

平成25年度

砂州発生条件下における ワンド工による急流河川での護岸近傍高流速の 低減効果と河床地形への影響について

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム

○矢野 雅昭
渡邊 和好
矢部 浩規

本研究では、砂州発生条件下での急流河川におけるワンド工による河岸部の流速低減効果と河床地形への影響を明らかにするため、移動床水理模型実験による検討を行った。その結果、通水時には、砂州の流下により、砂州前縁線と頂部が交互にワンドに向いた状態となり、前縁線がワンド側に向いている状態では、その下流端に大きな深掘れが確認された。また、ワンドによる河岸部の流速低減効果を砂州の向きによる横断位置での平均値で検討したが、ワンド設置による流速低減効果は確認されなかった。一方、ワンド内においては、河岸部よりも流速が遅く、実河川においては魚類にとって出水時の退避場になると考えられた。ワンド設置による砂州地形への影響として、ワンドがあるケースでは、その上流部において、下流部よりも砂州の半波長、波高が小さく、移動速度が速いことが確認された。

キーワード：ワンド、護岸、砂州

1. はじめに

急流河川では、出水時に河岸浸食など発生しやすく、護岸工がなされることが多い。しかし、護岸工の設置により河岸粗度が低下する場合、高流速が発生することが考えられる。また、湾曲部などで外岸の粗度が低下すると、2次流が増加し、深掘れが増大することが知られている¹⁾。護岸の力学設計法²⁾では、護岸を行う場合は、粗度の低下に配慮することとされているが、施工時期が古い護岸にはこのような配慮がなされず、流況に影響が及んでいる可能性がある。

また、単調な護岸工のなされた河道断面が、長い延長で施工された場合、生物の生息環境にも影響が及ぶことが考えられる。例えば、遊泳魚類は、出水時には高流速域から低流速域に避難することが知られているが³⁾、粗度の低い単調な断面の河川では、このような場所が少なく、出水時に下流へ流される可能性がある。しかし、高流速の発生や単調な断面などの、護岸工に伴う負の影響が考えられたとしても、現状で河岸浸食防止に寄与している護岸を張り替えるということは現実的ではない。そのため、より部分的な改修により、護岸工による負の影響を低減できれば、経済的にも優位である可能性がある。

河川の流況を局所的に変化させる方法として水制工があるが、水制工は土砂堆積により河道断面の縮小に繋がることがある⁴⁾。そのため、河道幅が十分な箇所以外で水制工を行うことは、近年の川幅を拡幅する方向性の河

道改修と異なる⁵⁾。一方、部分的に川幅を拡幅するワンド工は、剥離渦を発生させ⁶⁾、流れのエネルギーを減少させる効果があることが考えられる。また、環境面においても、魚類が一時的に出水時に避難する箇所として、有効である可能性がある。ところで、実河川の多くは、砂州などの中規模河床形態を伴っていると考えられ、より現地に対応した場合、砂州地形の影響を考慮する必要がある。しかし、ワンドに関する既往研究では、ワンド内の水理構造⁷⁾、土砂堆積⁸⁾に関するものなどが行われているが、砂州発生条件下での検討については行われていない。

本研究は、砂州発生条件下において、ワンドを設置した際の、流速低減効果と河床地形への影響を、移動床水理模型実験により検証したものである。

2. 方法

(1) 移動床水理模型実験

a) 実験水路

実験に用いた水路は、移動床部の延長が43.25m、河床勾配1/200の河川上流部の条件とし、地上部の河岸法勾配が1:2で、河岸高が5cmである河岸形状とし(図-1a~c)、河床には厚さ10cmで粒径0.77mmの珪砂を敷き均した。河岸形状は2パターンとし、図-1aに示す移動床部が十分な厚さを有し、砂州が十分発達できる断面Aと、図-1bに示す法面が河床内にも連続する断面Bとした。



図-3 河床変動量と流向流速の平面分布(ケース1,4全体)
 ※図上部の数字は水路下流端からの距離(m)

計測し、隣り合う砂州の先端位置の差から各砂州の半波長を算出した。また、各砂州の先端位置の移動距離より砂州の移動速度を把握した。波高については、先端位置から5cm下流の深掘れ部と5cm上流の頂部の標高差から算出した。なお、これらの計測は下流端から17.1m上流までの範囲で行った。また、これらの計測では、ケース2, 3で若干の欠測が生じた。

また、ワンドによる流速低減効果を検討するため、図-2に示す砂州の向きによる横断位置での流速の平均値を算出した。砂州の向きによる横断位置は、前縁線側および頂部側の河岸法尻から0, 5cmの地点(それぞれF1~2, C1~2)とした。そして、各ケース内で全体平均値、ワンド設置位置とその上・下流の砂州内での平均値を算出し、比較を行った。

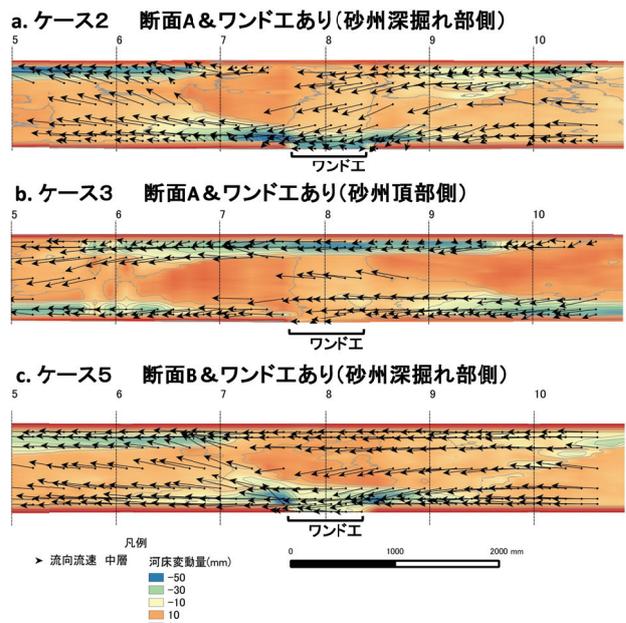


図-4 河床変動量と流向流速の平面分布
 (ケース2, 3, 5 ワンド周辺拡大)

3. 結果

(1) 河床変動量と流速ベクトル分布

通水終了後の初期河床からの河床変動量と、中層の流速ベクトルの平面分布について、図-3a~eに示す。これより、砂州の形成が確認され、頂部で土砂が堆積し、前縁線から河岸にかけて深掘れしていることが分かる。また、深掘れの深さは、例えばワンドのないケース1と4と比較すると、図-3a, dの赤丸の箇所に示すとおり、断面Aのケースの方が断面Bよりも深い。

通水時においては、砂州は発達しながら流下し、ワンド位置においても同様に通過していった。流下した砂州の前縁線がワンド側を向いているときは、図-3b, eのケース2, 5のような状態になり、頂部がワンド側を向いているときは、図-3cのケース3のような状態となっている。

ワンド周辺の初期河床からの河床変動量と、中層の流速ベクトルの平面分布を拡大したものを図-4a~cに示す。図-4a, cに示すとおり、ケース2, 5の砂州前縁線の深掘れがワンド側に向いた結果では、砂州による深掘れ以外にも、ワンド下流端で大きく深掘れしている。また、ケース5では、ワンドの下流端で流向が対岸に向かって大きく変化し、水はねしていることが確認できる。図-4bに示すとおり、ケース3の頂部がワンド側に向いた結果では、土砂堆積がワンド内にも及び、頂部と同等の河床高となっている。

(2) 砂州の向きによる横断位置の河岸部の流速分布

図-2に示す砂州の向きによる横断位置での河岸部の流速について、各ケースで全体の平均値を算出した。また、ワンド設置位置とその上・下流の砂州毎の平均値を算出

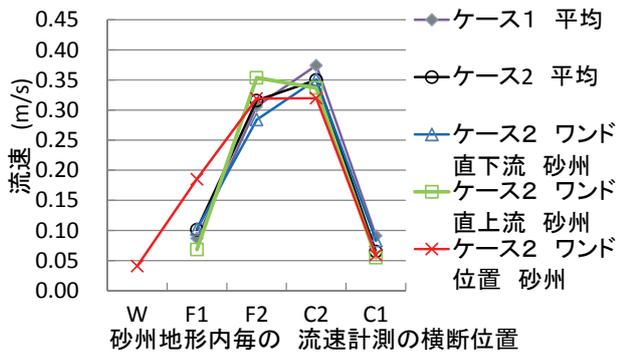


図-5 砂州地形内横断位置による2次元電磁流速計
中層流速分布 (ケース1,2)

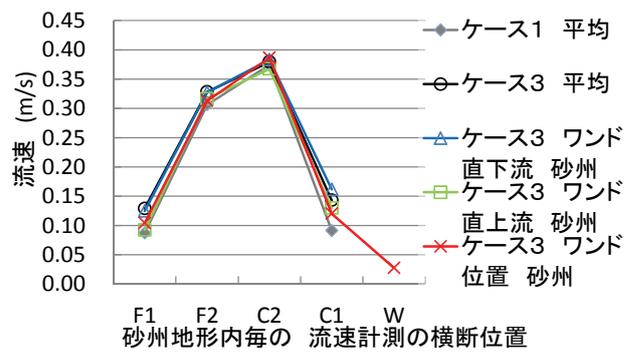


図-6 砂州地形内横断位置による2次元電磁流速計
中層流速分布 (ケース1,3)

し、比較した。その結果を図-5~7に示すが、ワンド設置の有無、ワンドを設置したケース内でのワンド設置位置の砂州、ワンド上・下流の砂州に関わらず、河岸部(F1,2, C1,2)の流速分布に大きな差はみられなかった。一方、ワンド内(W)の流速については、全てのケースで河岸部(F1,2, C1,2)よりも小さかった。また、断面形状が異なるケース1~3とケース4, 5では最外岸部(F1, C1)の流速の平均値が大きく異なり、断面Aであるケース1~3では、0.05~0.19m/sであるのに対して、ケース4, 5では0.36~0.41m/sと速かった。

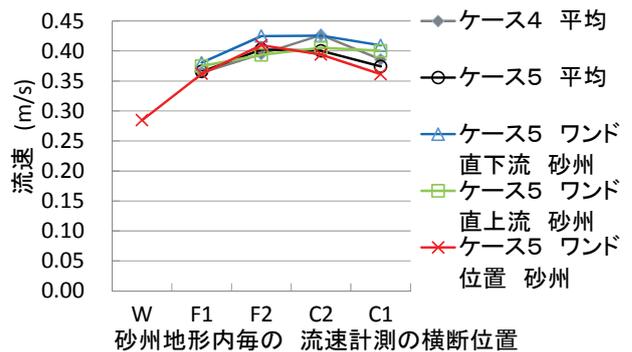


図-7 砂州地形内横断位置による2次元電磁流速計
中層流速分布 (ケース4,5)

(3) 砂州の半波長、波高、移動速度

a) ケースによる全体傾向の違い

各ケース毎の砂州半波長の平均値の時間変化を、図-8aに示す。各ケースとも時間の経過と共に半波長が伸び、ケース2, 4, 5では実験後半に平均値の低下がみられる。しかし、河岸形状やワンドの有無による大きな傾向の違いはみられず、実験終了時の各ケースの半波長の平均値は2.5~3.2mであった。

波高の時間変化を図-8bに示す。各ケースとも時間の経過と共に波高が発達し、ワンドの有無による傾向の違いはみられない。しかし、河岸形状により傾向が異なり、実験終了時の断面Aのケース1~3では3.1~4.4cmであるに対し、断面Bのケース4, 5では2.7, 2.9cmと小さい。

砂州の移動速度の時間変化を図-8cに示す。ケース1, 2, 4, 5では、時間の経過と共に移動速度が低下して、一定値にはほぼ収束している。ケース3は、通水初期に変動がみられ、その後、一定値にはほぼ収束している。ワンドの有無による傾向の違いは確認されないが、断面形状により違いが確認された。つまり断面Aのケース1~3では、実験終了時の移動速度が1.0~1.5m/hであるのに対し、断面Bのケース4, 5では2.3m/hと、断面Aよりも1m/h程度速い値であった。

b) ワンドの上下流での傾向の違い

ワンド設置位置の上・下流側で、砂州の半波長、波高、移動速度の違いを把握するため、水路下流端から8m上流の位置で、これらの結果を上・下流側で分割して平均

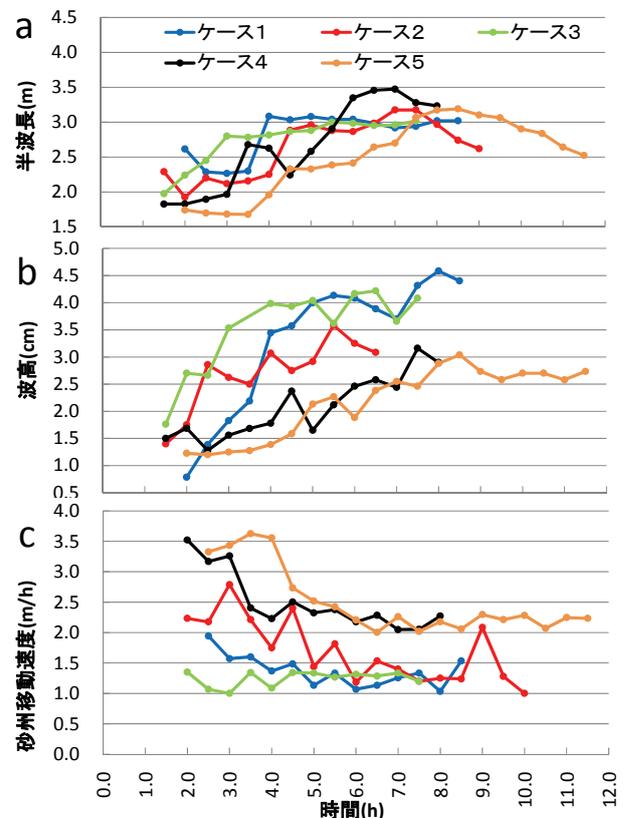


図-8 砂州半波長、波高、移動速度の時間変化 (全体平均値)

値を算出し、比較した。断面A, Bのケースによる半波長、波高、移動速度の時間変化を、それぞれ図-9a~cと

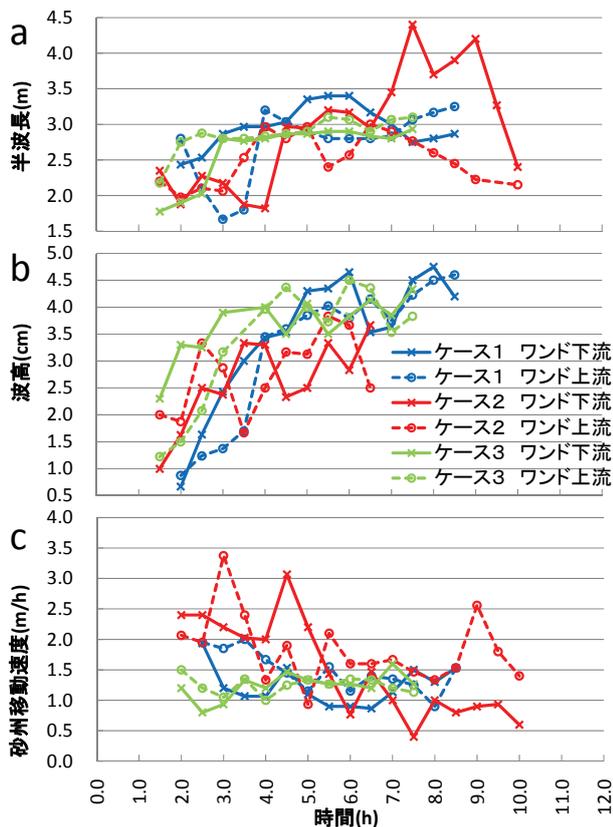


図-9 ワンド設置位置の上・下流側の違いによる砂州半波長、波高、移動速度の時間変化 (ケース1~3)

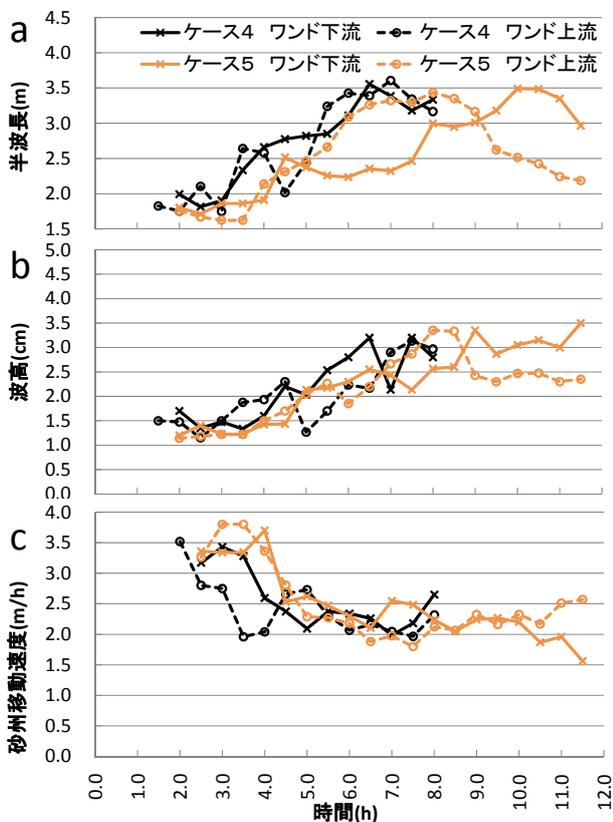


図-10 ワンド設置位置の上・下流側の違いによる砂州半波長、波高、移動速度の時間変化 (ケース4,5)

図-10a~cに示す。この図より、断面A, Bのワンドのないケース1, 4では、通水に伴いワンド位置の上・下流側の半波長、波高、移動速度の差が小さくなり、通水終了時には大きな差はない。しかし、ワンドのあるケース2, 5では、通水終了時にワンド上流側の方が下流側よりも、半波長と波高が小さく、移動速度は速かった。ただし、同じワンドのあるケース3では、ケース2, 5と傾向が異なり、ワンド設置位置の上・下流で明確な違いは確認されなかった。

4. 考察

(1) ワンド周辺の河床変動

図-4a, cに示すとおり、ケース4, 5の砂州前縁線がワンド側に向いた状態では、ワンド下流端に大きな深掘れが確認され、ケース5では図-4cに示すとおり、ワンドの下流端に水はねが確認された。既往研究によりワンドの下流端においては、水はねが生じることが知られている⁷⁾。本実験において確認された、ワンド下流端の深掘れは、砂州前縁線からワンドに向かう流れが、ワンド下流端に集中し、水はねしている流況が影響したことが考えられる。この深掘れは本実験のケース2では最大8cmであり、例えば本実験が1/100スケールものとする、実スケールでは最大8mの深掘れとなる。このように、ワンド下流端で深掘れが発生することは、このような構造物を現地に施工する際に考慮する必要がある。

(2) ワンドによる流速低減効果

図-5~7に示すとおり、ワンド設置の有無や、ワンド設置位置とその上下流の砂州では、河岸部の流速に大きな差がなく、流速低減効果は確認されなかった。これは、流速分布が砂州地形の影響を強く受けているためと考えられる。

ワンド内においては、流速が河床部よりも低く、出水時にワンド内が魚類の退避場所となることも考えられる。

(3) ワンドが砂州形状、移動へ及ぼす影響

図-9, 10に示すとおり、ワンドを設置したケースでは、ワンドの上流側の方が下流側よりも、砂州の半波長と波高が小さく、移動速度は大きかった。砂州の波長、波高は池田¹²⁾によれば、式(1)~(3)のように表される。

$$L = 5 \sqrt{\frac{Bh}{C_f}} \quad : Fr < 0.8 \quad \dots (1)$$

$$\frac{L}{B} = 5.3 \left(\frac{B}{d_s}\right)^{-0.45} \frac{B}{h} \quad : Fr \geq 0.8 \quad \dots (2)$$

$$\frac{Z_b}{h} = 9.34 \left(\frac{B}{d_s}\right)^{-0.45} \exp \left[2.53 \operatorname{erf} \left\{ \frac{\log_{10} \left(\frac{B}{h} \right) - 1.22}{0.594} \right\} \right]$$

… (3)

ここに、 L は波長、 B は川幅、 h は水深、 C_f は河床の摩

擦係数、 Z_b は波高、 d_s は粒径、 Fr はフルード数である。これらの式を用いて、本実験の水利条件として、 Fr 数を等流水深とマンニングの式から算出した流速から算出して0.87、川幅 B を0.7m、水深 h を等流水深の0.02m、粒径を0.00077mとし、半波長、波高を算出すると、それぞれ3.03m (波長 $6.05m=2$)、3.6cmとなる。これを図-9, 10a, bに示す実験結果と比較すると、ケース5のワンド下流側で、実験値と算出値がほぼ一致するが、上流側では実験値が小さくなっている。また、ケース2については、ワンド下流側で、半波長の実験値の方が算出値よりも小さいが、波高はほぼ一致し、上流側では半波長、波高ともに実験値が小さくなっている。これらのことから、ワンド下流側は、概ね水利条件から算出される半波長、波高と一致していると考え、ワンド上流側では算出値から逸脱し、半波長、波高が、ワンドの設置により小さくなったことが考えられる。ワンド設置がどのような機構で、その上流の砂州形状に影響を及ぼすかは、本稿では明らかではなく、今後の課題である。

砂州の移動速度と水量との関係を、簡易に砂州の前縁で粒子がトラップされることにより生じるとすると、式(3)により表現可能とされ、流砂量に比例し、砂州波高に反比例する¹³⁾。

$$V_b = (1 - \lambda) \frac{q_b B}{Z_b l_{bf}} \quad \dots (4)$$

ここに、 V_b は砂州の移動速度、 λ は河床を構成する材料の空隙率、 q_b は流砂量、 B は川幅、 Z_b は波高、 l_{bf} は砂州前縁の長さである。本実験で、ワンド上流側の砂州の移動速度が下流側よりも速かった原因として、前述したとおり、ワンドの設置により、その上流側の砂州の波長(前縁の長さ)、波高が小さくなり、それに伴い、式(4)の関係から、移動速度が大きくなったと考えられる。

これらのワンド設置による、その上流側の砂州の半波長、波高、移動速度の変化は、ワンドを設置したケース2, 5では確認されたが、同じくワンドを設置したケース3では確認されなかった。そのため、この傾向が砂州の非定常性によるものである可能性もあり、別途検討が必要と考えられる。

(4) 断面形状のが砂州形状、移動へ及ぼす影響

図-8cに示すとおり、断面形状の違いにより、砂州の移動速度に違いがみられ、河岸法面が河床内に連続していない断面Aよりも、河床内にまで連続している断面Bのケースの方が速かった。この原因として、図-8bに示すとおり、断面Bでは、断面Aよりも波高が小さいため、式(4)の関係から、移動速度が速くなったと考えられる。なお、断面Bの方が断面Aよりも、波高が小さかった原因としては、砂州の深掘れが河床内部の固定床法面に達し、発達抑制されたことが考えられる。

5. おわりに

本研究は、護岸による粗度の低下の影響による河岸部周辺の高流速対策として、砂州発生条件下でワンド工を設置した際の挙動を確認した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ①砂州前縁線がワンドに向いた状態では、ワンドの下流端で水はねが生じ、大きな深掘れが生じた。
- ②ワンド設置による河岸部での顕著な流速低減効果は確認されなかった。しかし、ワンド内では、河道内のその他の箇所よりも流速が遅く、実河川においては、出水時の魚類の一時退避域として機能する可能性がある。
- ③ワンドを設置したケースでは、その上流側で、下流側よりも、半波長および波高が小さく、移動速度が大きかった。ワンドの設置がどのような機構で、その上流の砂州形状に影響を及ぼすかは、本稿では明らかではないが、移動速度が上昇した原因としては、波長、波高の低下によるものと考えられる。また、この傾向はワンドを設置した3ケース中、2ケースで確認されたもので、一般的な傾向であるか別途検討が必要と考えられる。
- ④河床内部にまで固定床法面が及ぶ断面形状では、砂州による深掘れが抑制され、十分に深掘れが発達できる断面形状のケースよりも、砂州の移動速度が速くなった。この原因として、深掘れの抑制による波高の低下の影響が考えられた。

参考文献

- 1) 福岡捷二ら：緩傾斜河岸を設置した河道弯曲部の流れと河床形状，土木学会論文集，No. 509(II-30)，pp155-167，1995，2.
- 2) 護岸の力学設計法．(財) 国土技術研究センター，2007.
- 3) 傳田正利・天野邦彦・辻本哲郎：一時的水域の魚類群集多様性向上への寄与とそれを支える物理環境に関する研究，土木学会論文集G，Vol. 62(3)，pp340-358，2006.
- 4) 山本晃一：構造沖積河川学；その構造特性と動態，山海堂，2004.
- 5) 多自然川づくりポイントブックⅢ．(財) リバーフロントセンター，2013.
- 6) 例えば、禰津家久・富永晃宏：水理学，朝倉書店，2008，10.
- 7) 禰津家久ら：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，pp813-820，2000.
- 8) 富永晃宏・鄭載勲・阪巻実佳：複断面開水路高水敷に設けられた凹部の流れ構造，応用力学論文集，Vol. 8，2005，8.
- 9) 足立昭平：人工粗度の実験的研究，土木学会論文集 104号，1963.
- 10) 黒木幹男・岸力：中規模河床形態の領域区分に関する理論的研究，土木学会論文報告集，第342号，pp87~96，1984.
- 11) QGIS，<http://www.qgis.org/>
- 12) 池田駿介：単列交互砂州の波長と波高，水工学論文集，1983，2.
- 13) 渡邊康玄：中規模河床形態の形状特性と河川地形，2008年度(第44回)水工学に関する夏期研修会講義集 A コース，土木学会 水工学委員会・海岸工学委員会，2008，8.