

称号及び氏名	博士（緑地環境科学）	向井 章恵
学位授与の日付	平成27年9月25日	
論文名	農業排水路における水制を用いた砂州創出に関する研究 —生態系配慮の技術として—	
論文審査委員	主査	堀野 治彦
	副査	北宅 善昭
	副査	藤原 宣夫
	副査	中桐 貴生

## 論文要旨

### 第1章 緒論

農業システムや農村空間の多面的機能が公に認知されるようになり、2001年の土地改良法改正後、農業農村整備事業の実施の際には「環境との調和に配慮すること」が原則として位置づけられた。こうした中、より効果的かつ効率的な環境配慮型事業の実施における調査計画・設計の手引や技術指針が整理されつつある。生物の生息・生育環境に着目すると、その配慮には、「広がり（量）の確保」と「質の向上」の2つの視点が重要とされ、たとえば、特定の魚に適した水深や流速の許容範囲といったような、周辺の環境要素における要件の具体的な定量化もなされるようになってきた。

ここで改めて水辺で生息する生物の保全を考えると、堆砂、とくに水路内に形成される砂州は、良好な産卵場や採餌場などとして、あるいは植生の生育基盤として機能するなど、生息・生育環境の観点では不可欠な存在となっている。しかしその一方、水路内での多量の堆砂は通水を阻害し、水路本来の機能の喪失を招く可能性もある。したがって、水路の通水機能に不都合を生じさせることなく、生物に有用な砂州を創出する技術を構築することが、今後の環境配慮型農業農村整備の展開上求められる。とくに、堆砂がある程度許容される農業排水路（以下、排水路）を対象にすることで、波及効果の高い検討が可能と思われる。

しかしながら、先の手引や技術指針において、砂州の創出技術の観点から知見を整理した例は示されていない。また、本来その専門である土砂水理学の分野でも、河川の砂州形成機構についてはある程度明らかにされているが、排水路のような小水路内における砂州創出に資する知見や技術はほとんど提供されていない。そこで、本研究では、排水路において土砂水理学的手法を用い、現地実証と相似則を考慮した水理実験を踏まえ、水路の本来機能と生態系保全の両立に向けた砂州の創出に関わるメカニズムの把握や技術を考究することを目的とする。

## 第2章 砂州創出の観点から見た対象排水路の特性

本章では、本研究で対象とすることにした、傾斜地水田域に位置する勾配 1/100（幅 1 m×高さ 1 m）の排水路（以下、急排水路）、および低平池水田域に位置する勾配 1/1000（幅 2 m×高さ 1.2 m）の排水路（以下、緩排水路）の特性について、砂州創出の観点から整理した。

まず、両排水路とも底面が土砂、側壁がコンクリート板の柵渠で、土砂の平均粒径はそれぞれ 2.3 cm（中礫）、0.03 cm（中砂）であることを確認した。この平均粒径と水路勾配の関係から、正味の堆砂は急排水路では出水時に、緩排水路では出水時～平水時に生じ得ると判断された。

次に、川幅水深比  $B/H$ （低水路の満杯流量時における平均水深  $H$  に対する平均川幅  $B$  の比）および河川勾配  $I$  によって与えられる指標  $BI^{0.2}/H$  を援用・整理した。その値が 7 以上のとき砂州が形成され、5 以下のとき砂州は形成されず河床の岩盤化が進むという中小河川の特性分類を参考に検証したところ、両排水路での値はともに 0.9 となり、水路への十分な土砂供給があったとしても、水路床が堆積傾向にはなく、そのままの状態では砂州の創出は見込めないことが示された。

## 第3章 砂州創出を目的とした水制の検討

第2章での検討結果から、両排水路とも砂州を創出させるには、水路床を堆積傾向に転換させる必要があることがわかった。そこで、水路床に水制を設置することによる砂州の創出およびその制御の可能性について検討することにした。本章では、その前段として、両排水路それぞれに適した水制形状について検討した。

まず、急排水路では、出水時にのみ上流域からの区間内堆砂供給が期待され、水制の上流側で土砂を捕捉して砂州を創出させるとともに、水制による噴流発生により下流側にも砂州を創出できると考えた。この結果、急排水路には嵩上げ部分に切り欠きを設けた凹型の水制（以下、切り欠き付き水制）を千鳥配置する形状が良いと結論づけた。

次に、緩排水路では、流速が比較的小さな平水時においても正味の区間内堆砂がある程度期待される一方、砂州創出のための局所的土砂移動を促すために、流路の一部で流積を人為的に限定することによる噴流の発生が求められる。ここでは、流路の嵩上げに加え、一部を潜りオリフィス形状にして水を流すことで、このことが可能になると考えた。すなわち、緩排水路には嵩上げ部分にオリフィスを設けた水制（以下、オリフィス付き水制）を千鳥設置する形状が良いと結論づけた。

両水制とも水路床に置かれた柵渠のアーム部分を嵩上げする形で設置するものとした。また、過去に行った水理実験において、切り欠き幅を水路幅の 1/5 程度、切り欠き高を 5~10 cm 程度とすると、通水性能に支障をきたすことなく砂州が明瞭に創出されたことから、これを参考に、切り欠きおよびオリフィス幅を水路幅の 1/5 とし、切り欠き高を 10 cm、オリフィス高を 5 cm とした。

#### 第4章 急排水路における水制設置による砂州創出に関する現地実証試験

急排水路に切り欠き付き水制を設置し、出水時における砂州創出に関する現地実証試験を行った。出水発生前に、対象区間の植生をすべて排除後、土砂を切り欠き底から-5 cm 程度に均した状態で試験を開始し、出水後の水路床形状の測量と流量の連続計測を行った。

試験結果より、出水流量の大小によって、砂州の創出過程が異なることがわかった。出水流量が小さい場合、水制間では侵食が卓越し、植生で固定された部分を除いて砂州が不明瞭になることがわかった。この状態が回避されるのは、水制間に砂州形成の基盤となる大量の土砂が流入・堆積した時であり、その出水流量は水路床が攪乱される(平均粒径の土砂が移動する)規模で計画排水量に近いものであった。すなわち、砂州を安定して創出し続けるためには、この規模の出水発現が必要不可欠であるといえる。なお、このような激しい出水を経ても、水制の第一の役割である土砂捕捉機能は持続され、水路床位の平均が試験開始前のものを下回ることなく、みかけ上砂州が区間外流亡することもなかった。また、砂州の創出に伴い、流速、水深、土砂粒径が多様化することで、底生動物の総個体数が増加することも確認された。

#### 第5章 急排水路において水制が砂州表層の粗粒化抑制に及ぼす効果

急排水路の土砂は、集水域に含まれる山地由来の混合砂礫である。本柵渠は、矩形のコンクリート板構造であるため、比較的流れが一様で速くなりやすい。そのため、砂州表層では、小粒径の砂が流失し、大粒径の礫が残る粗粒化が生じやすい。粗粒化によって、底生動物の種の多様性が失われ、また植生の定着が困難になるといわれているが、第4章より、急排水路でも、砂州創出によって底生動物の増加および植生の繁茂が確認された。このことから、切り欠き付き水制によって、砂州表層の粗粒化が抑制されたものと推察できる。しかし、現地実証試験では、砂州表層の粒度分布の測定が困難であったことなどから、本効果の十分な正否は確認できなかった。

そこで、本章では、砂州表層の粒度分布の変化を水理実験によって測定し、切り欠き付き水制の設置と砂州表層の粗粒化抑制の因果関係を検証した。なお、水理実験は出水時の急排水路の流砂の状態を再現して行った。実験結果より、水制を設置しても、細砂の砂州表層下への沈み込みなどによって、砂州表層の粗粒化は直接的には抑制されないことが明らかになった。ただし、切り欠き付き水制の設置による淀みの形成作用に、出水による水路床の攪乱作用が加わることによって、たとえばイネ科植生が砂州に定着可能となり、細砂を捕捉することで粗粒化は抑制されるこ

とが推察できた。すなわち、切り欠き付き水制の設置は、間接的であるが砂州表層の粗粒化を抑制すると判断された。

## 第6章 緩排水路における水制設置による砂州創出に関する水理実験

緩排水路では、平水時にも堆砂が生じるが、その空間的不均一性は小さく砂州を創出するほどの顕著な差とはならないことが多い。そこで、平水時流量であっても、オリフィス付き水制の土砂移動機能が発揮されるかどうかを検証する水理実験を行った。なお、水理実験の規模は現地緩排水路の1/2とし、平水時における実際の水路での流砂状態が再現されるよう諸量を設定した。

実験では、オリフィスからの流れが噴流状態になったことで土砂移動が促され、オリフィスの直下流に淵、さらにその下流側に瀬や砂州が形成された。ここで、噴流と瀬の流速を比較すると前者が後者の約1.5倍となり、オリフィスは瀬よりも速い流れ場を創出可能なことが示された。オリフィスの噴流効果のさらなる検討のため、オリフィス直下流の摩擦速度を求め、実験で用いた珪砂（平均粒径0.02 cm）の限界摩擦速度との比較を行った。その結果、求められた摩擦速度1.55 cm/sが限界摩擦速度である1.48 cm/sを上回ることが検証され、オリフィスからの流れは土砂移動を促進すると再確認された。

## 第7章 結論

水辺環境に生息する多くの生物にとって、砂州は極めて重要な存在であるにもかかわらず、生態系に配慮した農業農村整備事業において、砂州の創出や制御に関わる知見や技術が今なお不十分であることを指摘し、傾斜地水田域ならびに低平地水田域における農業排水路を対象に水制の設置による砂州の創出およびその制御について実証的な検討を行った。その結果、そのままの状態では砂州が形成されない水路であっても、最低限必要な土砂供給と所定の流量さえあれば、水路形態に応じた形状の水制を設置することによって、砂州の創出が可能となり、さらに粗粒化の抑制にも寄与し得ることが明らかとなった。

排水路は中小河川より人工的な構造物であり、その形態特性によって引き起こされる土砂移動は、河川で生じる“本来の自然な姿”と称される土砂移動とは異なる部分が多いことも確認された。このことが逆に堆砂の機構を制御する余地を生み出しているとも考えられ、本研究の成果は工学的な見地からも有用と思われる。

### 審査結果の要旨

水辺で生息する生物の保全上、堆砂、とくに農業水路内に形成される砂州は重要である。しかし一方、水路内の多量の堆砂は通水を障害し、水路本来の機能の喪失

を招く危険性もある。したがって、水路の通水性を維持しつつ生物に有用な砂州を創出する技術が求められているが、その知見はほとんど提供されていない。そこで、本研究では、堆砂がある程度許容される農業排水路（以下、排水路）を対象とし、現地実証と相似則を考慮した水理実験を通じて、実効性の高い砂州創出技術を探求した。本論文は7章から構成されるが、第1章では研究の背景と目的について触れており、第2章から第7章で述べられている成果は以下の通りである。

第2章では、対象とした傾斜地水田域における勾配 1/100 の排水路（以下、急排水路）、および低平地水田域における勾配 1/1000 の排水路（以下、緩排水路）の特性について砂州形成の観点から整理している。これら排水路底の土砂の平均粒径はそれぞれ 2.3 cm, 0.03 cm であることが確認され、この平均粒径と水路勾配の関係から、砂州形成に必要な土砂供給が成立するのは、急排水路では出水時、緩排水路では出水時～平水時と判断された。また、河川の水理的砂州形成指標を援用した結果などから、両排水路は土砂供給があつたとしても水路床は堆積傾向にはなく、そのままでは砂州が形成されないことが示された。

第3章では、水路床を堆積傾向に転換させ、さらに通水機能を大きく阻害しない範囲で砂州を創出させるには水制の設置が有効と判断し、両排水路それぞれに適した水制形状について検討している。急排水路では堆砂の促進と流速多様化の必要性から、嵩上げ部分に切り欠きを設けた凹型の水制（以下、切り欠き付き水制）を千鳥配置する構造が望ましいと結論づけた。緩排水路には堆積の促進と局所的な侵食の促進が求められ、嵩上げ部分にオリフィスを設けた水制（以下、オリフィス付き水制）を千鳥設置する構造を採用した。これらは、すべて水理模型実験の反復試行から整理・検討した結果であり、切り欠き、オリフィスは通水断面の一部としての機能性も確認されている。

第4章では、急排水路における出水時の砂州創出について、切り欠き付き水制を用いた現地試験を導入しその結果を検証している。試験結果より、出水流量が小さい場合、水路床は侵食傾向にあり、砂州が不明瞭・未発達になる場合があることがわかった。この状態が回避されるのは、砂州形成の基盤となる大量の土砂供給があつた時であり、その出水流量は水路床が攪乱される（平均粒径の土砂が移動する）規模でほぼ計画排水量に近いものであることが示された。このことから、砂州を継続して創出するためには、この規模の出水の定期的発現が必要不可欠であると示唆された。

第5章では、切り欠き付き水制の設置が砂州表層の粗粒化抑制に与える影響について、砂州表層の粒度分布の変化をほぼ実規模の水理模型実験によって検証している。実験結果より、水制を設置しても、細砂の砂州表層下への沈み込みによって、砂州表層の粗粒化は直接的には抑制されないことが明らかにされた。一方で、先の現地試験では抑制効果も確認されており、その理由として水制による瀬淵の形成によって主に根付きのイネ科植生が定着可能となり、細砂を捕捉することが推察された。すなわち、切り欠き付き水制は、間接的であるが砂州表層の粗粒化を抑制すると判断された。

第6章では、緩排水路におけるオリフィス付き水制の砂州創出効果を縮尺 1/2 の

水理実験によって検証している。実験では、オリフィスによる噴流の発現で土砂移動が促され、オリフィス直下流に淵が、壁面側に砂州が創出された。この噴流のさらなる検討のため、オリフィス直下流の摩擦速度を求め、実験砂(平均粒径 0.02 cm)の限界摩擦速度との比較を行った。その結果、摩擦速度 1.55 cm/s が限界摩擦速度 1.48 cm/s を上回ることが検証され、オリフィスが砂州創出に好ましい土砂移動を促進することが再確認された。

最後に第7章では、結論として、現況では砂州が形成されない排水路であっても、所定の土砂供給さえあれば、水路形態に応じた水制の設置によって、通水性を大きく阻害しない範囲で砂州創出が可能となること、現地試験ならびに実規模に近い水理実験を通じて現象結果の信頼性が高いことなどを改めて示している。

本研究は、生態保全上重要な存在であるにもかかわらず、その創出や制御技術に関する知見が乏しい砂州について、農業排水路を対象に実証的に検討がなされたものである。環境との調和に配慮した農業農村整備事業が不可避である昨今、重要な工学的、技術的証左を与えるものであり、緑地環境科学の発展にも寄与すると考えられる。また、応用科学に課せられた役割を果たした一例といえる。したがって、最終試験の結果と合わせて、博士(緑地環境科学)の学位を授与することを適当と認める。