text{cm}$ の高さに揃え、0.5cm 間隔で貼り付けたものを使用した。不透過性の側岸凹部流れに関しては、水路左岸側にステンレス板によって遮断物を設置して側岸凹部を形成した。植生帯および遮断物の幅は $B_v=10\text{cm}$ とし、植生帯および遮断物の流下方向長さは $L_v=30\text{cm}$ に設定した。図-1 のように凹部の流下方向長さを L_e 、凹部幅を B_e とし、流れの抵抗特性の計測の際にはこの凹部の流下方向長さと植生帯幅の比を $L_e/B_e=0 \sim 5.0$ と流量一定という条件の下で変化させた。本実験ではマクロ的視点において流れの平衡状態を形成するため、流下方向に植生帯および遮断物と凹部を交互に水路上流端より 100cm～940cm の位置まで設置している。このとき、凹部の流下方向長さを長くしていくと、水路全体における植生および遮断物の割合は減少していく。座標系は植生帯および遮断物上流先端における水路中央の底面を原点とし、流下方向に x 軸、横断方向に y 軸、鉛直方向に z 軸をとり右手系とする。また、それぞれの流速成分を u, v, w 、平均値を U, V, W 、変動成分を u', v', w' と表

表-1 実験条件（抵抗特性）

Cavity width B_e (cm)	10
Ratio of cavity length and cavity width L_e/B_e	0~5.0
Vegetation and blocker width B_v (cm)	10
Vegetation and blocker length L_v (cm)	30
Vegetation and blocker height H_v (cm)	5.5
Flow discharge Q (l/s)	5, 6
Bed slope I	1/500

表-2 実験条件（流動機構）

Case	Flow discharge Q (l/s)	Froude number Fr	Friction velocity U_* (cm/s)
permeable case	6	$L_e/B_e=1.3$	0.46
		$L_e/B_e=1.6$	0.47
		$L_e/B_e=2.2$	0.43
impermeable case	6	$L_e/B_e=1.0$	0.48 (0.64)*
		$L_e/B_e=1.8$	0.52 (0.69)*
		$L_e/B_e=2.5$	0.47 (0.63)*

*()内は $B=30\text{cm}$ として算出

す。

流れの抵抗特性に関する実験条件は表-1 のように設定した。いずれの条件においても非越流状態を対象としている。ここで、時間平均水深は横断方向に顕著な差がみられなかったため、水深の計測位置は水路中央とし、水深が流下方向にほとんど変化しない領域において、流下方向に平均した水深の値を採択した。図-2 に著者ら¹²⁾の研究により明らかとなった凹部のアスペクト比の変化に伴う水深変化を示す。水深は植生および遮断物高さにより無次元化している。これにより、凹部のアスペクト比を変化させると流れの抵抗特性が大きく変化することが認められた。このことから、凹部のアスペクト比が変化すると流れ構造や運動量輸送特性が変化し、その変化が流れの抵抗特性に大きな影響を及ぼしたと予想される。そこで、流量 $Q=6 \text{ l/s}$ の下、流れの抵抗が極大値を示したケース、透過性の凹部流れでは $L_e/B_e=1.3$ および 2.2、不透過性の凹部流れでは $L_e/B_e=1.0$ および 2.5 に関して、さらに、流れの抵抗が極小値を示したケース、透過性の凹部流れでは $L_e/B_e=1.6$ 、不透過性の凹部流れでは $L_e/B_e=1.8$ に関して流動機構の検討を行う。実験条件を表-2 に示す。ここで、フルード数は水路幅を $B=40\text{cm}$ として算出し、摩擦速度は $U_* = \sqrt{gHI}$ より算出している。

流動機構の検討においては、PIV 法による流速の多点同時計測を行った。PIV は光源に空冷式ダブルパルス YAG レーザー（出力 25mj）を用い、シート光の厚さ 1mm、パルス間隔 500 μs に設定し、水路右岸から左岸に向かってレーザーを照射し、水路上方より画像を撮影した。流速のサンプリング周波数は 15Hz、トレーサーは粒径 30 μm 、比重 1.02 のナイロン粒子を使用した。

図-3 時間平均流速ベクトル分布および横断方向流速 V の等値線

PIV の計測対象領域は水平面 $x=300\text{cm}\sim x=400\text{cm}$ の範囲内であり、計測領域の凹部上流端を $x'=0$ と設定した。鉛直位置は藤田ら⁸⁾、富永ら¹³⁾の研究結果より、本実験条件のように凹部の奥行きが比較的大きい状態では流れが二次元的となること、および著者らの実験によっても同様な結果を得たため、本論では半水深にて計測した結果を用いた。1 計測面での画像データは 2,000 枚 (1,000 組のサンプル)、計測時間は 66.7s であった。

本論では凹部の流下方向長さを凹部長さと呼び、さらに流下方向において、横断方向に植生帯および遮断物を有する領域を植生域 (vegetation area) または遮断物域 (blocker area)、植生帯および遮断物を有さない領域を凹部域 (cavity area) と呼ぶことにする。

3. 時間平均流速分布

各ケースにおける時間平均流速ベクトル分布および横断方向流速 V の等値線を図-3 に示す。まず、透過性の凹部流れについてみると、いずれのケースにおいても凹部内では流向は流下方向を示しており、凹部上流域では凹部に流入、凹部下流では凹部から流出する流れが形成されている。 $L_d/B_c=2.2$ においては凹部の流下方向長さが長いことから他のケースと比べ水交換が活発となる様子が伺える。また、水深が極大値をとった $L_d/B_c=1.3$ および $L_d/B_c=2.2$ では凹部開口部周辺において流れが強く蛇行する様子が伺えるが、水深が極小値をとった $L_d/B_c=1.6$ においてはその蛇行がその他のケースに比べ弱い様子が横断

図-4 移流による運動量輸送 UV の流下方向分布

方向流速の等値線からも読みとれる。このため、水深が極大値を示すケースにおいては水路全体の流れが大きく蛇行することで流れの抵抗を大きくすることが示唆される。

不透透性の凹部流れに注目する¹⁰⁾と、凹部開口部においては透過性の凹部流れと同様、いずれのケースにおいても凹部上流域で凹部に流入、凹部下流域では凹部から流出する流れが確認できる。透過性の凹部流れとは異なり、遮断物が流れを許容しないために $L_e/B_e=1.0$ では凹部中央を中心とした循環流が凹部形状と同等のスケールで明瞭に形成されている。 $L_e/B_e=1.8$ および 2.5 においては $L_e/B_e=1.0$ ほど顕著ではないが凹部下流側を中心とした循環流が見られ、その横断方向スケールは凹部幅程度、流下方向にはそれ以上のスケールで存在している。このように、透過性および不透透性では特に凹部内において流れが顕著に異なることが確認された。

4. 運動量輸送特性

水路内における側岸凹部の影響により、主流部と凹部および植生帯、遮断物境界において運動量・物質の交換が促進されることが予測される。ここで、横断方向の運動量輸送を次式で与える。

$$\overline{uv} = \overline{(U + u')(V + v')} = UV + \overline{u'v'} \quad (1)$$

UV は移流による運動量輸送を、 $\overline{u'v'}$ は流速変動による運動量輸送を示す。各ケースの主流部と凹部および植生帯、遮断物境界付近において、この2つの項および全運動量輸送について検討する。

図-5 流速変動による運動量輸送 $\overline{u'v'}$ の流下方向分布

4.1 移流による運動量輸送

透過性および不透透性の凹部流れにおいて、主流部と凹部および植生帯、遮断物との境界付近における移流による運動量輸送 UV を図-4に示す。

透過性の凹部流れにおいて、凹部域に注目すると、凹部上流側ではいずれのケースにおいても運動量は主流部から凹部内に運ばれており、凹部下流側では凹部内から主流部に運動量が輸送されている様子が伺える。図-3の横断方向流速成分 V の空間分布より、 $L_e/B_e=1.3$ および1.6では凹部域の上流端および下流端近傍で凹部への流入および流出速度がピーク値を示すことから、それらのケースでは凹部上下流端にて運動量輸送量もピーク値を示すことが認められる。植生域については、 $L_e/B_e=1.3$ ではほとんどの領域で主流部から植生帯内に運動量が輸送されているが、凹部アスペクト比が大きくなるにつれ、植生帯中央付近に

て植生帯内から主流部へ運動量が運び出される傾向が強まる様子が見てとれる。このように、流れの抵抗特性が最も大きくなった $L_e/B_e=2.2$ では、運動量の交換が流下方向に規則的に行われていることが認められた。この規則的交換は凹部の流下方向長さが植生の流下方向長さに近い状態にて発生すると考えられるとともに、透過性であるため植生の流下方向長さより凹部の流下方向長さが短い状態で規則的交換が発生したものと推測される。

不透透性の凹部流れに関しても透過性の凹部流れと類似の挙動を示すものの、凹部域に比べ遮断物域において移流による運動量輸送量は大きな値を示した。これは、凹部内が滞留域のような状態となるため、凹部と主流部との水交換が透過性ほど活発とならないこと、また、凹部域に比べ遮断域では主流速が大きな値を示すことで移流による運動量交換量が大きくなることなどが要因として挙げら

れる。また、 $L_e/B_e=1.0$ に比べ 2.5 では流下方向において運動量の交換が短い間隔で行われており、運動量の受け渡しが生発となることが明らかとなった。

4.2 流速変動による運動量輸送

図-5 に主流部と凹部および植生帯、遮断物との境界付近における流速変動による運動量輸送 $\overline{u'v'}$ の流下方向分布を示す。

透過性の凹部流れにおいては、いずれのケースにおいても凹部域、植生域ともに流速変動による運動量輸送はほぼ正の値を示し、運動量は主流部から凹部および植生帯内に運び込まれている。凹部域に関してはいずれも凹部下流域に比べ凹部上流域の値が卓越している。これは凹部上流に比べ凹部下流では横断方向の主流速差が小さくなるためだと考えられる。植生域に関しては、凹部のアスペクト比が小さい $L_e/B_e=1.3$ において、その他のケースに比べ運動量輸送量が流下方向に大きな値をとる傾向が見られる。 $L_e/B_e=1.6$ および 2.2 では植生域において運動量輸送量が $x'/L_e=1.03$ 程度の位置で極値をとり、そこから植生域上流側および下流側に向かうにつれて値が減少していく。このような傾向から、凹部のアスペクト比が大きい状態に比べ、狭い状態において流速変動による運動量輸送は活発に行われていることが示唆される。

不透過性の凹部流れに注目すると、透過性の凹部流れとは異なり流速変動による運動量輸送量が正と負の値を規則的に交互にとる様子が伺える。しかしながらその極値は透過性に比べ比較的大きな値を示している。これは透過性に比べ不透過性の凹部流れでは遮断物が流れを許容しないことから横断方向の流速差が顕著となるためだと推察される。凹部域については植生域とは異なり、凹部下流端周辺にて運動量輸送量が極大値をとる。これについても不透過性の凹部流れにおいては透過性に比べ凹部内外における流速差が大きくなることが要因として考えられるとともに、遮断物の影響で乱れが強く発生するためだと推測される。また、透過性の凹部流れ同様、凹部のアスペクト比が大きくなると運動量輸送量が小さな値を示すことが認められる。このように、各ケースにおいて流速変動による運動量輸送分布が異なる形態をとる要因として、せん断不安定に起因する大規模渦の挙動の違いによる影響などが考えられるため、今後各ケースの大規模渦の挙動や流速変動の波形などに関して解析を進める必要がある。

ここで、いずれのケースにおいても流速変動による運動量輸送量の絶対値は、移流によるものと比べ小さな値を示していることが確認できる。これにより本実験条件において、流下方向に凹部を有する植生流れでは、流速変動による運動量輸送に比べ、移流による運動量輸送が卓越することが明らかになった。

4.3 全運動量輸送

図-6 に主流部と凹部および植生帯、遮断物との境界付近における全運動量輸送 $UV + \overline{u'v'}$ の流下方向分布を示す。

透過性および不透過性のいずれのケースにおいても、流速変動による運動量輸送に比べ移流による運動量輸送が支配的となることから、全運動量輸送は移流による運動量輸送と類似の分布を示す。その中で、不透過性の凹部流れにおいては透過性に比べ流速変動による運動量輸送の影響を受けている様子が見てとれる。

透過性の凹部流れについてみてみると、水深が最大値をとった $L_e/B_e=2.2$ では流下方向に規則的に運動量交換がなされており、運動量輸送量の極値はその他のケースに比べ大きくなることが見てとれる。不透過性においても運動量輸送量の極値は $L_e/B_e=2.5$ において大きな値を示している。これにより、凹部および植生帯と主流部との境界付近において全運動量輸送量が大きくなるようなケースにおいて、流れの抵抗が大きくなることが明らかになった。また、各運動量輸送特性について確認したところ、流下方向に植生帯および遮断物が連なった状態から水深が最大値をとったケースまで凹部のアスペクト比を大きくしていくと、流速変動による運動量輸送量は減少していき、移流による運動量輸送量は増大していくことが示唆された。その影響により全運動量輸送量の形態が変化し、流れの抵抗の大小関係に変化が生じると考えられる。

5. 質量および運動量交換率

主流部と側岸凹部および植生帯、遮断物との境界における質量交換率と運動量交換率について検討を行う。この境界における質量交換率 ϕ および運動量交換率 θ を木村ら¹⁴⁾および池田ら¹⁵⁾を参考に、次式で表す。

$$\phi = \frac{1}{2\rho U_m L} \int_0^L \rho |v| dx$$

$$= \frac{1}{\rho U_m L} \int_+ \rho v dx = \frac{1}{\rho U_m L} \int_- \rho v dx \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{\rho U_m^2 L} \int_0^L \rho u v dx \quad (3)$$

ここに、 $L=L_e+L_v$ 、 $\int_+$ 、 $\int_-$ は境界面上の横断方向流速が正または負の領域で積分することを示す。

図-7 に $y/B_e=0.90$ における質量交換率、図-8 に $y/B_e=0.90$ および 0.80 における運動量交換率と側岸凹部のアスペクト比の関係を示す。

質量交換率に関しては、透過性および不透過性の凹部流れのいずれも凹部のアスペクト比が大きくなるにつれ質量交換率も大きくなるという、禰津ら⁷⁾、池田ら¹⁵⁾および著者ら¹⁰⁾の研究結果と同様の傾向を示した。また、質量交換率は透過性に比べ不透過性において大きな値を示すものの、顕著な違いは見られなかった。

運動量交換率については、透過性の凹部流れは不透過性の凹部流れに比べ全体的に運動量交換率は大きな値を示しており、このために透過性の凹部流れでは不透過性の凹部流れに比べ流れの抵抗が大きくなると考えられる。

図-6 全運動量輸送 $UV + \overline{u'v'}$ の流下方向分布

図-7 質量交換率 ϕ

図-8 運動量交換率 θ

$y/B_c=0.90$ に注目すると、不透過性の凹部流れでは水深が極大値を示した $L_c/B_c=1.0$ および 2.5 では、水深が極小値を示した $L_c/B_c=1.8$ と比べ運動量交換率は大きな値を示している。このため、主流部と凹部および遮断物の境界における運動量交換率が大きくなると、流れの抵抗も大きくなることが認められた。しかしながら、透過性の凹部流れにおいては水深が極大値を示した $L_c/B_c=2.5$ において、極小値を示した $L_c/B_c=1.6$ よりも運動量交換率は小さな値を示した。そこで、 $y/B_c=0.8$ における運動量交換率についても検討を試みる。検討する位置を変化させると、水深が極大値を示した $L_c/B_c=2.5$ の運動量交換率が $L_c/B_c=1.6$ に比べ大きくなることが認められた。これにより、流れの抵抗特性との大小関係を考える上では、運動量交換率をどの位置で評価するかを考慮する必要があることが示唆された。また、水深方向も含めた水路全体における運動量輸送特性についても今後検討する必要がある。

6. おわりに

本研究では流下方向に連続的に透過性および不透過性の側岸凹部を有する流れにおいて、凹部アスペクト比の違いが平均流特性や運動量輸送特性といった流動機構に与える影響について検討した。今後は水面変動特性や大規模渦の挙動などについて検討していく必要がある。得られた知見は次のとおりである。

- 1) 半水深における水平面の時間平均流速ベクトルに注目すると、透過性および不透過性のいずれのケースについても、主流部と凹部境界付近では凹部のアスペクト比の違いによらず、凹部上流付近で凹部内に流入、凹部下流付近で凹部から流出する流れが確認された。しかしながら、その流出量は凹部アスペクト比により変化することが認められた。
- 2) 運動量輸送特性に注目すると、凹部のアスペクト比が大きくなるにつれ流速変動による運動量輸送量は減少していき、移流による運動量輸送量は増大していく傾向が認められた。また、いずれのケースにおいても流速変動に比べ、移流による運動量輸送が支配的であることが明らかとなり、そのため全運動量輸送は移流による運動量輸送と類似の分布傾向となることが認められた。
- 3) 質量交換率について検討した結果、いずれのケースも凹部のアスペクト比が大きくなるにつれ質量交換率も増加することが認められた。また、運動量交換率では、透過性の凹部流れは不透過性に比べ全体的に大きな値を示し、これにより透過性の凹部流れでは不透過性の凹部流れに比べ流れの抵抗が大きくなることが明らかになった。さらに、不透過性の凹部流れにおいては境界付近において流れの抵抗と運動量交換率の大小関係がほぼ一致したものの、透過性においてはその境界の設定位置により大小関係が異なる結果となった。これにより、流れの抵抗特性との大小関係を考える上では、運動量交換率をどの位置で評価するかを考慮する必要がある。

るとともに、水深方向も含めた水路全体における運動量輸送特性についても検討する必要があることが示唆された。

参考文献

- 1) F. G. Carollo, V. Ferro and D. Termini : Flow Resistance Law in Channels with Flexible Submerged Vegetation, *Journal of Hydraulic Engineering* , Vol.131, No.7, pp.554-564, 2005.
- 2) Juha Järvelä : Effect of submerged flexible vegetation on flow structure and resistance, *Journal of Hydrology* 307, pp.233-241, 2005.
- 3) 富永晃宏, 長尾正志, 劉建, 鈴木徹也 : 洪水流の抵抗と流れ構造に及ぼす高水敷樹木群配置の影響, *水工学論文集*, 第 39 巻, pp.477-482, 1995.
- 4) 中矢哲郎, 池田駿介, 戸田祐嗣 : 側岸部植生密度の変化が開水路横断方向運動量輸送に及ぼす影響, *河川技術論文集*, 第 9 巻, pp.383-388, 2003.
- 5) 関根正人, 浦塚健史 : 側岸部に交互に繁茂する植生群落によって生成される流れと河床形状について, *水工学論文集*, 第 44 巻, pp.813-818, 2000.
- 6) 田中貴幸, 大本照憲, 田中寿幸 : 流下方向に不連続的植生群落を有する開水路流れの抵抗特性と運動量輸送, *水工学論文集*, 第 52 巻, pp.763-768, 2008.
- 7) 禰津家久, 鬼束幸樹, 池谷和哉, 高橋俊介 : わんど形状が河川に及ぼす影響に関する水理学的研究, *応用力学論文集*, Vol.3, pp.813-820, 2000.
- 8) 門谷健, 藤田一郎, 椿涼太 : 開水路側岸凹部のアスペクト比の違いが三次元流れ構造に及ぼす影響, *応用力学論文集*, Vol.11, pp.881-888, 2008.
- 9) Uijtewaal, W.S.J., D. Lehmann, A. van Mazijk : Exchange processes between a river and its groyne fields: Model experiments, *J.H.E. ASCE*, 127(11), pp.928-936, 2001.
- 10) 田中貴幸, 大本照憲 : 流下方向に連続的に側岸凹部を有する開水路流れの抵抗特性と流動機構, *水工学論文集*, 第 53 巻, pp.889-894, 2009.
- 11) 禰津家久, 矢野勝士, 光成洋二 : 浸透性を有するワンド流れ周辺の物質交換特性に関する可視化実験, *水工学論文集*, 第 48 巻, pp.541-546, 2004.
- 12) 田中貴幸, 大本照憲 : 透過性および不透過性の側岸凹部流れにおける抵抗特性と流動機構, *土木学会論文集 B1 (水工学)*, Vol. 68, No.4, pp.I_805-I_810, 2012.
- 13) 富永晃宏, 谷川幸男, 久田陽史 : 人工わんどの水交換機構とその制御法に関する研究, *水工学論文集*, 第 46 巻, pp.571-576, 2002.
- 14) 木村一郎, 細田尚, 安永良, 村本嘉雄 : 開水路流れ死水域周辺の水面変動・流体混合特性, *水工学論文集*, 第 41 巻, pp.711-716, 1997.
- 15) 池田駿介, 吉池智明, 杉本高 : 不透過水制群を有する流れの構造に関する実験的研究, *水工学論文集*, 第 43 巻, pp.281-286, 1999.

(2013 年 3 月 18 日 受付)