

平成20年度応用水理研究部会

講演集



平成20年12月8日～9日

於 弘前大学創立50周年記念会館

(社) 農業農村工学会応用水理研究部会

平成 20 年 12 月 8 日～9 日

農業農村工学会応用水理研究部会 研究発表会 講演プログラム

【12 月 8 日】

開会の挨拶

(14 時 00 分～15 時 30 分)

1. 排水処理施設への加入率と流出負荷量の変化について ----- 1
弘前大学農学生命科学部 ○工藤 明・工藤文人・泉 完
2. 堰下流護床工の災害防止効果に関する実験的検討 ----- 5
岩手大学大学院連合農学研究科 高井和彦
岩手大学農学部 ○三輪 弼
3. Tow step Lax-Wendroff 法を基礎とした数値シミュレーションモデルにおける効率的な内部境界条件の計算方法に関する考察 ----- 13
東京農工大学農学府 久保成隆
東京農工大学農学府 Unggoon Wongtragoon
東京農工大学農学府 ○浦谷修司

(休憩：15 時 30 分～15 時 45 分)

(15 時 45 分～16 時 45 分)

4. 河川における自然誘導式スタミナトンネルを用いた高速流条件での野生魚の突進速度 ----- 23
弘前大学農学生命科学部 ○泉 完
(株) 日さく 山本泰之
(株) 建設技術研究所東北支社 矢田谷健一
(株) 建設技術研究所東京本社 神山公平
5. 琵琶湖から周辺低平地水路網へ遡上する魚類の行動 ----- 33
京都大学大学院農学研究科 ○室井洋佑
京都大学大学院農学研究科 宇波耕一
京都大学大学院農学研究科 河地利彦

平成 20 年度農業農村工学会応用水理研究部会第 2 回幹事会 (16 時 50 分～17 時 10 分)

情報交換会 (17 時 30 分～19 時 00 分)

【12月9日】

(9時00分～10時00分)

6. 小国川における鮎築の調査と水理基礎実験

----- 35

山形大学大学院農学研究科 ○小川 亮

山形大学農学部 前川勝朗

山形大学農学部 大久保博

7. 乱流中における異符号に帯電したコロイド粒子の凝集速度

----- 39

岩手大学農学部 ○小林幹佳

岩手大学農学部 渡邊祐二

閉会の挨拶

排水処理施設への加入率と流出負荷量の変化 Experimental study on the entrance rate to the domestic-water treatment plant and the change of effluent loads

○ 工藤 明* 工藤 文人** 泉 完*
Akira KUDO, Fumihito KUDOU, Mattashi IZUMI

1. はしがき

我が国における河川や湖沼等の水環境は、流域内における土地利用形態の変化や社会・経済発展に伴って流入する負荷量が増大し、水質悪化や富栄養化が急速に進行した。農村地帯においても、集水域の宅地化による生活雑排水の増加や農地からの排水が水環境を悪化させているとの指摘もあり、下水道の整備や水管理の改善による負荷量の軽減対策が必要である。農業をはじめ用水の水源となっている河川や湖沼等の水環境を改善するためには、流域における土地利用状況が異なるそれぞれの地域から流出する負荷量を的確に把握した上で、それに応じた対策を講じなければならない。点源からの流出負荷量は比較的容易に把握され、法的な規制も布かれているが、森林地帯、農用地、市街地などの面源からの負荷量が流域の水環境を大きく左右する要因であるにもかかわらず、地目が同じでも利用条件が大きく異なる場合もあり、まだ調査事例が少ない。

本研究は、農村地帯における水質環境の実態把握と改善調査の一環として行った地域で、市街地から排出される生活雑排水の受け皿となっている排水路の水質・流出負荷量が流域の下水道整備（加入率）によってどのように変化・軽減していくのか、現地での調査結果を基に検討したものである。

2. 調査地区の概要と調査方法

水質環境調査は図-1に示したとおり、青森県津軽平野で生活雑排水が流入する排水路2カ所（青森市新城地区、鶴田町排水路）、平滝地区（水田：循環灌漑）の排水路末端機場、農業用溜池、世界自然遺産白神山地東側から流出している暗門川の5カ所で、4月下旬から11月上旬までの約6ヶ月間週1回現地調査を行った。ただし、暗門川は5月下旬からの調査である（表-1）。

本研究の対象地区である鶴田町廃堰（旧排水路）は町内中心部を貫流するように流れ、一級河川岩木川に注いでいる。流路延長は約2km、流域面積98.6ha、調査地点の水路幅は110cmであり、地区上流部からの流入はなく、調査地点での流量や水質の変化は鶴田町市街地からの流入と降雨によるものである。流域内には公的施設である役場、小学校や給食センター等があり、民家は1,251戸

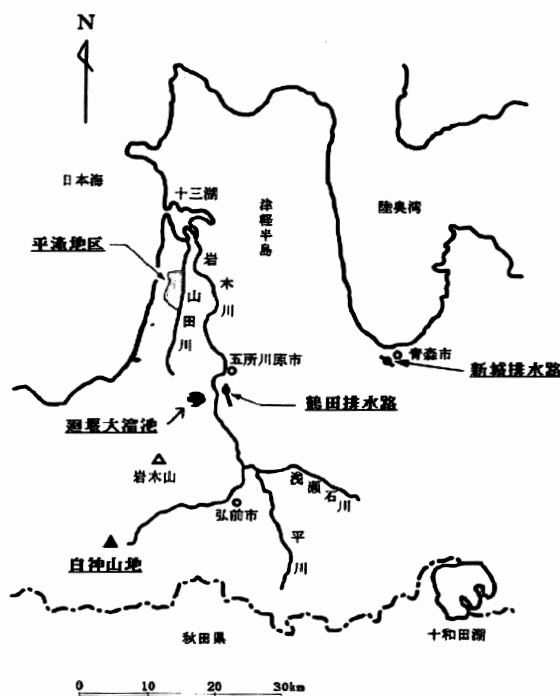


図-1 水質環境調査地区の概要図

*弘前大学農学生命科学部 Hirosaki Univ. Faculty of Agriculture and Life Science

**弘前大学大学院農学生命科学研究科 Hirosaki Univ. Graduate School of Agriculture and Life Science

キーワード：農村地帯、水環境、排水処理施設、加入率、負荷量軽減

表－1 水質環境調査地区の平均水質（2006年度）

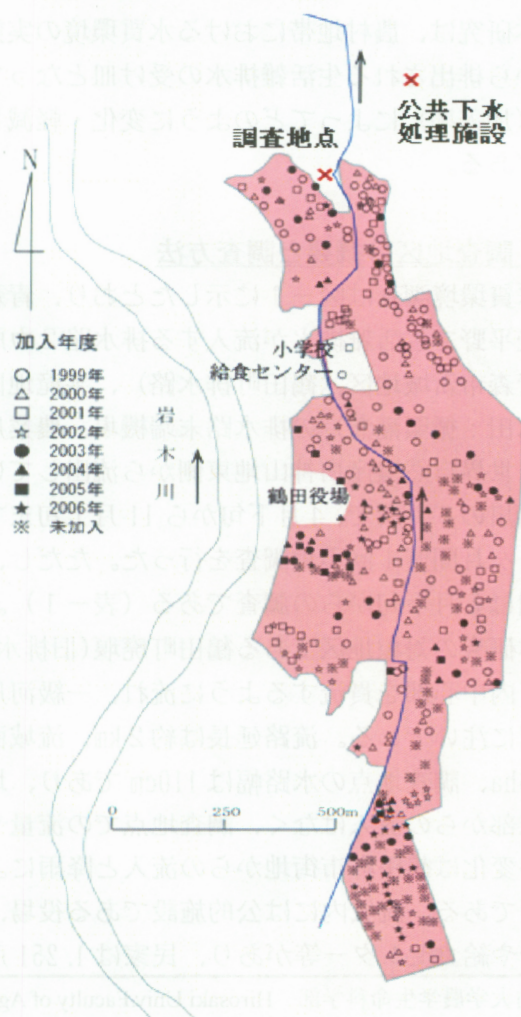
	水温 (°C)	D0 (mg/L)	濁度 (mg/L)	EC (μ S/cm)	pH	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
鶴田排水路	19.1	5.8	13	727	7.15	10.29	4.37	0.939
新城排水路	18.0	5.1	15	379	7.09	11.25	6.36	1.588
平滝地区	18.4	7.0	22	295	6.57	9.72	2.19	0.229
廻堰大溜池	20.1	8.9	15	141	7.68	8.41	1.93	0.162
白神暗門川	16.6	9.0	3	103	7.32	2.27	0.87	0.031

（2006年現在）となっている。流量や水質の調査は廃堰の水質環境把握と改善対策を検討するため1998年4月下旬より実施していた。一方、鶴田町では水環境改善のため、本流域を含む計画処理面積218ha、計画処理人口6,600人の公共下水道を計画し、1999年3月31日共用を開始した。現在、鶴田町では本下水道の他に3地区の集落排水施設が稼働している。図－2には本調査地区の概要と公共下水道への加入家屋および施設を加入年度ごとに印を変えてプロットした。未だに未加入の家屋や施設は*で示したが、調査地区上流部に多く認められる。調査地区における2006年度末までの下水道加入率は43.4%である。

3. 結果と考察

（1）農村地帯における水質環境

水質環境調査は表－1に示したとおり、青森県津軽平野における約6ヶ月間調査の（測定回数：28回、暗門川のみ24回）の平均値である。表中上段2カ所は生活雑排水が流入する排水路の地区末端地点であるが、鶴田排水路は下水道処理施設への加入率が流域世帯数の約半分程度になったために、調査当初（1998年度）に比較すると水質濃度が改善される傾向にある。一方、まだ排水処理施設を持たない新城排水路（青森市郊外）ではかなり高濃度、高負荷量の排水が河川に流入している。平滝地区（つがる市）は用水源に乏しく、地区内循環灌漑を積極的に行っている水田地帯であり、無降雨時には連続して再利用を行っているため、排水路の水質悪化が懸念されている地区である。表に示した水質は排水路末端のポンプ場のものである。廻堰大溜池は本地区の最も重要な水瓶であり、東北でも最大規模の農業用溜池（1,100万t）である。決して濃度が低いと言えない農業用水利施設の水質と比較しても生活雑排水が流入する排水路は全窒素で2～3.3倍、全リンでは4～9.8倍であり、悪臭もあるため、排水路近傍の住民からは水環境改善の要望が高い。さらに、津軽平野の取水源である岩木川の最上流、1993年12月



図－2 調査地区の概要と
年度別公共下水道加入状況

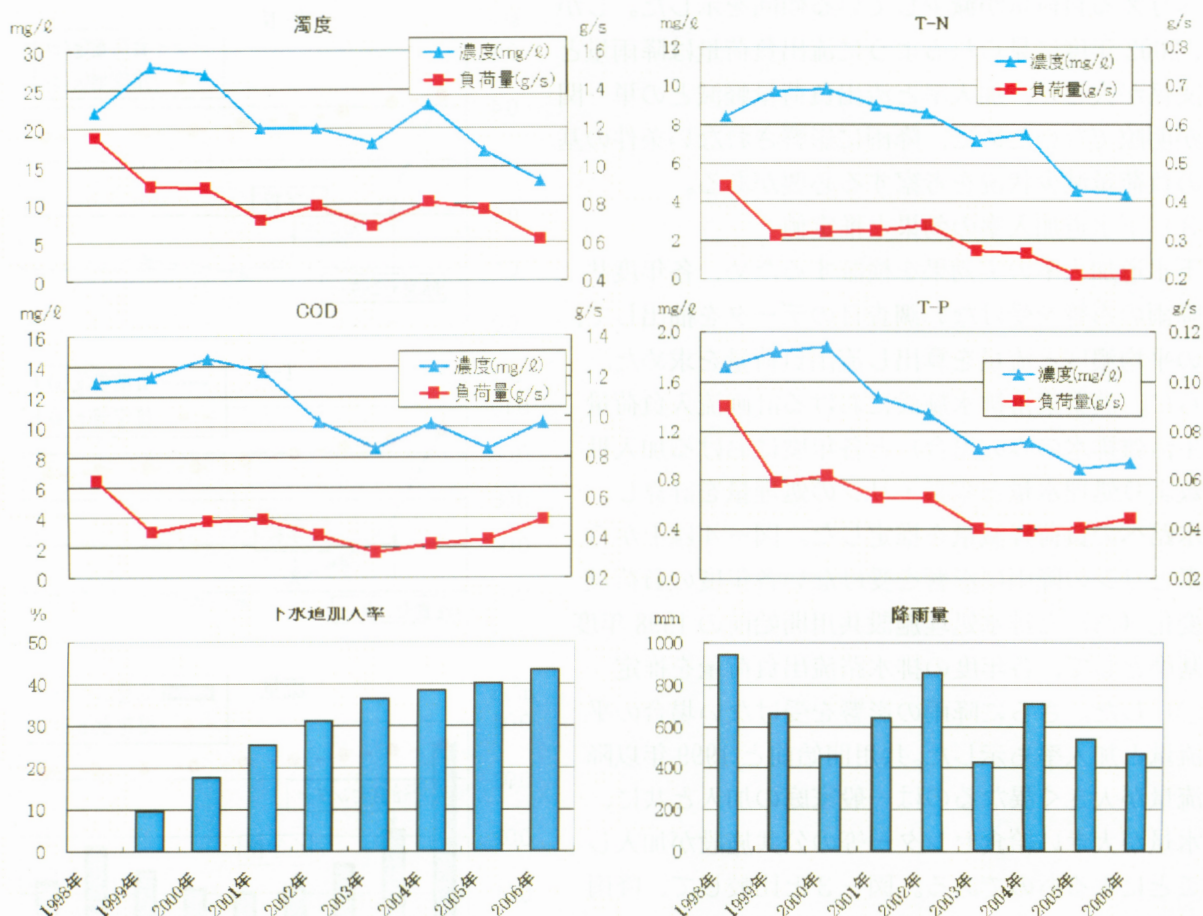


図-3 公共下水道の加入率と水質、流出負荷量の変化

世界自然遺産に登録された白神山地から流出する暗門川の水質も添付した。他地区に比べるとその清冽さが読みとれる。即ち、人的影響をほとんど受けていない河川上流部では素晴らしい水質環境を維持しているが、流下するに従い水質濃度が高まり、河川環境の悪化が指摘されているのが現状である。

(2) 下水道への加入率と水質・負荷量の変化

1970年「水質汚濁防止法」制定を契機として、点源汚染は改善される傾向を示しているが、面的汚染源（都市排水）が水質汚濁の原因となる比率が高まってきた。その対策の一つが家庭からの生活雑排水や糞尿の処理施設を整備し、かつ加入率を高めることである。

図-3の左図は本調査地区内における年別公共下水道への加入率と水質・流出負荷量（濁度、COD）の変化、右図は年別降雨量（5～10月）と水質・流出負荷量（全窒素、全リン）の変化を示した。加入率は1999年以来増加を続け、2006年には43.4%に達している。この間に定点観測した年平均（約6ヶ月）の水質濃度（△）を見てみると、共用を開始した1999、2000年度はむしろ上昇傾向を示したが、その後徐々に低下し、共用開始前に比べ2006年度ではCODで約2割、全窒素、全リンは共に約5割に低下している。さらに、本地区から排出先である下流河川環境への負荷軽減効果を見ると4項目共に共用開始年度から急激な減少を見せている。これは家庭からの雑排水流入量が減少したことよりも大口の排水量を出す給食センターが加入したことで、降雨量が少なかったことに起因するものと思われる。その後加入率が増加するに伴い、水質濃度の低下と共に家庭から排水路への排出量が減少したことが相乗作用を生み、本調査地区の排水路から河

川へ与える負荷量が減少している傾向を示した。しかし、2002年度に見られるように流出負荷量は降雨量との関係が大きく、加入率と流出負荷量軽減との単一関係が明瞭でないために、降雨に影響されない条件の基礎での負荷量減少状況を考察する必要がある。

(3) 下水道加入率の効果と推定値

下水道加入率の実効果を検証するため、各年度共に降雨の影響を受けない調査日のデータを抽出して、その平均濃度と流量を算出し流出負荷量を求めた。さらに、農業集落排水施設における計画流入負荷量（生活雑排水のみの場合）と各年度における加入世帯数より処理水量と窒素・リンの処理量を計算し、排水路への負荷軽減量を推定した。図-4は上から窒素とリンの降雨に影響を受けない各年度の負荷量の変化（△）と排水処理施設共用開始前の1998年度を基準として、各年度の排水路流出負荷量を推定（○）した。さらに降雨の影響を受けない場合の平均流量と加入率も示した。共用開始前と1999年以降の流量が大きく異なるのは一般家庭の加入と共に、排水量が多い給食センター等の公共施設が加入したことによるものである。図-3と比較して、降雨の影響を受けない場合は加入率と負荷軽減量の関係がかなり明確に表される。ただ、各年度ごとの処理世帯数から算出した推定値は、実測値と共用開始年度から大きな違いを見せている。この原因は図中にも表示しているとおり、初年度に鶴田町小・中学校の給食を賄う給食センターが加入し、さらに2001年度には小学校も加入した。この分の負荷量は推定値には含まれていないため、実測値との差が出てきたと考えている。従って、流域内における一般家庭の加入率を促進させると共に、排水量の大きい公共施設等の加入が水環境改善には大きな役割を果たす。

（○）した。さらに降雨の影響を受けない場合の平均流量と加入率も示した。共用開始前と1999年以降の流量が大きく異なるのは一般家庭の加入と共に、排水量が多い給食センター等の公共施設が加入したことによるものである。図-3と比較して、降雨の影響を受けない場合は加入率と負荷軽減量の関係がかなり明確に表される。ただ、各年度ごとの処理世帯数から算出した推定値は、実測値と共用開始年度から大きな違いを見せている。この原因は図中にも表示しているとおり、初年度に鶴田町小・中学校の給食を賄う給食センターが加入し、さらに2001年度には小学校も加入した。この分の負荷量は推定値には含まれていないため、実測値との差が出てきたと考えている。従って、流域内における一般家庭の加入率を促進させると共に、排水量の大きい公共施設等の加入が水環境改善には大きな役割を果たす。

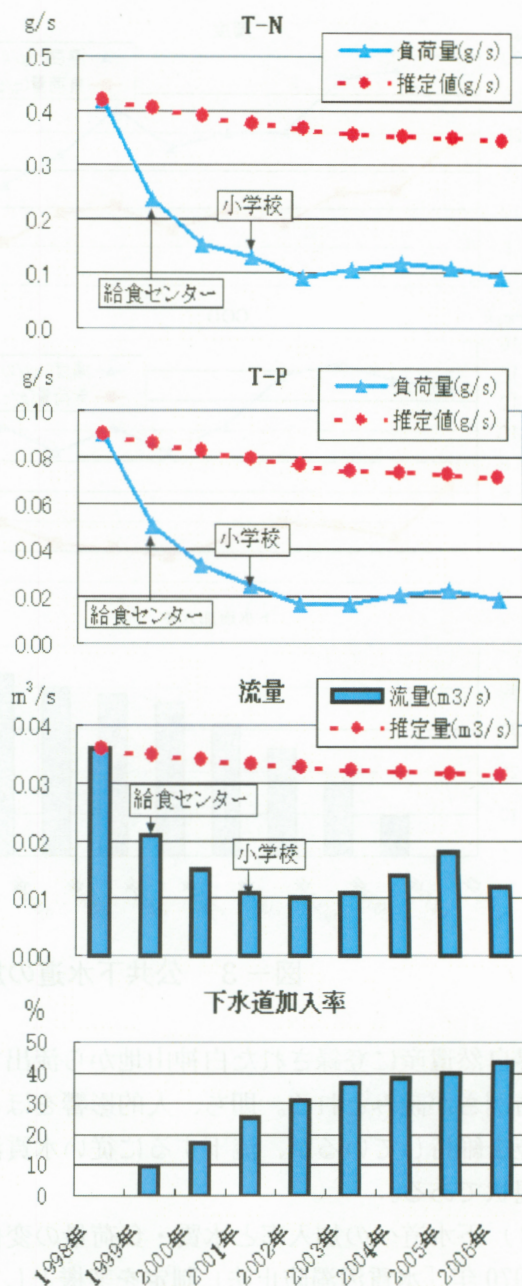


図-4 下水道加入率の実効果と流出負荷量の低減推定値

4. あとがき

流域の水環境を改善するための重要な施設である公共下水道、集落排水処理施設は、現在逼迫した財政の基で施設整備、加入率共に伸び率が停滞の傾向にある。河川の水環境を改善するためには流入する支川、枝川、排水路、側溝からの負荷量を軽減することが重要である。下水道加入率の上昇や大口排出である公共施設等の加入が排出先である排水路や河川への負荷量を確実に軽減するという本研究の結果が、市町村が管理主体となっている公共下水道、集落排水処理施設への加入率促進に寄与できれば幸である。最後に本研究を行うにあたり、ご協力を頂いた東北農政局北奥羽土地改良調査管理事務所、青森県西北地域県民局農林水産部、鶴田町建設整備課、弘前大学農業水利学研究室の方々に謝意を表します。

堰下流護床工の災害防止効果に関する実験的検討

高井和彦*, 三輪 弼**

1. まえがき

頭首工は、洪水時に砂礫が激しく移動する河床面に設けられる水利構造物であり、その取水機能の維持と構造の安全と同時に、治水上の配慮が求められる。現在、河川に設置される構造物は、昭和 51 年施行の河川管理施設等構造令（以下、「構造令」）に則って計画・設計される。堰の固定部は、現河床より低く設定された将来計画河床高に合致させるように建設されるため、洪水後、可動堰ゲート直下に発生する堆砂によって、ゲート閉鎖に支障をきたしている事例（例えば、鬼怒川岡本頭首工、吉井川田原井堰、栃木県荒川森田頭首工など）が数多く見られる（三輪，1991）。

その一方で、昭和 40 年代あるいはそれ以前に建設された多くの頭首工で、堰下流の河床洗掘によって、堰の安全が脅かされ、緊急の対応が必要になっている。河床低下は、主として、昭和 30 年代、40 年代に優良な建設資材として河床の砂利が大量に採取されたことが原因であり、その当時建設された頭首工の下流で、河床の局所的な洗掘が進行した。頭首工設置箇所付近の河川では、河床に砂礫堆が形成され、淵と瀬を伴って水流が左右に蛇行している場合が多い。頭首工の設置箇所が、特有の 3 次元形状を持つ砂礫堆とどのような位置関係にあるかによって、堰下流の河床洗掘位置と深さが大きく異なる。単に縦断的な河床低下からだけでは、堰下流の河床洗掘問題の解明を進めることはできない（MIWA & KURASHIMA, 2003）。

そこで、我々は、実験水路に砂礫堆が明瞭に形成され、現地河川の河床形状と蛇行水流が再現できる水理諸量の組み合わせを選定したうえで、直線水路と蛇行水路において、堰下流の河床洗掘現象の実態を明らかにしたいと考えた。また、災害防止対策として施工されることが多い階段式護床工と斜路式護床工について、その効果を実験的に検証した。

2. 実験の方法と手順

2.1 実験水路の仕様と実験水理条件の選定

実験は、表—1 に示した水理諸量の組み合わせで通水することにした。まず、直線水路において、流量を 3 通りに変化させ、いずれの流量でも明瞭な砂礫堆が形成されることを確認した。

直線水路において、平坦河床から通水直後の水路上に砂礫



図—1 使用した屈折蛇行水路
水路幅：20 cm, 蛇行半波長：86 cm,
蛇行屈折角：24°，水路長：16m(07)
& 8m(08)

*岩手大学大学院連合農学研究科, **岩手大学農学部

キーワード：頭首工, 砂礫堆, 河床洗掘, 河川災害, 堰下流護床工, 水路実験

表-1 直線実験水路の諸元

水路長 L	水路幅 B	水路勾配 I	砂粒径 D	砂の水中比重 σ	砂厚 Z	流量(3通り) Q
16m(2007年)						L/s
	200mm	1/70	0.6~1.0mm	1.49	40mm程度	0.4, 0.6, 0.8
8m(2008年)						

表-2 流速測定から得られた水理諸量

流量 Q	平均流速 v	平均水深 h	B/h	BI/h	v^2/gh	$hI/\sigma D$
0.4 L/s	29.1 cm/s	0.69 cm	29.0	0.41	1.25	0.083
0.6 L/s	33.6 cm/s	0.89 cm	22.5	0.32	1.29	0.107
0.8 L/s	36.5 cm/s	1.09 cm	18.3	0.26	1.27	0.131

堆が形成されない状態で、色素流下法によって平均流速を測定し、それを元に、表-2のように水理諸量を求めた。

使用する水路は、この直線水路と図-1に示した屈折蛇行水路である。直線水路に形成される砂礫堆の長さにはほぼ合致するように蛇行半波長を決め、木下・三輪の研究(1974)から砂礫堆の移動が抑えられる屈折蛇行角を選んだ。なお、2008年度については、屋内実験室で実験を行ったため、水路延長は約8mである。

2.2 堰の構造

水路に設置する堰は、図-2(a)に見られるような直角固定堰とし、下流側に水たたき面を設けた。堰の天端幅は40mm、水たたき幅も40mmである。水たたき面は、堰天端から4mm低い高さにて設けてある。下流護床工の効果を検証する実験では、同図(b)、(c)に見られるような2段式護床工と斜路式護床工を設置した。

* 2段式護床工：それぞれ50mm幅とし、1段目は下流水たたき面より4mm下げ、2段目はさらに4mm下げている。

* 斜路工：その上端は、堰下流水たたき面から4mm下げた高さであり、長さ100mmで下端は上端より4mm下げている。2段式護床工の下端と同じ高さになっている。

2.3 実験の手順と測定項目

実験は、まず堰上下流の河床を所定の勾配(1/70)で平坦に整形した後に通水し、砂礫堆の発達を観察・写真記録し、砂礫堆が十分に発達した段階で、停水して写真記録するとともに、堰直下流の洗掘横断形状を測定した。また、堰上下流の全体的な河床高を把握するため、堰の上下流区間2m程度についても水路距離10cm間隔で横断形を計測した。堰直下流の計測線については、2007年度はのちの図-7に見られるような人手による計測であったため、堰直下横断と最深部横断に限り、横断方向間隔は10mmであった。2008年度はキーエ



(a) 直角堰



(b) 直角堰+2段式護床工



(c) 直角堰+斜路式護床工

図-2 直角堰の構造

天端幅：40mm、水路底からの高さ：50mm、下流水たたき：幅40mm、堰天端から4mm下げ

ンス社製のレーザー砂面計を導入したため、堰直下の河床洗掘部について水路距離 10mm 間隔・横断方向 5mm 間隔での計測が可能になった。直線水路の場合は、砂礫堆が下流に移動して、堰との位置関係が変化するので、適当な時間間隔で停水して、写真記録と横断形計測を繰り返し行った。

堰天端（を基準とした 1/70 勾配の砂面形）と堰上下流初期砂面との関係は、次の 4 通りとした。

- (1) 堰天端と同じ高さの初期砂床：上流 0mm，下流 0mm と表記。
- (2) 堰天端より上下流とも 3mm 高い砂床：上流 +3mm，下流 +3mm と表記。
- (3) 堰の上流区間は堰天端高，下流区間は 3mm 低い砂床：上流 0mm，下流 -3mm と表記。
- (4) 堰の上流区間は堰天端高，下流区間は 6mm 低い砂床：上流 0mm，下流 -6mm と表記。

なお、直線水路において参考のため、上流 -1mm，下流 -1mm も実施した。

堰周辺の流況を把握するため、水面におがくずとパンチくずを順次散布し、流下の様子をビデオ撮影した。

4. 直線水路における主要な実験結果

4.1 砂礫堆の移動に伴う堰下流深掘れ形状変化

直線水路の場合は、砂礫堆が十分発達したあと、ほぼ同じ長さの状態を保ったまま徐々に下流に移動する。その移動に伴って、堰と砂礫堆との相対的な位置関係は変化し、堰下流の深掘れ形状も変化する。初期砂床が、上流 0mm・下流 -3mm の場合について、砂礫堆の移動に伴って位置関係が変化した場合に、堰周辺河床と下流河床横断形にどのような変化が生じるかが、図-3 によって示されている。

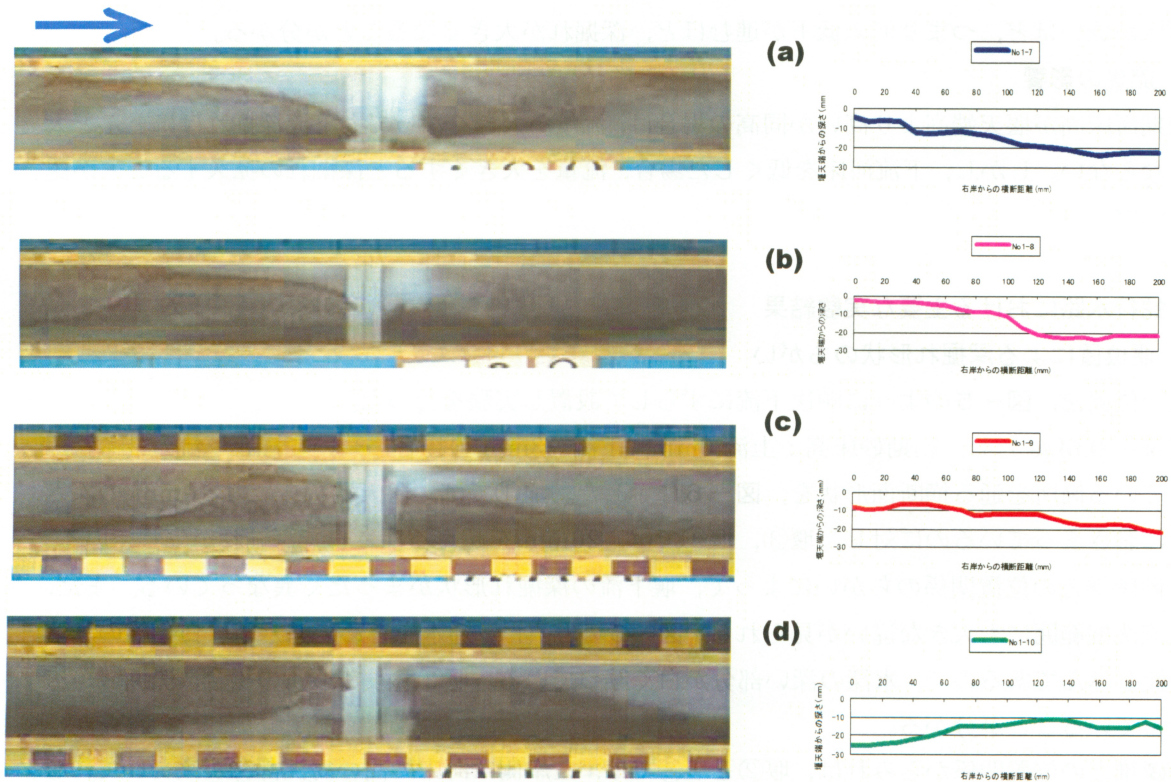


図-3 砂礫堆の移動によって位置関係が変化した場合の下流深掘れ変化

直線水路 0.6L/s, 2 分間通水の繰り返し, 上流 0mm, 下流 -6mm の場合, 横断形状は下流から見ている

(a) では、砂礫堆の先端部が堰の右岸側の下流に見える。左岸側に流れが寄ってくるため、下流側から見た横断形状でも分かるように、左岸側の河床が洗掘されている。

(b) は、高流速部分が左岸に寄り、河床も淵部にかかってくるので、範囲・深さとも最も大きな深掘れが生じている。

(c) 砂礫堆の中間部を横断するような位置に堰がある。堰付近で分断されながらも、堰の上下流で砂礫堆の形状が連続していることがよく分かる。深掘れの範囲・深さとも (b) より小さくなっている。

(d) 上流側の砂礫堆先端が、堰の左岸に接近してきた。主流部が右岸側に移ったため、すでに右岸側の河床が掘れてきている。(c) と (d) の中間くらいに洗掘が小さく平坦な河床になる位置関係があると判断できる。

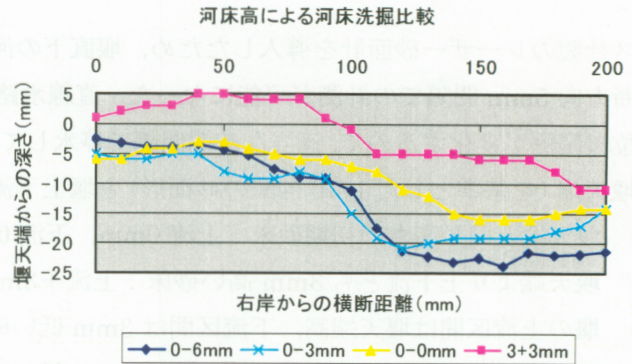


図-4 初期砂床高による堰下流深掘れのちがいの一例を、図-4に示した。堰天端より上下流とも3mm砂床高の場合、砂礫堆の河床の高い寄洲部分が堰右岸側の上下流でつながって堆砂した状態になる。左岸側は淵部になるため、その場合でも河床洗掘が生じる。

4.2 初期砂床高と深掘れ形状との関係

初期の砂均し高を変えたときの上下流深掘れのちがいの一例を、図-4に示した。堰天端より上下流とも3mm砂床高の場合、砂礫堆の河床の高い寄洲部分が堰右岸側の上下流でつながって堆砂した状態になる。左岸側は淵部になるため、その場合でも河床洗掘が生じる。

上下流0mm、下流-3mm、下流-6mmの場合は、いずれも左岸側で深掘れが生じている。初期河床が低いほど、つまり河床低下が進むほど、深掘れが大きくなることが分かる。

4.3 流量の影響

初期河床高が堰天端高より高いか同高の場合は、流量が大きくなっても下流深掘れはほとんど大きくならない。しかし、下流河床を低くした場合、流量を大きくすると深掘れの拡大することが認められた。

5. 蛇行水路における主要な実験結果

5.1 堰位置による深掘れ形状のちがいの一例

堰の位置を、図-5のように順次下流にずらして設置し実験を行った。

流量を0.6L/sとし、初期砂床高：上流0mm、下流-3mmの場合について、堰下流の最も深掘れしている箇所を通る横断面形状を、図-6に示した。堰①では、堰天端から最大10mmの深さまでにおさまっているのに対し、堰③、堰④では、20mmを超える深さまで深掘れが生じている。堰と砂礫堆との位置関係のちがいによって、堰下流の深掘れ形状がまったく異なっている。また、堰下流洗掘範囲にも大きな違いが見られる。図-5の写真は、通水をとめて減水時に白色絵の具溶液を流し込んであるので、水深の深い部分が白く写っている。堰③および堰④の場合、洗掘域が広がっていることが分かる。

砂礫堆との位置関係からみれば、堰②と堰③では、左岸側に河床の高い寄洲部分が来ていて、堰の上下流で連続した形態になっている。しかし、堰部では、中央部から左岸に向かって寄洲部が侵食された形状になっていて、堆砂域は左岸沿いの狭い範囲にとどまる。図-7に見られるように、

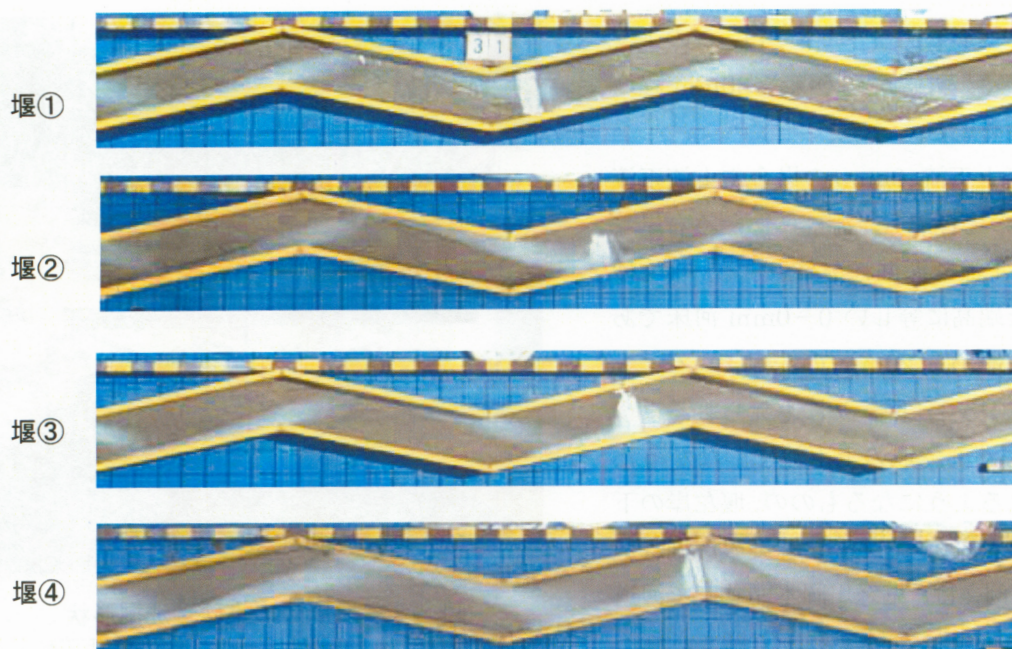


図-5 堰位置のちがいによる堰下流深掘れ状況のちがい
蛇行水路 0.6L/s, 初期砂床: 上流 0mm, 下流 -3mm

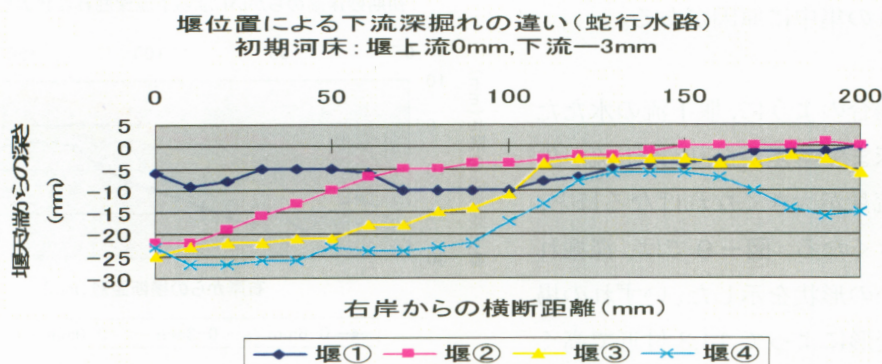


図-6 堰位置による下流深掘れのちがい

蛇行水路 0.6L/s, 初期砂床: 上流 0mm, 下流 -3mm, 堰下流最深部を通る横断形状 (下流からみる)

初期砂床高が高い場合は、堰の上下流で砂礫堆の寄洲部がほぼつながった形態になり、堰上への堆砂も広い範囲になる。堰周辺の目視観察とビデオ画像の観察から、堰の下流河床が低い場合には、堰を越える流れが速くなるだけでなく、横断方向の流れを誘発して、堆砂域を侵食していることがわかる。この流れの詳細については、今後更なる研究が必要である。

直線水路において砂礫堆が移動する場合は、時間経過とともに、位置関係が変化しており、図-3の (a), (b), (c), (d) が、この場合の堰④, ③, ②, ①の順にほぼ対応している。

5.2 初期砂床高と深掘れ形状との関係

初期砂床高を変化させて通水すると、図-8のように堰上への堆砂とともに下流深掘れ形状のちがいが現れる。上流 0mm・下流 -6mm の場合、深掘れの範囲、深さとも大きくなる。図-8では、右岸に近い部分にこんもりと高くなる箇所が見られるが、これは、図-9においても見られるように、停水後の減水時に堰下流水たたき面から落下する水の流れによって、直下の砂が少し下流に運

ばれて堆積した形である。通水中は、このような高まりはなく、天端からの深さ 30mm 程度まで洗掘されている。

初期砂床が上下流 0mm の場合や上流下流とも+3mm の場合でも、淵部にあたる右岸よりでは、堰の下流で深掘れが発生する。平均砂床高で堰の天端高に等しい 0-0mm 河床であっても、堰天端から 20mm の洗掘になる。上下流+3mm の場合、図-7 にも見られるように左岸側の寄洲部で堰の上下流につながった堆積が見られるようになるものの、堰左岸の下流側では、堰天端から 10mm 程度の深掘れが生じている。例えば、鬼怒川岡本頭首工で河道中央部から右岸側にかけて堆砂に悩まされる一方で、左岸側では下流の河床洗掘対策が必要になるのは、このような砂礫堆による横断方向形状の凹凸と流れの集中に原因がある。

5.2 流量の影響

堰③や堰④の場合のように、堰下流の水たたき面から下流砂床まで落差があり、落下流が生じてしまうと、流量が大きくなればなるほど、河床深掘れが大きくなる。図-9 では、深掘れ側の右岸側壁沿いの形状を示した。いずれの場合も、減水時の変形によって 14.3 付近で高くなる箇所はあるが、それを除いて考えると、流量の増大に伴って、深掘れが範囲・深さとも大きくなっていることが分かる。

堰下流の深掘れ部を水路距離方向で 10mm 間隔・横断方向 5mm で計測した結果から、深掘れ形状を Excel の作図機能を使って 3 次元的に表現してみると、流量 0.8L/s の場合に広く深く洗掘を生じていることがよく分かる。水たたき下流の減水時に発生する高まりもはっきりと表現されている。

6. 堰下流護床工の効果に関する実験結果

堰下流の河床洗掘による災害を防止するため、護床工や護床ブロックが設置される。その



図-7 堰周辺の堆砂・洗掘形状
蛇行水路 0.6L/s, 初期砂床：上流+3mm, 下流+3mm
(2007 年実験における横断測量の様子)

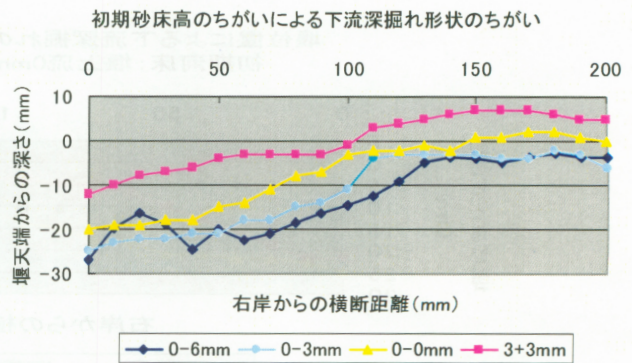


図-8 初期砂床高と深掘れ形状の関係
蛇行水路 0.6L/s, 堰③の場合の最深部横断形状

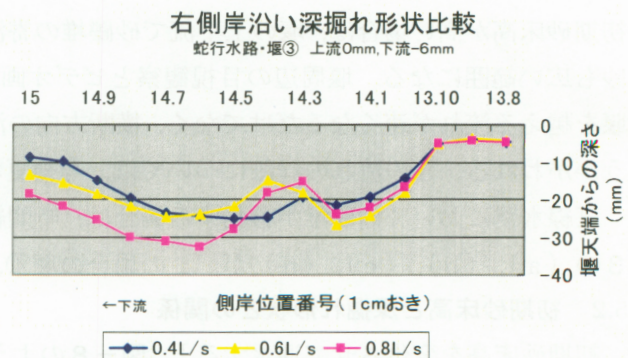


図-9 流量のちがいによる深掘れ形状のちがい
蛇行水路：0-6mm 砂床, 堰③の場合の右岸沿い縦断形状

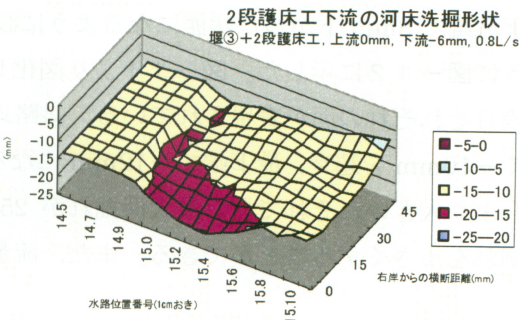
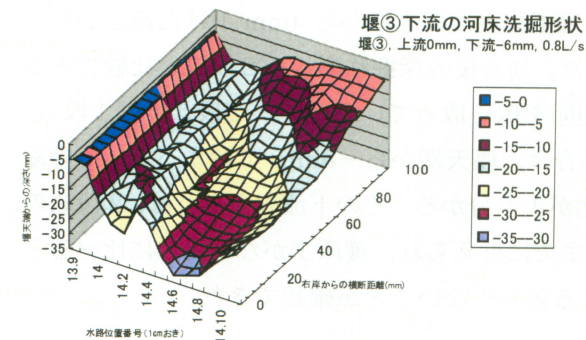
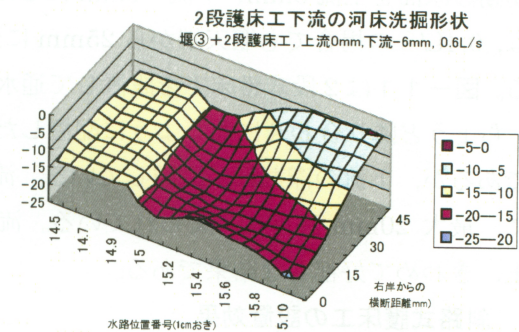
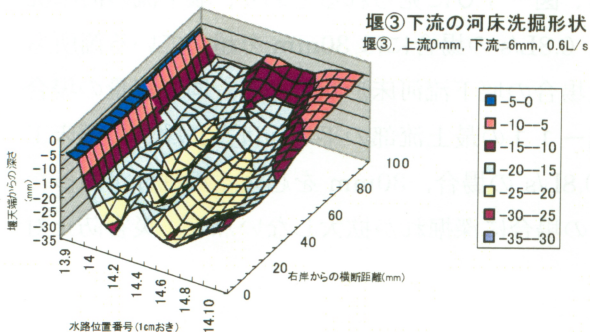
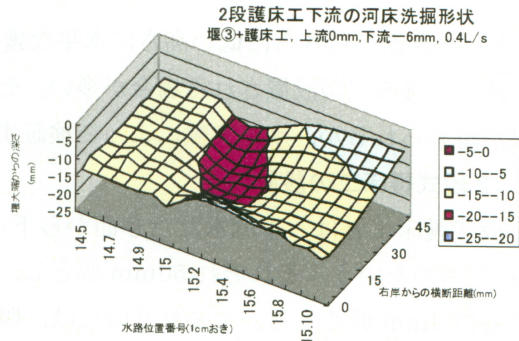
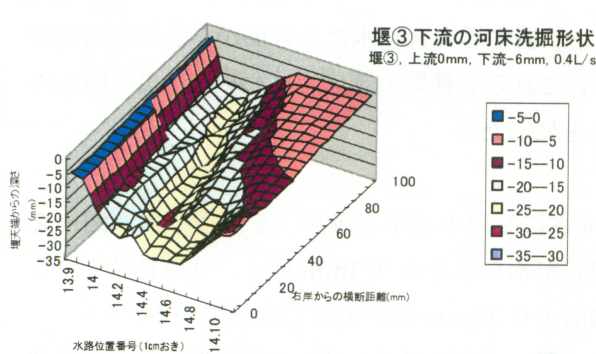


図-10 堰下流の深掘れ形状 (3通りの流量) 蛇行水路堰③の下流. 上方から0.4L/s, 0.6L/s, 0.8L/sの通水. 0-6mm砂床. Excelによる3次元表現.

図-11 2段式護床工の効果 (3通りの流量) 蛇行水路堰③の下流. 上方から0.4L/s, 0.6L/s, 0.8L/sの通水. 0-6mm砂床. Excelによる3次元表現.

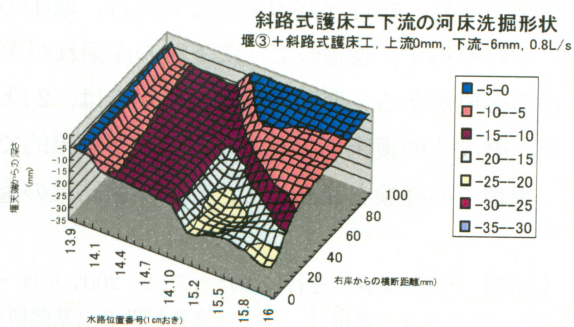
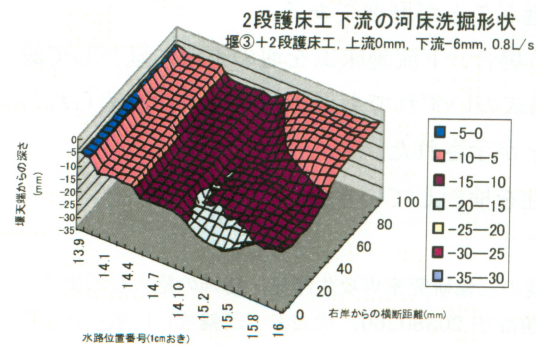


図-12 2段式・斜路式護床工の効果比較 蛇行水路堰③の下流深掘れ部. 0.8L/sの通水. 0-6mm砂床. Excelによる3次元表現.

際、水たたき面からさらに低い高さに水平な護床工を設置する場合と水たたき面から急傾斜面を持つ斜路式の護床工が設置される場合が多い。そこで、これら2種類の護床工について、災害防止の効果が認められるか、水路実験によって検証することにした。

6.1 2段式護床工の設置効果

2段式護床工とは、下流水たたき面から下げた高さに2段の水平な護床工を配置した(図-2(b))ものをいう。それぞれ50mm幅とし、1段目が水たたきより4mm低く、2段目はそれよりさらに4mm低くした。つまり2段目は、堰天端高より12mm低い高さになっている。

初期砂床面を上流0mm、下流-6mmにした場合、図-10に見られるとおり、堰下流の河床洗掘は、0.4L/sの場合でも堰天端から25mmに達し、0.8L/sの場合には30mmを超えている箇所もある。図-11は2段式護床工を設置して通水した場合の堰下流河床形状である。同じ流量の場合に、ちょうど隣り合わせになるように配置した。図-11の最上流部の平坦面は、2段目の護床工面であるが、下流の深掘れが激減している。流量0.8L/sの場合、30mmを超える深掘れがあったのに、最大20mm程度に抑えられている。流量大の場合に深掘れが拡大しない点で、災害防止対策上、きわめて好都合な結果である。

6.2 斜路式護床工の設置効果

斜路式護床工は、図-2(c)にみられるように、堰下流水たたき面から4mm下げた高さから、最下流端で8mm下がった状態になるように設置した。通水後の深掘れ形状を2段式と比較できるように図-12に示した。図-11より図化した範囲を広く取っているため、2段式では1段目、2段目それぞれの面が表現されている。斜路式の場合は、堰天端から-8mmで始まって、その途中で-10mmを超え、最下端で-12mmになる状態がよく分かる。その下流の深掘れは、2段式の場合より大きい。それでも、最大深掘れが25mmまでに抑えられ、護床工がない場合に比べると深掘れを小さくすることができる。また、流量による差も少ないことが確認できた。

7. 実験結果のまとめと提言

直線水路、蛇行水路の双方において、堰下流の河床洗掘形状に対して、砂礫堆と堰との位置関係が大きな影響を与えることがわかる。いずれの水路でも、砂礫堆の先端付近を横断する位置に堰を設置した場合に、堰下流の深掘れが小さくなることが分かる。つまり、堰の位置の選定がきわめて重要であり、蛇行水路の場合で言えば、堰①の位置を選ぶことが肝要である。

やむを得ず、堰③のように下流の深掘れが大きくなる場合、下流護床工を堰の下流に延長して設ける必要がある。今回の実験結果からは、2段式と斜路式のいずれでも災害防止効果は認められたが、階段式の護床工を設置したほうが効果的であることが示された。

現地での経験を調査して、この実験結果の適用可能性を検討していきたい。

【謝辞】 今回の実験の遂行に当たっては、2007年度・2008年度の三輪研究室専攻生諸兄・諸姉の絶大なる協力を得た。研究遂行の費用は、科学研究費補助金(基盤研究C 課題番号20580260、代表者:三輪式)に依った。記して謝意を表します。

【参考文献】 木下良作・三輪式(1974):砂レキ堆の位置が安定化する流路形状,新砂防94,pp.12-17

三輪式(1991):現河床より低い敷高の頭首工における堆砂の予防対策,農土論集34,pp.93-100

H. MIWA and E. KURASHIMA(2003): Present situation and cause analysis of diversion dam failures in Japan, Paddy and Water Environment 1-4, pp.207-214

Two step Lax-Wendroff 法を基礎とした数値シミュレーションモデルにおける 効率的な内部境界条件の計算方法に関する考察

久保 成隆, Unggoon Wongtragoon, 浦谷 修司
東京農工大学 農学府

I はじめに

数値シミュレーションモデルによる灌漑システム内での水理解析の特徴は、実際には数ヶ月にわたる現象を短時間で再現し、必要とされる地点での時系列データを容易に得られることである。このため、様々な条件の下で起こり得る結果を知り、当該灌漑システムの特徴を把握して、その最も望ましい管理操作方法を提示することができる。しかし、それは数値モデルが、現実の灌漑システムをうまくモデル化できているかどうかによる。うまくモデル化すると、単に実物を忠実にモデル化するという意味ではない。精度よく灌漑システム内で生起する現象を再現し、かつ、可能な限り単純化されているという意味である。その様な数値解析モデルを開発するための software は、実は、今日まで多数開発され商業ベースで普及している。MIKE 11はその最も成功している software の一つである。MIKE 11は陰差分を用いて水流計算を行っているので演算時間が短いという長所を持つが、水路が空になった場合には、それに対処するのが難しいという短所を持つ。また、灌漑システム内には多様な水理構造物も設置されているが、それら全ての水理構造物をモデル化できるわけではない。MIKE11のような市販の software を用いて、灌漑システムをモデル化する場合、或る一定のレベルまでは比較的容易にできるが、それを越えた Optional なモデル化は極端に難しくなる。そこで、灌漑システムのモデル化に、独自に開発を進めてきた陽差分の 2 step Lax-Wendroff 法をベースとする差分モデルを活用する。この差分モデルを活用する場合の最大の長所は、演算の内部構造が完全に把握できていることである。このため、固有な水利構造物を必要に応じてモデル化して灌漑システムに埋め込むことが可能である。また、ローテーション灌漑時などには水路が空になるが、陽差分であるため、その処理は容易である。一方、陽差分であるため演算時間が長くかかるという欠点を持つが、コンピュータの能力向上により、大きな欠点ではなくなっている。

II 2 step Lax-Wendroff 法での境界条件の処理

Figure 1 に、3 個の節点から構成される水路 segment と、2 step Lax-Wendroff 法による差分演算の過程を示す。水路 segment が多数の節点から構成される場合でも本質的に相違はない。水路 segment において、節点 1 は左側境界、節点 3 は右側境界である。格子点 A(1,0), B(2,0), C(3,0) は、時刻 $t=t_0$ における 3 節点の時空を、格子点 D(1.5,0.5) と E(2.5,0.5) は、 $t=t_0+0.5 \Delta t$ における中間点の時空を、F(1,1), G(2,1), H(3,1) は $t=t_0+\Delta t$ における 3 節点の時空を表す。それぞれの格子点で、(流積、流量) などの 2 水理量を順次計算することで、流れのシミュレ-

ンが実行される。1st stepでは、連続式と運動方程式を用いて、格子点AとBでの水理量から格子点Dでの水理量を、また、格子点BとCでの水理量から格子点Eでの水理量が計算される。2nd stepでは、格子点Bと中間の格子点DとEでの水理量を用いて、

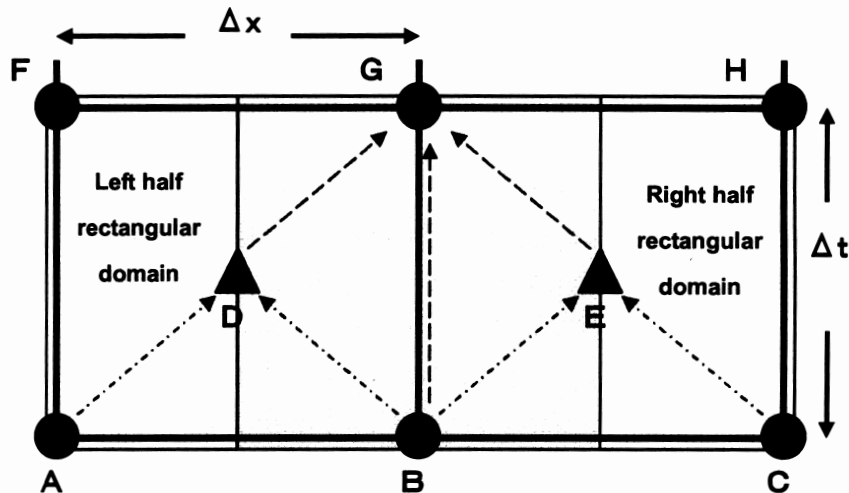


Fig. 1 Calculation procedure for the 2 step Lax-Wendroff Scheme

格子点 G での水理量が計算される。このとき、格子点 D, B, E, G を各辺の midpoint とする長方形領域で、保存型で表示された支配方程式を適切に離散化すれば、即ち、長方形領域の左辺と右辺から流入する各 flux を格子点 D と E での水理量で、長方形領域の下辺と上辺における各 level を格子点 B と G の水理量で代表すれば、保存性を完全に満足させることが可能である。この状況は節点数が増えても、隣り合う 2 つの長方形領域の境界で流入 flux と流出 flux が相殺するので保存性は同様に満足される。水路 segment 全域において保存性を満足させるためには、中央部の長方形領域に加えて、左側半長方形領域 (A, D, F) と右側半長方形領域 (C, H, E) でも保存性を満足するように、支配方程式を離散化する必要がある。各境界点での未知水理量はそれぞれ 2 個あるが、各半長方形領域では連続式と運動方程式の他に格子点 F に境界条件が課される。しかし、これでは条件過多になるので、体積の保存を優先させ、境界条件と連続式の 2 式が支配方程式として用いられる。即ち、水路 segment において、保存性を保ちつつ境界での水理量を求めるためには (体積の保存は segment 全域で、運動量の保存は境界近傍を除く全域で)、半長方形領域において境界条件と連続式を連立させて解けばよいということになる。

左側半長方形領域 (A, D, F) における連続式は、各格子点での水理量に格子点符号を付して、以下の式で表される。

$$\Delta x(A_F - A_A) = \Delta t(Q_F + Q_A - 2Q_D) \quad (1)$$

ここで、A : 流積、Q : 流量

境界条件は、対応する水理構造物と、それが対象領域内の末端に位置するか内部に位置するかによって異なる。末端に位置すれば外部境界であり内部に位置すれば内部境界である。

外部境界の場合、仮に、節点1が外部境界であれば、外部境界条件は、一般的に以下の式で表される。

$$F(A_F, Q_F) = 0 \quad (2)$$

外部境界条件は(1)式と(2)式の2式で表され、未知数は A_F と Q_F の2つであるので、2式を連立させて解くことで A_F と Q_F の値が求められる。特別な場合として、(2)式中の2変数のうち1変数が時系列で指定されている場合がある。その時には、既知の値を(1)式に代入することで、直ちに他方の未知数を求めることができる。しかし、一般的には、Newton-Raphson法などによる収束計算が必要である。その際、2変数のままで解くこともできるが、(1)式の関係性を(2)式に代入し、変数の数を減らして解くのが普通である。

内部境界の場合も、基本的には外部境界条件の場合と同様の解法を用いて解くことができるが、内部境界条件の場合には未知数の数が多く、また、それに対応して関係式の数も多い。多数の変数を含む連立多項式をNewton-Raphson法を用いて解く場合、予め変数の数を減らして収束計算を行う場合と、変数の数を減らさずに収束計算を行う場合が考えられる。前者の場合は変数の数は少なくなるが、関係式は複雑になる。一方、後者の場合は変数の数は多いままであるが、それぞれの関係式は比較的単純である。一般的に、変数の数を減らせば収束に要する演算時間は短くなる。しかし、関係式が複雑になるばかりか、変数を減らすこと自体が困難な場合もある。また、Newton-Raphson法を用いて連立の非線形方程式を解く場合、真の値=仮値+修正値として、仮値の周囲で修正値に関する連立線形方程式を立式し、これを解いて仮の値を更新して真の値に近づけると言う過程を踏む。これは陰差分の解法も用いられる方法であるが、内部境界条件の種類に応じて線形方程式を求める必要がある。また、水深には非負の条件が付加されるので、その過程は一層複雑になる。内部境界条件は、灌漑システム内で水利制御に用いられる水理構造物に対応するものであるから、高い精度で、しかも、短い演算時間で計算されることが望ましい。

III 効率的な境界条件の計算方法の開発

以上で見たように、複雑な式形の関係式で構成される内部境界条件を、Newton-Raphson法を通常の解法で解く場合、演算時間が長く、計算アルゴリズムが複雑になるという問題点がある。そこで、関係式の式形を複雑にせず、また、変数の数を最小限に抑え、複雑な線形化方程式を求める過程を簡略化できる計算アルゴリズムの開発が必要となる。

本研究では、以上の問題点を解決するため、Newton-Raphson法の考えを取り入れつつ、数値計算に適した連立非線形代数方程式の解法を開発した。以下に、具体例を示しながら、その解法を紹介する。

Figure 2 (A)は、幹線水路から支線水路が分岐し、分岐直後にsluice gateが設置されている様子を、また**(B)**には、それらを構成する3つのsegment (segment I : 上流側幹線水路、segment II : 支線水路、segment III : 下流側幹線水路) と、各segmentの境界に位置する3つの格子点を示している。この内部境界には、未知数が6個存在する。即ち、3つの節

点における流積と流量である。この内部境界における関係式は、節点1、2、3を含む3個の半長方形領域で成立する(1)式と同様な形の3個の連続式（連続式I、連続式II、連続式III）と、節点1、2、3での流量の連続条件（節点1の流量が節点2と3の流量の和に

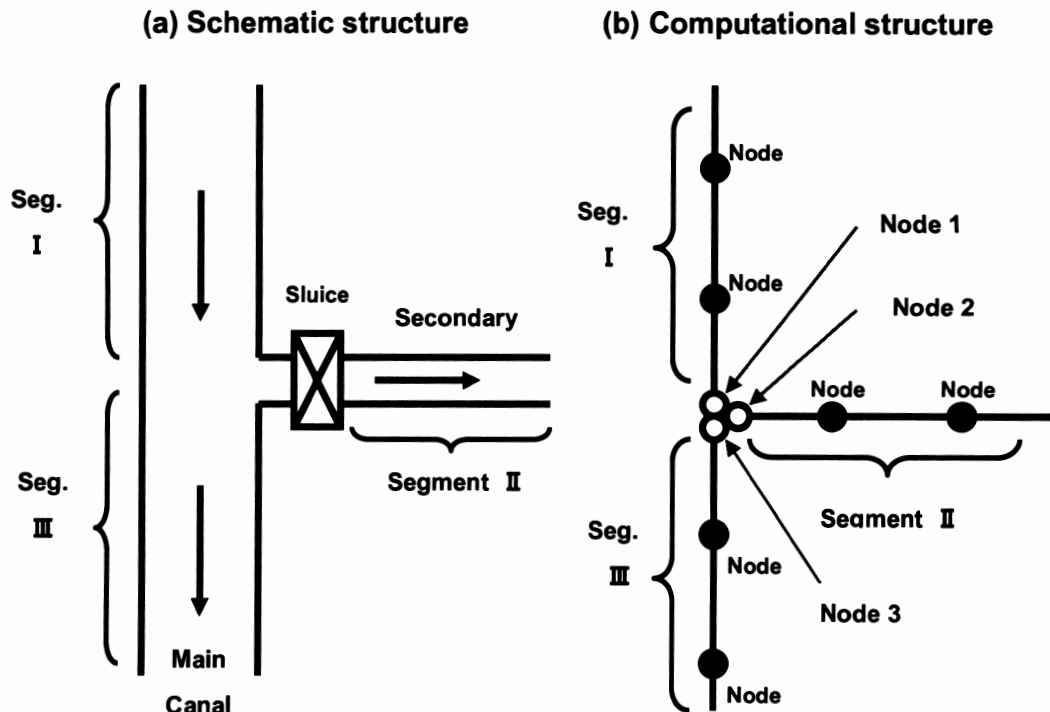


Fig.2 Interior boundary of diversion point without Check gate

等しいという連続式J）と、節点1と節点3での水位が等しいという条件（エネルギー式J）と、節点2の流量が節点1と節点2の水位差から決定されるという条件（分水量式J）の計6個である。水深や水位から流積を求める式や、逆に、流積から水深や水位を求める式は、これらには含まれていない。もし、Newton-Raphson 法を通常形で適用するなら、6個の未知数からなる連立方程式を、或いは、連続式I、II、III、Jの式を用いて4変数を消去して2変数の連立方程式に変更した後に、収束計算を行って解くことになる。

ここで提案する解法では、節点1における流量のみ変数とする。節点1での流量を仮定して、6個の関係式から、最初に仮定した流量を含め6個の未知数を求める。その際、最初に仮定した節点1での流量と、その結果として求められる節点1での流量が等しくなるという保障はない。そこで、両者の差を評価算数として、その評価関数の値がゼロとなるように、節点1での流量をNewton-Raphson 法的に、収束計算を行うという解法を考案することができる。以下に、その計算の過程を示す。

- ① 節点1での流量を仮定する。この仮定した流量を Q_a で表す。
- ② 連続条件I（節点1での流量）から、節点1での流積を求め、水位も求める。

- ③ エネルギー式 J (節点 1 での水位) から、節点 3 での水位を求め、流積も求める。
- ④ 連続条件 III (節点 3 での流積) から、節点 3 における流量を求める。
- ⑤ 連続条件 J (節点 1 と節点 3 での流量) から、節点 2 における流量を求める。
- ⑥ 連続条件 II (節点 2 での流量) から、節点 2 における流積を求め、水位も求める。
- ⑦ 分水量式 J (節点 1 と節点 2 での水位) から、節点 2 における新流量を求める。
- ⑧ 連続条件 J (節点 2 での新流量と節点 3 での流量) から節点 1 での新流量 Q_r を求める。
- ⑨ 仮定流量 Q_a と新流量 Q_r の差を評価関数として、 $F(Q_a)$ とする。
- ⑩ 節点 1 での流量を $Q_a + \Delta Q$ として、②～⑨の処理を行い、 $F(Q_a + \Delta Q)$ を求める。 ΔQ としては、0.001 の値を用いる。
- ⑪ $F(Q_a + \Delta Q) - F(Q_a)$ を ΔQ で除して、それを $DF(Q_a)$ とする。即ち、 Q_a を変数とする評価関数の導関数とみなすのである。
- ⑫ 仮定した Q_a を、 $Q_a - F(Q_a)/DF(Q_a)$ によって更新する。
- ⑬ 節点 1 での流量を更新した流量で仮定し直し、②～⑫の処理を行う。
- ⑭ 以上の過程を 3 回繰り返し、収束計算を終了する。
- ⑮ 最後に、内部境界において完全に連続条件 J が成立するように、節点 1 と節点 2 での新流量から節点 3 での新流量を求め直す。

以上は、分岐水路での内部境界条件から水量を計算する計算アルゴリズムである。これの特長は、収束計算に関係する変数が少ない点、非線形方程式から線形方程式を作る必要がない点、対応する水理構造物の流量公式をそのままの形で利用できる点にある。この例では、節点 1 と節点 2 の間に *sluice gate* が置かれているが、この *sluice gate* を堰などに変更する場合にも、*sluice gate* の流量公式の部分の堰の越流公式に置き換えるだけでよい。

Figure 2 の例の場合以外にも、様々な種類の水理構造物を表す内部境界条件を 1 変数からなる評価関数を用いて解くことができる。一方、**Figure 3** は、**Figure 2** の条件に加えて、分岐地点での水位維持のために、幹線水路に *check gate* が存在する場合を示している。しかし、この場合には、節点 1 での流量を仮定しても、2 個の水理構造物が並列して存在するため、節点 1 での新流量を求めることができない。そこで、このような場合には、2 変数からなる評価関数を用いる必要がある。以下では、**Figure 3** の場合における評価関数の作成方法とそれの解法を紹介する。内部境界条件は、先の場合と同様な 4 つの連続条件 I、II、III、J と節点 1 と節点 2 の間の *sluice gate* を通過する分水量式 J と、節点 1 と節点 3 の間の越流堰を通過する通過量式 J の 6 個である。

- ① 節点 1 と節点 2 における流量を仮定する。それらを、 Q_{a1} と Q_{a2} で表す。
- ② 連続条件 J (節点 1 と節点 2 での流量) から節点 3 の流量を求める。
- ③ 連続条件 I (節点 1 での流量) から、節点 1 での流積を求め、水位も求める。
- ④ 連続条件 II (節点 2 での流量) から、節点 2 での流積を求め、水位も求める。
- ⑤ 連続条件 III (節点 3 での流量) から、節点 3 での流積を求め、水位も求める。
- ⑥ 分水量式 (節点 1 と節点 2 での水位) から、節点 2 での新流量 Q_{r2} を求める。

- ⑦ 分水量式（節点1と節点3での水位）から、節点3での新流量を求める。
- ⑧ 連続式J（節点2での新流量と節点3での新流量）から節点1での新流量 Q_{r1} を求める。
- ⑨ 仮定流量 Q_{a1} と新流量 Q_{r1} との差を評価関数 $F1(Q_{a1}, Q_{a2})$ 、仮定流量 Q_{a2} と新流量 Q_{r2} との差を評価関数 $F2(Q_{a1}, Q_{a2})$ とする。
- ⑩ 節点1での流量を $Q_{a1} + \Delta Q$ 、節点2での流量を Q_{a2} として、②～⑨の処理を行い、 $F1(Q_{a1} + \Delta Q, Q_{a2})$ と $F2(Q_{a1} + \Delta Q, Q_{a2})$ を求める。
- ⑪ 節点1での流量を Q_{a1} 、節点2での流量を $Q_{a2} + \Delta Q$ として、②～⑨の処理を行い、 $F1(Q_{a1}, Q_{a2} + \Delta Q)$ と $F2(Q_{a1}, Q_{a2} + \Delta Q)$ を求める。
- ⑫ $F1(Q_{a1} + \Delta Q, Q_{a2}) - F1(Q_{a1}, Q_{a2})$ を ΔQ で除して、それを $DF11(Q_{a1}, Q_{a2})$ とする。
- ⑬ $F2(Q_{a1} + \Delta Q, Q_{a2}) - F2(Q_{a1}, Q_{a2})$ を ΔQ で除して、それを $DF21(Q_{a1}, Q_{a2})$ とする。
- ⑭ $F1(Q_{a1}, Q_{a2} + \Delta Q) - F1(Q_{a1}, Q_{a2})$ を ΔQ で除して、それを $DF12(Q_{a1}, Q_{a2})$ とする。
- ⑮ $F2(Q_{a1}, Q_{a2} + \Delta Q) - F2(Q_{a1}, Q_{a2})$ を ΔQ で除して、それを $DF22(Q_{a1}, Q_{a2})$ とする。
- ⑯ Q_{a1} を $Q_{a1} - (F1 \times DF22 - F2 \times DF12) / (DF11 \times DF22 - DF12 \times DF21)$ で更新する。
- ⑰ Q_{a2} を $Q_{a2} - (F2 \times DF11 - F1 \times DF21) / (DF22 \times DF11 - DF21 \times DF12)$ で更新する。
- ⑱ 節点1と節点2の流量を更新した流量で仮定し直し、②～⑰処理を行う。
- ⑲ 以上の過程を3回繰り返し、収束計算を終了する。
- ⑳ 最後に、内部境界において完全に連続条件Jが成立するように、節点1と節点2での新流量から節点3での新流量を求め直す。

以上が、2変数を仮定して内部境界条件を満足する水理量を求めるアルゴリズムである。

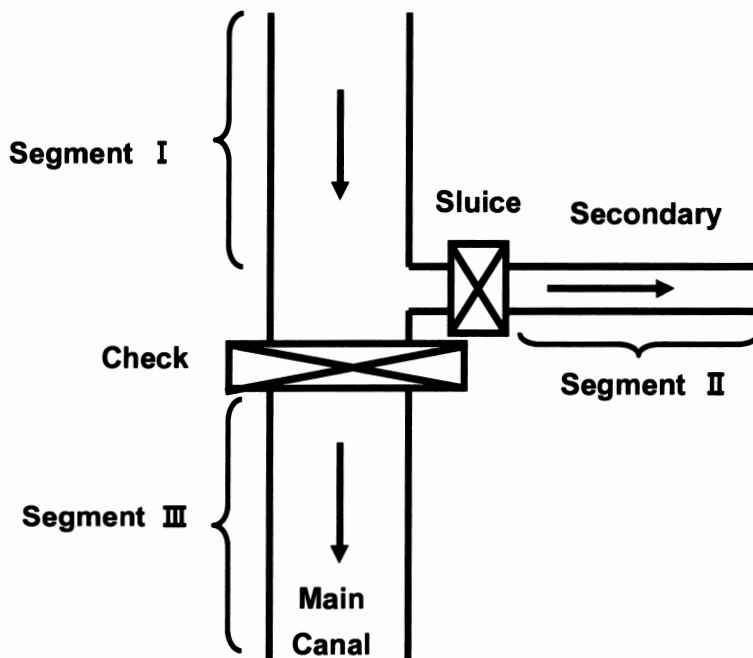


Fig.3 Interior boundary of diversion point with check gate

IV モデル化が終了した境界条件

Table 1 に、これまでモデル化を終えた境界条件を示す。2 列目の境界番号は境界の識別番

Table 1 Boundary conditions and their properties

境界（水理構造物の設置状況）	境界番号	境界条件の種類	関係する segment の数	収束計算に用いる変数
流量（時系列で与えられる）	111	外部	1	0
水位 or 水深（時系列で与えられる）	112	外部	1	0
四角堰（水路末端に設置）	120	外部	1	1
2 本の水路の単純接続	200	内部	2	1
3 本の水路の単純接続（T 字型に接続）	300	内部	3	1
4 本の水路の単純接続（十字型に交差）	400	内部	4	1
水門（水路を横断して設置）	210	内部	2	1
サイフォン	220	内部	2	1
余水吐+サイフォン（直列に配置）	221	内部	2	1
直接分水（分水量は時系列で与える）	240	内部	2	1
余水吐	241	内部	2	1
刃型堰（水路を横断して設置）	250	内部	2	1
刃型堰+水門（並列に配置）	251	内部	2	1
フラップゲート（順流方向のみ流れる）	261	内部	2	1
フラップゲート（逆流方向のみ流れる）	262	内部	2	1
T 字型分岐（分岐部に水門）（順逆流共）	310	内部	3	1
T 字型分岐（分岐部に水門）（順流のみ）	311	内部	3	1
T 字型分岐（分岐部に刃型堰）（順逆流共）	350	内部	3	1
余水吐+刃型堰+サイフォン（直列に配置）	270	内部	2	1
余水吐+（刃型堰+水門（並列））+サイフォン（直列）	271	内部	2	1
刃型堰+サイフォン（直列に配置）	275	内部	2	1
（刃型堰+水門（並列））+サイフォン（直列に配置）	276	内部	2	1
T 字型分岐（分岐部と下流部に刃型堰）	360	内部	3	2
T 字型分岐（分岐部に水門、下流部に刃型堰）	370	内部	3	2
T 字型分岐（分岐部に水門、下流部に刃型堰と水門が並列）	371	内部	3	2
T 字型分岐（分岐部と下流部に水門）	380	内部	3	2

号で本質的な意味はない。3列目は外部境界条件と内部境界条件を区分する。4列目は境界部において関係する水路 segment 数。5列目は境界条件を満足する水量を収束計算で求める場合に必要変数の数で、0は収束計算が必要ないことを意味する。

境界番号 271 で示す水理構造物は、1変数を仮定するだけで収束計算が可能な内部境界の一例である。余水吐とチェックゲートとサイフォンが直列に配置され、check gate には刃型堰と水門が並列に配置されている。かなり複雑水理な構造物であるが、ここで示した解法を用いると、変数を1個だけ仮定することで、容易に収束計算を実行できる。

V 数値シミュレーション結果

Figure 4 と **5** に、シミュレーション結果の一例を示す。対象地区はタイ国のチェンライ市南西部に展開する Mae Lao 灌漑システムである。幹線水路は全長約 50 km で、途中、22本の支線水路が分岐している。**Figure 4** には、幹線水路沿いの水理構造物と1時間毎の水面形を示している。図中の CK は幹線水路中に設置されたチェックゲートで、合計 18基設置されている。また、1L や 2L などは幹線から分岐する 22本の支線水路で、1L は左岸から分岐する1番目の支線水路を意味する。下向き矢印（無記号）は余水吐を意味し、合計 12基設置されている。また、余水吐直下の8箇所にはサイフォンが設置されている。

Figure 5 は、全長約 16km の支線水路 4L 沿いの水理構造物と水面形を示している。図中の CK はチェックゲート、4R-4L は支線水路である。4R-4L とは、支線水路 4L の右岸側に分岐する4番目の支線水路であることを示している。支線水路や支線水路には多数の FTO (Farm Turn Out) が設置されていて、FTO を通して水田圃場に用水が分水される。本シミュレーションでは、FTO と小規模支線水路への分水は、幹線、支線水路からの横流出として扱っている。また、分水された水は水田圃場において消費されるが、水田圃場での水の消費構造は 169 基の水田タンクモデルによってシミュレーションしている。なお、ここでは本報告とは直接関係ないので詳細は省く。

Figure 4 と **5** において、空の水路に上流端から灌漑水が供給され、途中で分水しながら、そのフロント部が下流に流下していく様子を見ることができる。水面形は1時間毎で、計 30 時間の追跡である。支線水路 19L から 20L 地点では、フロントの前進速度が弱まっているが、これは上流端からの供給量のほとんどが上流側で分水されて、残量が僅かになったためである。

VI 結論と今後の展望

1日の流水のシミュレーションに要する演算時間は、水田タンクモデルの計算を含め、パソコンレベルで約2分であった。このことは灌漑期間を140日とすれば、全灌漑期間を通してのシミュレーションに約4時間半が必要なことを意味する。この演算時間は決して短くないが、格子間隔 Δx を約 100m の陽差分であることを考えれば、実用に耐えるものと考えられる。この報告で紹介した境界条件の解法が、短時間で精度良く計算することに寄与したものと思われる。

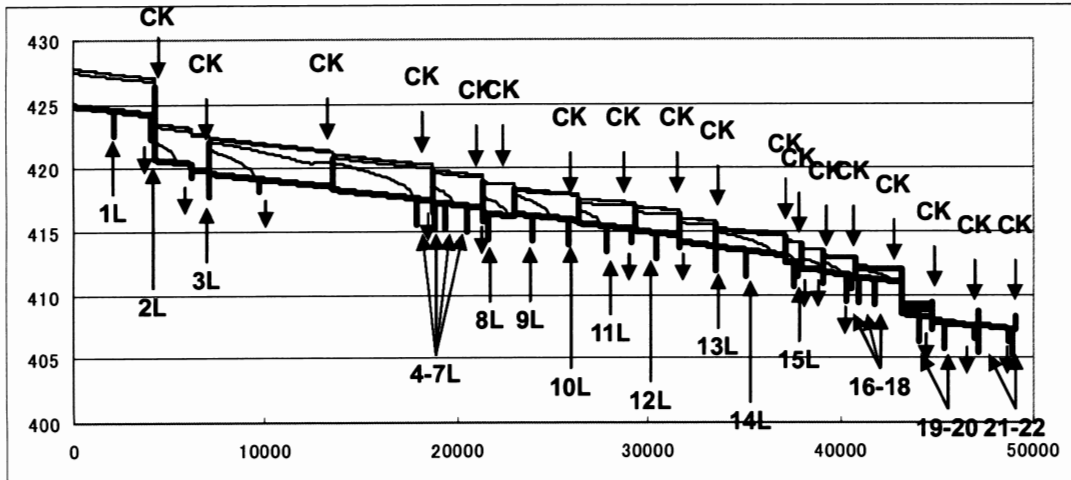


Fig.4 Hourly water surface profiles along main canal (Mae Lao, Thailand)

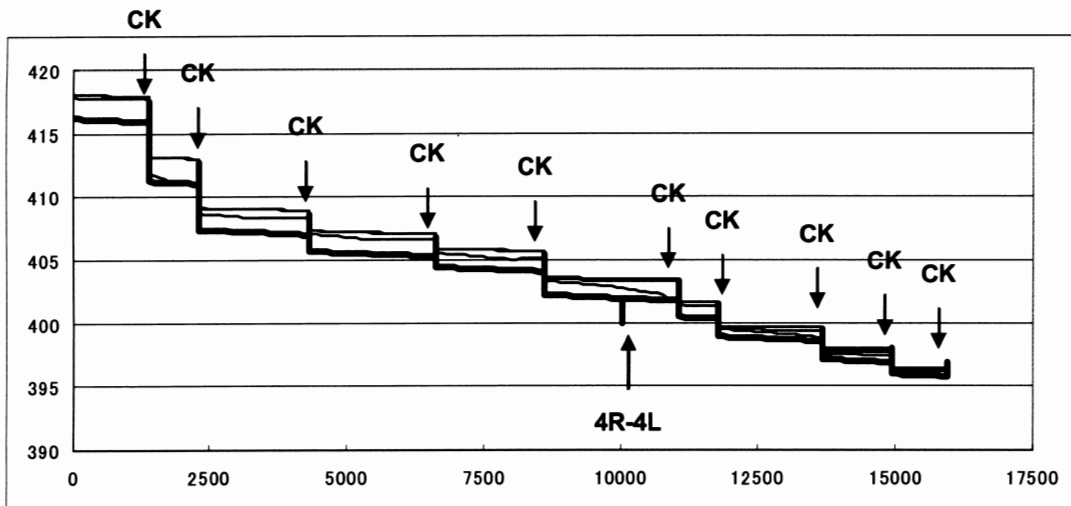


Fig.5 Hourly water surface profiles along 4L secondary canal

ここでの境界条件、特に、内部境界条件の計算では、複数の水理構造物が直列に設置されている場合は、簡単のため、それらの構造物が1点において存在していると仮定して関係式を立式した。実際には各々が多少の間隔をおいて設置されており、そのことは構造物間での貯留やエネルギー損失を無視していることになる。これらの貯留や損失などをも考慮した内部境界条件を立式化し、それらを効率的に解く解法を開発するのが次の課題である。

非定常流シミュレーションは、比較的時間のスケールが短い水理現象を解くための道具であったが、今日、全灌漑期間を通して流れを追跡できる道具へと進化した。この道具を活用すれば、灌漑施設の O&M に適用して水利用効率を高める操作ルールを考案したり、また違法な水理操作 (Mae Lao システムでは夜間によく行われる) が水利システムに及ぼす影響や、その防止策を考えたりする上で有効な道具になると思われる。

河川における自然誘導式スタミナトンネルを用いた高速流 条件での野生魚の突進速度

Burst speed of Wild Fishes in High Velocity Flow with a Guidance Type Stamina Tunnel Using River Water

泉 完* 山本泰之** 矢田谷健一*** 神山公平****

*弘前大学 農学生命科学部, 〒036-8561 弘前市文京町3

** (株) 日さく, 〒330-0854 さいたま市大宮区桜木町4-199-3

*** (株) 建設技術研究所東北支社, 〒980-0014 仙台市青葉区本町2-15-1

**** (株) 建設技術研究所東京本社, 〒330-0071 さいたま市浦和区上木崎1-14-6

1. はじめに

頭首工や取水堰などの河川横断工作物に設置される魚道の水理設計では、対象魚種の突進速度 (Burst speed) を設計流速の代表値としている (例えば、「頭首工の魚道」設計指針, 2002)。淡水魚の突進速度に関する研究は、Blaxter et al (1959, 1967) や Bainbridge (1960) の Dace (*Leuciscus leuciscus*) と Goldfish (*Carassius auratus*)、塚本ら (1973, 1975)、Beamish (1978)、Videler (1993) などによって行われている。とくに、Blaxter (1967) は突進速度 (Burst speed) を 1~5 秒間持続できる最大遊泳速度と定義し、その速度は体長の 10 倍程度であるとしている。一方、現地の隔壁部を有する魚道で最大流速が生じる隔壁部を体長の小さい遊泳魚ほど目安の 10 倍よりかなり大きな遊泳速度で瞬間的に遊泳していくことが観測されている (泉ら, 2002, 2004)。これらのことから、著者らは現地河川の魚道中にスタミナトンネル (内径 10cm, 長さ 4.0m の円筒パイプ) を設置し、水中トンネル内の流れの中を野生のウグイ (*Tribolodon hakonensis*) とオイカワ (*Zacco platypus*) を 1 尾ずつ挿入して強制的に泳がせた遊泳実験 (以後、挿入式遊泳実験と称す) と、野生の淡水魚を自然に誘導させより人為的影響を与えないで遊泳特性を明らかにできるような誘導式実験装置を考案した実験 (以後、自然誘導式遊泳実験と称す) をそれぞれ実施してきた (泉ら, 2006a; 2007a; 2007b)。さらに著者らは、流速が $200\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\sim 222\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の速い条件での野生ウグイの挿入式遊泳実験 (泉ら, 2008) から、平均体長 14.9cm のウグイの平均突進速度が $265\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ であることなど、淡水魚の突進速度について数々の新たな知見を得てきた。また、最近では鬼東ら (2008) が実験室内における長方形断面の開水路流れでのオイカワ (*Zacco platypus*) の突進速度に関する実験を行うなど、魚種別の突進速度が実験的に解明されつつある。

しかしながら、挿入式遊泳実験に比べてより人為的影響を排除できる既往の自然誘導式遊泳実験 (2007b) では、流速条件が $141\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\sim 198\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ であり $200\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上のかなり速い流速条件での突進速度が明確でないことや、挿入式遊泳実験との実験手法の違いによる遊泳速度の比較検討など解明すべき点が依然残されている。

そこで、本報告は既往の自然誘導式遊泳実験の突進速度に関する研究をさらに展開させるため、現地魚道内で $200\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ を越える高速流条件で自然誘導式遊泳実験を実施し、淡水魚の遊泳特性や突進速度および実験手法の違いによる遊泳速度の比較について考察を加えたものである。また、一連の遊泳実験から魚道設計への突進速度指標値についても検討した。

2. 実験装置および実験方法・項目

遊泳速度の計測方法は、現地魚道内を流下する自然河川水をそのままスタミナトンネルに通水させ、円筒管内に流速を与えた一定距離の遊泳時間を計測するフィールド的観測方法を採用した。

遊泳実験した魚道は、青森県一級河川の岩木川に設置されている岩木川取水堰の全面越流型階段式魚道である。実験は 2006 年と 2007 年のこの魚道における魚類の遡上数が多い時期 (泉ら, 2006b) にあたる 5 月から 7 月にかけて合計 13 回、昼から午後にかけて行った (Table 1)。実験装置は Fig. 1 に示すように魚道末端部に内径 10cm, 長さ 4m の透明塩化ビニール製の円筒パイプと円筒末端部 (円筒入口部) に魚を誘導するための敷き網が取付けられ、円筒入口部にはパイプ内を遊泳し、流れに負けて流されてきた魚を捕捉するための返し網が付いている。入口部には入口と返し口に仕切られた漸縮部を設けている。この漸縮部は Fig. 2 に示すように 2006 年と 2007 年の実験で異なる形式であり、それぞれ実験 I・実験 II と称す。実

Table 1 実験日と実験条件
Experimental days and experimental conditions

実験月日	実験番号	天気	円筒パイプの勾配	管内代表	水温	Do	pH	SS
				流速 $V_{0.25}$ S.D.				
				($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	($^{\circ}\text{C}$)	(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
2006年	実験 I							
6月6日	No.1	晴れのち曇り	1/18	211*	14.1	9.6	7.4	13
7月11日	No.2	晴れのち曇り	1/21	218	19.0	8.4	7.5	13
7月13日	No.3	曇り	1/19	230	19.1	8.4	7.4	7
2007年	実験 II							
5月23日	No.4	晴れ	1/15	225	14.5	9.3	5.9	6
5月24日	No.5	晴れ	1/14	230	14.8	10.0	5.9	5
6月5日	No.6	晴れ	1/23	264	18.8	8.1	5.5	5
7月10日	No.7	曇り	1/22	253	20.8	8.6	7.3	4
7月17日	No.8	晴れのち曇り	1/18	278	21.5	7.7	7.3	3
7月18日	No.9	晴れ	1/16	279	21.5	7.9	7.3	5
7月19日	No.10	晴れ	1/18	270	20.8	8.4	7.4	5
7月24日	No.11	晴れ	1/19	267	24.4	7.8	7.3	5
7月25日	No.12	晴れ	1/17	273	23.1	8.9	7.5	7
7月26日	No.13	晴れ	1/17	267	23.1	9.1	7.5	7

注) *: 電磁流速計の直読値の平均指示値, S.D: 流速値の標準偏差
デジタルビデオカメラ

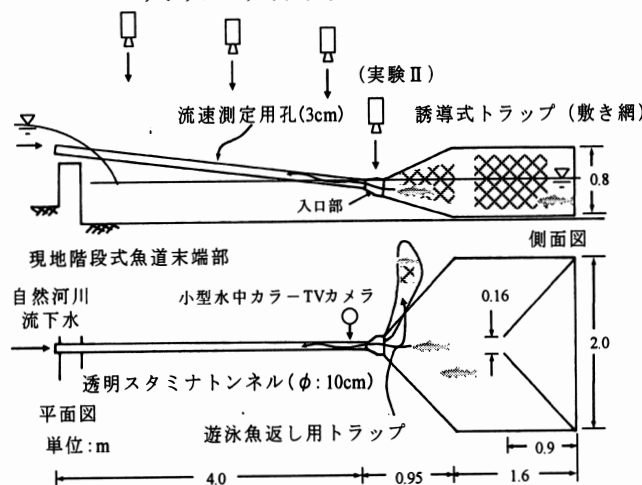


Fig.1 実験装置の概要

An overview of the stamina tunnel experimental apparatus

験 I は入口内径が21.5cmのグレー色の塩化ビニール製異径ソケット, 実験 II では入口部での魚の遊泳動態を観察できるように入口断面が25.5cm×14cmの透明アクリル製ボックスとした. 開口部面積は363cm², 357cm²とほぼ同じ面積であるが入口と返し口の面積比は異なり, 実験 I で1:6, 実験 II では漸縮部に魚が返し網へ入りやすいように仕切網を設け工夫し, 仕切網で区別された入口と返し口の面積比は1:1.6である (Fig.2のa-a'断面参照). また, 円筒パイプの下半分を魚が識別しやすいように白色にし, 円筒パイプは固定台の上に設置されている. 円筒の勾配は1:14~1:23である.

実験時は円筒パイプを水中に没し, 円筒管内を満流状態で円筒パイプの流入水位を実験中一定とした. 管内流速は実際の現地魚道の速い流れ場を想定して200cm·s⁻¹~300cm·s⁻¹の範囲になるよう円筒パイプ上流の魚道プール水位を上下に変化させ調節した.

実験に際しては, パイプ内流速, 水温, 水質(濁度・EC・pH・DO), 照度を測定した. 円筒パイプ内の流速測

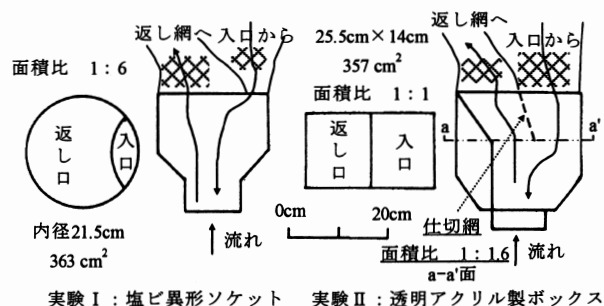


Fig.2 入口漸縮部の形状

The cross-sectional shape in the entrance part

定にはセンサー部が球形状(直径2cm)の三軸電磁流速計(ACM-300, アレック電子, 測定精度:±2%)とデータレコーダ(DR-F1, TEAC)を用い, Fig.1に示す円筒パイプ中心部において鉛直方向に底から2.5cm, 5.0cm, 7.5cmの3地点の各三軸方向成分の平均流速と流速変動(標準偏差)を10Hzのサンプリング間隔で100個のデータから求めた. さらに, 円筒パイプの鉛直流速分布を調べるため外径6mのピトー管(JIS型LK-1S, 岡野製作所, C=1.0)と30°傾斜マノメータを用い, 円筒パイプ中心部鉛直方向の流速を1cm間隔で測定した.

魚の遊泳速度の測定は, 円筒パイプの上方1.97m~2.51mの高さにデジタルビデオカメラ(DCR-HC90・HC96, SONY)を合計3台, さらに魚種を同定するため円筒部入口部の側方(25cm)に小型水中カラー-TVカメラ(FM4100, QI)をそれぞれ設置し, 円筒パイプ内を遊泳していく魚の遊泳動態を撮影・録画した. 画像はいずれもDVDレコーダーに直接入力し, 観測は無人状態で実施した. また, 実験 II では入口の漸縮部上方0.7mにHD内蔵タイプのデジタルビデオカメラ(GZ-MG575, Victor)を設置し, 流れに負けて円筒パイプ内へと泳げなかった個体の有無も含め入口部での魚の遊泳動態を撮影・録画した.

3. 遊泳速度の整理方法

遊泳速度の整理方法については, 既往の自然誘導式遊泳実験(泉ら, 2007b)と同様に魚が円筒パイプ内を流れに逆らい遊泳し, 流れに負けて流されたときの距離とその間の遊泳時間を計測した. さらに, 既往の実験(泉ら, 2006a)と同様に50cmごとの距離を遊泳する時間も計測し, そのうち最も速い速度を瞬間的遊泳速度として定義してこれを調べた. 各個体の遊泳時間の計測はDVDレコーダーの1/4倍速再生で5回行い, 最大・最小を除く3回の平均値をその個体の遊泳時間とした. また, 個体の遊泳速度は, 遊泳距離を遊泳時間で除した速度(相対速度と定義する)に円筒内の代表流速値を加えて算出した.

計測個体の体長は, 側方小型水中カラー-TVカメラ画像と上方ビデオ画像から円筒パイプ内の計測個体の遊泳位置も考慮し, 幾何学的に計算で求めた.

4. 実験結果と考察

4.1 水温・水質と管内代表流速条件

実験時の天候は、Table 1に示されるように晴れの日が多く良好であった。実験流下水の河川水温と水質は、水温：14.1℃～24.4℃，pH：5.5～7.5，DO：7.7～10.0(mg/l)，SS：3～14(mg/l)である。なお、突進速度は水温の影響を受けないとされている(Blaxter, 1967)。

Fig.3は縦軸に底からの測定距離 x と円筒パイプ直径 D との比，横軸に任意測点の流速値 U と最大流速値 U_{max} との比で無次元化した円筒パイプ中心断面の鉛直流速分布の1例である。既往の実験(泉ら, 2006a)の円筒パイプ内流速分布と同様，中心部では一様な流れを形成し，上部・下部の側壁近傍0.3cm～2cmでは中心部の最大流速に比べ壁面粗度の影響のため約10%～25%低減している。

そこで，遊泳速度算定に用いる管内流速の代表値は，既往の実験(泉ら, 2006a；2007a)と同様に，より安全側の評価とするため，流速が中心部より約5%遅い底から2.5cm地点($x/D=0.25$)の三軸電磁流速計で測定された流速($V_{0.25}$)を代表流速値とした。各実験の管内代表流速値($V_{0.25}$)は，Table 1に示すように実験 I (2006年)211 $cm \cdot s^{-1}$ ～230 $cm \cdot s^{-1}$ ，実験 II (2007年)225 $cm \cdot s^{-1}$ ～279 $cm \cdot s^{-1}$ で，とくに実験 II の流速値は前述したように現地魚道の流れ場としてはかなり速い流速条件である。また，流速変動を示す標準偏差値は4 $cm \cdot s^{-1}$ ～10 $cm \cdot s^{-1}$ である。

4.2 計測魚種と計測個体数

はじめに，実験 I では入口と返し面積比を既往の自然誘導式実験(2007b)を1:6と大きくしたにもかかわらず，既往の実験と同じように返し網に入った魚数が計測魚数の約50%と一致しなかった。また，実験 II で漸縮部の魚

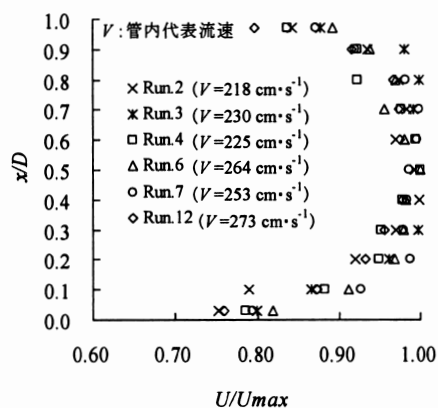


Fig.3 円筒パイプ内の鉛直流速分布

An example of the vertical-velocity distribution in the pipe

の動態を観察すると入口から進入してパイプ内を遊泳した後，返し網に入らず再度入口部へ戻る個体や返し網から再び遊泳してくる個体が観察された。これらのことから実験 I では入口をすり抜け誘導網あるいは下流河川に流された個体が再度遊泳し，同一個体が重複して計測されていることも考えられる。しかし，本実験装置では1尾ごとの個体識別まではできなかったことに加え，計測個体数を確保するため，ここでは重複を許して遊泳個体を計測し，整理した。ただし，実験 II では入口部の遊泳動態観察から返し網から再び遊泳した個体は計測しなかった。

Table 2に計測個体の魚種と尾数，および平均体長を管内代表流速値とともに示す。計測魚種は，遊泳魚6種類(アユ・ウグイ・アブラハヤ・オイカワ・ヤマメ・モツゴ)，底生魚2種類(カジカ・ヨシノボリsp)の8種で，計測個体は506個体である。魚種別の個体数と平均体長は多い順に

Table 2 計測魚種と尾数

Fish species and number of measured wild fishes

実験番号	管内代表流速 $V_{0.25}$ ($cm \cdot s^{-1}$)	計測個体数 (尾)	計測魚											流れに負けて泳げなかった個体数						
			アユ		アブラハヤ		ウグイ		オイカワ		ヤマメ		モツゴ		カジカ		ヨシノボリsp		遊泳魚 (尾)	底生魚 (尾)
			(尾)	平均体長 (cm)	(尾)	平均体長 (cm)	(尾)	平均体長 (cm)	(尾)	平均体長 (cm)	(尾)	平均体長 (cm)	(尾)	平均体長 (cm)	(尾)	平均体長 (cm)	(尾)	平均体長 (cm)		
実験 I																				
No.1	211	73	38	7.6	—	—	34	11.5	1	9.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
No.2	218	122	81	6.7	9	6.0	23	6.2	—	—	6	9.4	3	6.2	—	—	—	—	—	
No.3	230	109	31	7.4	44	6.7	10	6.0	24	9.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
小計		304	150	7.1	53	5.7	67	8.9	25	9.4	6	9.4	3	6.2	—	—	—	—	—	
実験 II																				
No.4	225	39	—	—	—	—	39	12.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
No.5	230	34	—	—	—	—	31	11.7	1	12.9	—	—	—	—	2	9.3	—	—	1	
No.6	264	15	7	8.5	3	6.8	—	—	4	10.8	—	—	—	1	7.4	—	—	2	1	
No.7	253	11	—	—	—	—	—	—	10	9.2	1	12.8	—	—	—	—	—	—	—	
No.8	278	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	
No.9	279	1	—	—	—	—	—	—	1	8.3	—	—	—	—	—	—	—	—	1	
No.10	270	3	—	—	1	7.4	—	—	2	11.1	—	—	—	—	—	—	—	—	1	
No.11	267	31	—	—	—	—	—	23	7.9	3	9.2	—	—	—	—	5	4.2	—	2	
No.12	273	42	—	—	—	—	—	39	7.8	1	14.7	—	—	—	—	2	4.1	1	10	
No.13	267	26	—	—	—	—	—	25	9.6	—	—	—	—	—	—	1	4.0	—	4	
小計		202	7	8.5	4	7.0	70	11.9	105	12.3	5	11.0	—	—	3	8.7	8	4.2	5	
合計		506	157	7.1	57	5.8	137	10.4	130	10.1	11	6.6	3	6.2	3	8.7	8	4.2	27	

Table 3 体長ごとの計測個体数

The number of measurements of the every body

アユ						ウグイ						アブラハヤ						
体長 (cm)	管内代表流速($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)				合計	体長 (cm)	管内代表流速($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)					合計	体長 (cm)	管内代表流速($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)				合計
	No.1	No.2	No.3	No.6			No.1	No.2	No.4	No.3	No.5			No.2	No.3	No.6	No.10	
4					15	4	1				2	4	1			1		
5		11	4		72	5	13		3		16	5	4	7		11		
6	10	48	13	1	40	6	5		4		9	6	5	20	2	27		
7	16	18	5	1	21	7	1	2	2	2	7	7	12	1	1	14		
8	10	4	4	3	3	8	3	2	4		12	8	4			4		
9	1		2		3	9	12		3	5	20	9						
10	1		1	1	3	10	5		4	5	14	10						
11			2	1	3	11	3		1	4	8	11						
12						12	2		7	6	15	12						
13						13			8	3	11	13						
14						14			9	1	10	14						
15						15	2		1	3	6	15						
16						16	3			1	4	16						
17						17	3				3	17						
合計	38	81	31	7	157	合計	34	23	39	10	31	137	合計	9	44	3	1	57

オイカワ											
体長 (cm)	管内代表流速($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)										合計
	211	230	230	253	264	267	270	273	279		
	No.1	No.3	No.5	No.7	No.6	No.11	No.13	No.10	No.12	No.9	
5										1	1
6				3		5	1			13	22
7		3		1	1	10	2			14	31
8		8		1		5	2			1	17
9	1	7					11			5	24
10		2		2		1	7			5	17
11		2		3	2	2	1	2			12
12		2	1		1		1			1	6
合計	1	24	1	10	4	23	25	2	39	1	130

アユ157個体(6.7cm~8.5cm), ウグイ137個体(6.0cm~12.0cm), オイカワ130個体(7.8cm~12.9cm), アブラハヤ57個体(6.0cm~7.4cm), ヤマメ11個体(9.2cm~14.7cm), モツゴ3個体(全平均6.2cm), ヨシノボリsp8個体(全平均4.2cm), カジカ3個体(全平均8.7cm)である。計測魚種の特徴として, 本魚道の遡上調査(泉ら, 2006b)と同様にアユ・ウグイ・オイカワ・アブラハヤの4魚種が多数を占め, 2006年はアユが49%, 2007年はオイカワが52%でそれぞれ最も多い。

Table 3は, 管内代表流速値順に整理した主要4魚種の体長区分とその尾数を示したものである。管内代表流速値の条件は, それぞれアユ4条件(最大264 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), ウグイ5条件(最大230 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), オイカワ10条件(最大279 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$), アブラハヤ4条件(最大270 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)である。実験年月日におけるこの河川での魚の遡上特性にかなり影響されるため管内代表流速値ごとの魚種と尾数は揃わないが, 魚種のうちオイカワが最も広い流速条件範囲で計測された。また, 最小個体は体長4cm台でウグイ2個体・アブラハヤ1個体と極めて少なく, 円筒パイプからの流れが速くて入口部までこれないことも推察される。一方, 最も大きな個体はウグイの17cm台であった。

計測魚の最大体幅は円筒パイプの直径10cmの1/3以下で, 尾びれの振れ幅の影響がない条件である(塚本, 1973)。

つぎに, 実験IIで入口部に入ったものの流れに負けてパイプ内へと泳げなかった個体を調べると, No.4・No.7を除く11条件で27個体(遊泳魚5個体・底生魚22個体)が観察された(Table 2参照)。おもに体長4cm~5cmの底生魚が多く, とくに実験番号No.12の273 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ のかなり速い流速条件では体長4cm程度の底生魚(ヨシノボリsp)10個体

が吸盤でくっつきながらも流れに負けて流される様子が視認された。

なお, 実験番号No.3とNo.5およびNo.11とNo.13は, 管内代表流速値が230 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ と267 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ でそれぞれ同じであったので以下の考察ではまとめて整理した。

4.3 遊泳速度について

Blaxter(1967)は1~5秒間持続する最大遊泳速度を突進速度と定義しているの, はじめに1秒以上遊泳した個体を対象にしてその遊泳速度と体長の関係をFig.4(a)~(e)に示した。図には既往の自然誘導式実験(泉ら, 2007b)のうち管内代表流速が168 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ のアユ・ウグイ・アブラハヤのデータも合わせ示した。1秒以上遊泳した個体は, アユ155個体・ウグイ131個体・オイカワ116個体・アブラハヤ51個体・ヤマメ9個体・モツゴ3個体で, 底生魚のカジカ・ヨシノボリspで1秒以上遊泳した個体はなかった。1秒以上遊泳した個体の遊泳速度は, アユの229 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (体長; 7.8cm, $V_{0.25}$; 211 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)からヤマメの386 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (体長; 12.1cm, $V_{0.25}$; 264 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)の範囲である。

Fig.4に示されるように計測個体数が多い主要4魚種では, ウグイの高速流挿入式遊泳実験の結果と異なり, 管内代表流速が増加すると遊泳速度も速くなっていることがわかる。そして, いままでのスタミナトンネルによる実験では同一管内流速の条件で遊泳速度と体長との間に明確な傾向が見られなかったのに対し, 体長と遊泳速度との間に比例の関係が見られている。

そこで, 突進速度については, 本実験で高速流条件でも遊泳速度は管内の流速の増加とともに速くなる傾向にあるので, つぎの考え方で取り扱った。すなわち, 最も速い管内代表流速で1秒以上遊泳した個体が最大に近い状態で遊泳していると考え, この条件で計測された個体の遊泳速度を本実験での突進速度と定義し, 整理した。そして, 体長と突進速度の関係を, $V_B = aBL + b$ (V_B : 突進速度, BL : 体長)とにおいて, 計測個体数が多い4魚種について係数 $a \cdot b$ を最小自乗法で求めTable 4に示した。魚種によって管内代表流速の最大値が異なるので, Table 4には突進速度算出時の管内代表流速と個体数, および体

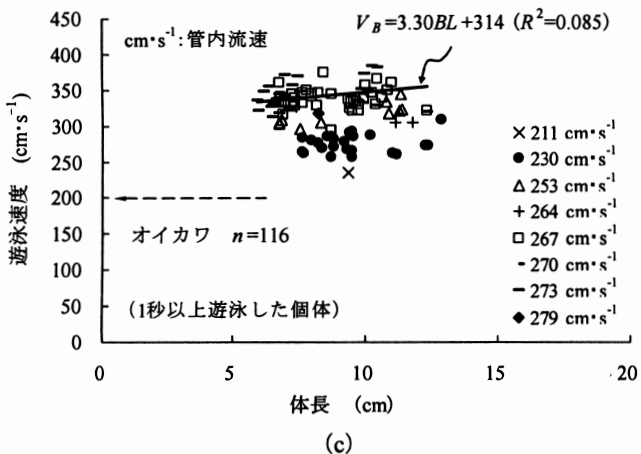
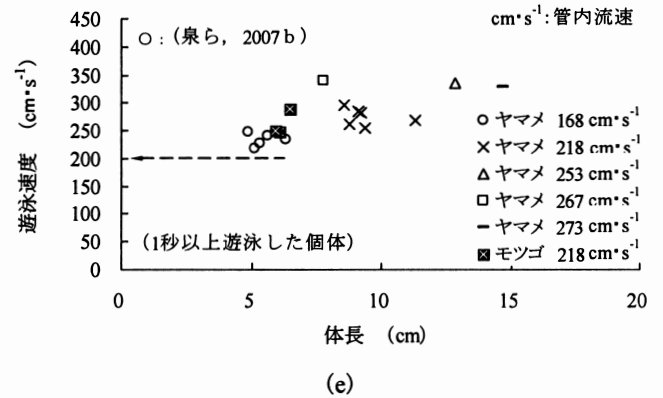
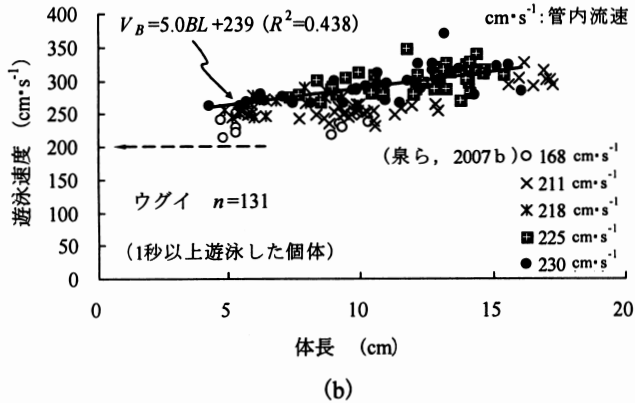
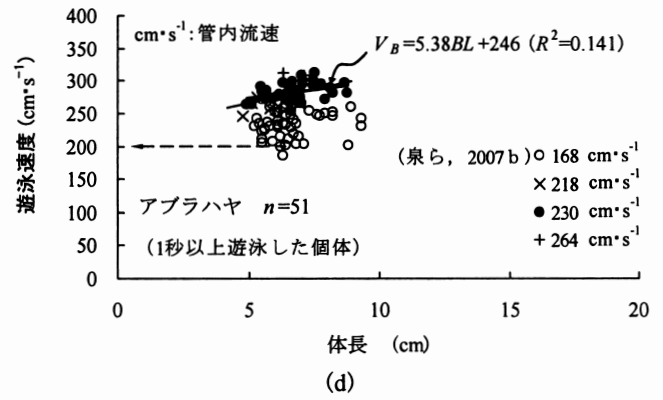
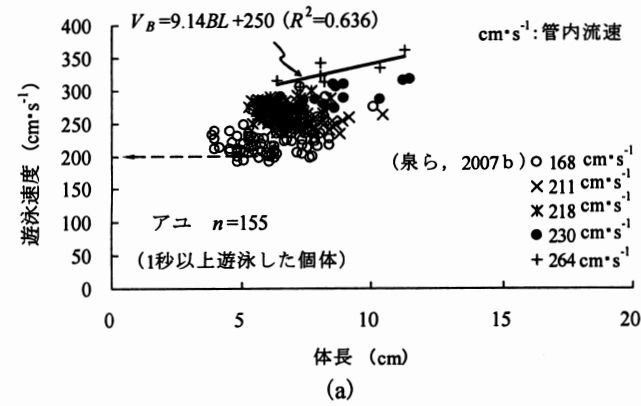


Fig.4 遊泳速度と体長の関係

The relation between the swimming speed and body length

長と突進速度の範囲も合わせ示している。

その結果、ウグイ・アブラハヤの体長4cm台～17cm台の突進速度は、 $261\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\sim 325\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ($V_{0.25}$; $230\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)、管内代表流速値がそれらよりも速いオイカワとアユの体長5cm台～12cm台の突進速度は、 $308\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\sim 355\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ($V_{0.25}$; $264\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\sim 273\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)でかなり速いことがわかる。また、ウグイの挿入式高速流遊泳実験(泉ら, 2008)で推定された平均突進速度は、 $265\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (平均体長14.9cm)であったので、体長14.9cmの突進速度を回帰式から求めると $313\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ となりそれよりも $50\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ほど速いことがわかった。

また、魚道の設計(廣瀬ら, 1991)の魚の遊泳力によると体長6.6cmと14.4cmのアユの突進速度がそれぞれ120

Table 4 突進速度

Burst speed of measured wild fishes

魚種	$V_{0.25}$ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	n	a	b	R^2	体長の範囲 (cm)	V_B の範囲 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
アユ	264	7	9.1	250	0.636	6.4 ~ 11.3	308 ~ 353
ウグイ	230	37	5.0	239	0.438	4.3 ~ 17.2	261 ~ 325
オイカワ	273	35	3.3	314	0.085	5.9 ~ 12.3	333 ~ 355
アブラハヤ	230	40	5.4	246	0.141	4.9 ~ 8.7	272 ~ 293

$\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ と $178\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ で示されている。これに対し、本実験ではこれらよりもかなり速い結果となっている。

つぎに、主要4魚種の遊泳能力の違いについて管内代表流速が同一の条件で調べた。Fig.5は主要4魚種Fig.4(a)～(d)のうち、同一流速条件で計測個体数が多い管内代表流速が $230\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の条件を示したものである。アユの遊泳速度はウグイやオイカワに比べ速いと言われている(小山, 1967)。しかしながら、図からアユ、ウグイ、アブラハヤ、オイカワとも遊泳速度には明確な差が見られず、小山(1967)と異なる結果である。

一方、遊泳速度に明確な差が見られないので、この流速条件で同一体長での遊泳速度と遊泳時間の関係を調べた。比較対象として体長別の計測個体が揃う7cm台と8cm台の個体についてFig.6に示す。図からアユとオイカワはウグイとアブラハヤに比較して遊泳時間が長い傾向にある。そこで、Fig.6のデータを用いこれらの魚種の遊泳時間について差があるかどうかを調べた。

その結果、遊泳時間はアユ・オイカワとウグイ・アブラハヤとの間に1%水準で有意に差が見られた(t 検定, $P < 0.01$)。これは小型のオイカワがウグイに比べて遊泳持

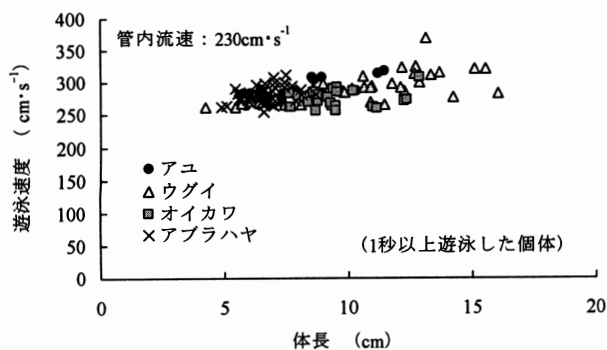


Fig.5 遊泳速度と体長の関係(管内流速230cm·s⁻¹)

The relation between the swimming speed and body length

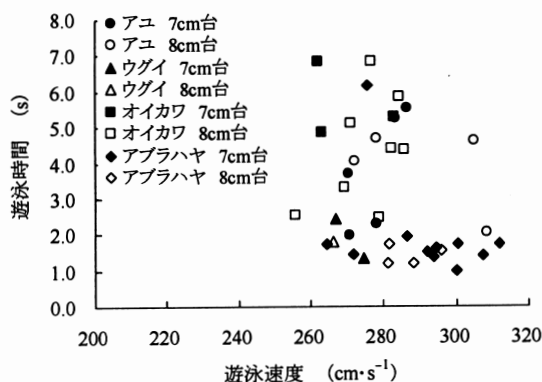


Fig.6 遊泳速度と遊泳時間の関係

The relation between the swimming speed and swimming time

久力が大きいた挿入式遊泳実験(泉ら, 2007b)の結果とも一致しており, 小型のアユとオイカワはウグイやアブラハヤに比較して突進的遊泳持久力が大きいことを示している.

一方, 底生魚のカジカ・ヨシノボリspでは1秒以上遊泳した個体は見られなかったが, Table 5にこれらの遊泳速度と遊泳時間を示した. 表には計測個体数が少ないヤマメとモツゴについても示した. 表に示されるように230 cm·s⁻¹以上の流速で体長約8cmのカジカと体長約4cmのヨシノボリspの遊泳距離は僅か十数センチである. 吸盤のあるヨシノボリ類は, 吸盤でくっつきながら魚道隔壁や潜孔内を移動・遊泳していくことが報告されている(泉ら, 2003). ただ, 入口部で体長4cm程度の底生魚が流れに負けて泳げなかった様子も観察されているので, 小さな底生魚類がこのようになかなか速い様な流れ場を遊泳していくのは相当困難であると推察される.

4.4 瞬間的遊泳速度について

Fig.7は50cm以上遊泳したアユ(153個体)・ウグイ(129個体)・オイカワ(113個体)・アブラハヤ(49個体)の瞬間的遊泳速度と遊泳速度の関係を各実験条件の平均値で示したものである. 各魚種とも挿入式遊泳実験のウグイとオイカワと同様, 瞬間的遊泳速度は遊泳速度に比較して

Table 5 遊泳速度と遊泳時間および遊泳距離

The swimming speed, swimming time and swimming distance										
of w	個体	体長		遊泳距離		遊泳時間		遊泳速度		
魚種	数	平均値	S.D	平均値	S.D	平均値	S.D	平均値	S.D	
	(cm·s ⁻¹)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(s)	(s)	(cm·s ⁻¹)	(cm·s ⁻¹)	
ヤマメ	218	6	9.4	1.0	200	107	3.50	1.9	275	16
	253	1	12.8		355		4.31		335	
	267	3	9.2	2.6	98	66	1.23	1	357	25
	273	1	14.7		400		7.29		328	
モツゴ	218	3	6.2	0.3	101	69	2.18	0.3	262	24
カジカ	230	2	9.3	0.3	14	3	0.72	0.4	254	16
	264	1	7.4		22		0.43		315	
ヨシノボリsp	267	6	4.2	0.2	14	4	0.46	0.2	300	10
	273	2	4.1	0.0	14	2	0.34	0	312	3

注) 全個体, S.D: 標準偏差

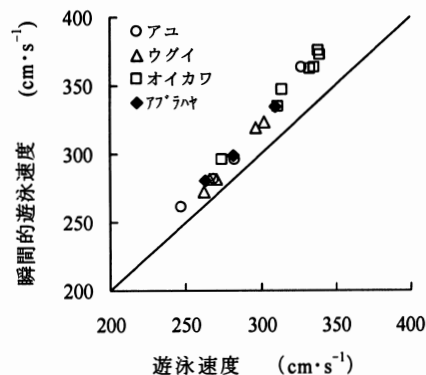


Fig.7 遊泳速度と瞬間的遊泳速度との関係

The relation between the swimming speed and the instantaneous swimming speed

速く, 全平均値で遊泳速度の1.07倍の速さであった. 挿入式遊泳実験のウグイとオイカワの瞬間的遊泳速度はそれぞれ1.17・1.14倍であったので, かなり速い流速の条件ほど瞬間的遊泳速度に近い速さで泳ぐことがわかる. また, これらの遊泳時間の平均値は, それぞれアユ0.87s (S.D: 0.28s), ウグイ0.75s (S.D: 0.33s), オイカワ0.61s (S.D: 0.23s), アブラハヤ0.81s (S.D: 0.30s)で, 短時間で遊泳している. ヤマメとモツゴについてはそれぞれTable 5に示された平均遊泳速度の1.07倍, 1.06倍であった.

また, Table 4に示した条件の瞬間的遊泳速度は突進速度値に比較してアユ1.11倍, ウグイ1.06倍, オイカワ1.09倍, アブラハヤ1.06倍それぞれ速かった

4.5 遊泳距離について

1回の遊泳で速い流れ場をどこまで泳げる能力があるのかについても重要な情報である. そこで, 主要4種の計測された個体すべてについて体長と遊泳距離の関係を調べた (Fig.8参照). 遊泳距離はオイカワの21cm(体長: 6.8 cm, $V_{0.25}$; 267cm·s⁻¹)からアユの400cm·s⁻¹(体長: 11.3cm, $V_{0.25}$; 264cm·s⁻¹)の範囲である. 図から各魚種とも体長と遊泳距離との間にはばらつきが見られる.

ただ, 体長範囲が広いアユ・ウグイ・オイカワの管内代表流速230cm·s⁻¹・225cm·s⁻¹・253cm·s⁻¹を例にすると体

長と遊泳距離との間に比例の傾向(図中の回帰直線)が見られ、同一管内代表流速のもとで体長が大きくなるにつれて遊泳距離が長くなる傾向が窺われる。

ここで、体長が小さな個体ほど遊泳能力が小さいと考えられるので、主要4魚種の体長5cm台、6cm台の個体について管内代表流速と遊泳距離との関係を既往の自然誘導式遊泳実験の結果も含めてFig.9に示した。図から各魚種とも総じて破線で示したように管内代表流速が高速になるほど遊泳距離は曲線的に短くなるのがわかる。体長5cm台のアユを例に見ると168 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の流速では200cmの長い距離を泳ぐが、流速200 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上の遊泳距離は100cmと短いことがわかる。また、これらの小さな個体が200 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上の流速でも50cm以上遊泳していることもわかる。

一方、体長9cm程度のアユやウグイが厚さ30cmの魚道隔壁部などの160 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ~240 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の局所的速い流れ場を遡上しているとの調査報告がある(泉ら, 2003)。そこで、越流部・潜孔などの局所的速い流れ場の距離を50cmとおいて、50cmまで到達しなかった遊泳個体の割合を調べた(Table 6参照)。その割合は表に示されるようにアユ0.6%、ウグイ2.9%、アブラハヤ3.5%、オイカワ5.4%である。また、ヤマメは11個体中10個体が、モツゴはすべての個体が50cm以上の距離を遊泳しており、底生魚を除く遊泳魚の約95%以上の個体が50cm以上の距離を遊泳していることがわかる。これは速い条件でのウグイの挿入式遊泳実験(泉ら, 2008)の結果とほぼ一致している。ただ、オイカワで管内代表流速が267 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上になると体長10cm以下の個体で50cmまで泳げない個体が散見されており、上述したように高流速になるほど泳げる距離が短くなることを示している。

4.6 実験方法の違いによる遊泳速度の比較

ここで、実験方法の違いによる遊泳速度の差異を管内代表流速値と平均体長が類似するウグイで比較検討した。比較対象とした条件は、挿入式遊泳実験(泉ら, 2008)で管内代表流速217 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ と222 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の2条件・体長11cm台から26cm台までの103個体(平均体長14.5cm)、自然誘導式遊泳実験では管内代表流速211 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ と225 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の2条件・体長11cm台から17cm台までの39個体(平均体長13.9cm)である。これをTable 7に示した。

その結果、平均遊泳速度は、挿入式遊泳実験(103個体)265 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (S.D.: 22 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)、自然誘導式遊泳実験(39個体)301 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (S.D.: 23 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)で、自然誘導式遊泳実験の方が35 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 速く、1%水準で有意な差が見られた(t検定, $p < 0.01$)。

また、オイカワの突進速度に関する実験(泉ら, 2007a, 鬼東ら, 2008)とも比較した(Fig.10参照)。鬼東らの実験は室内での幅12.5cm・長さ120cmの長方形断面水路を用い、水深を一定(8.7cm)にして流速を変化させた実験である。図には既往の実験では流速が170 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ~195 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の

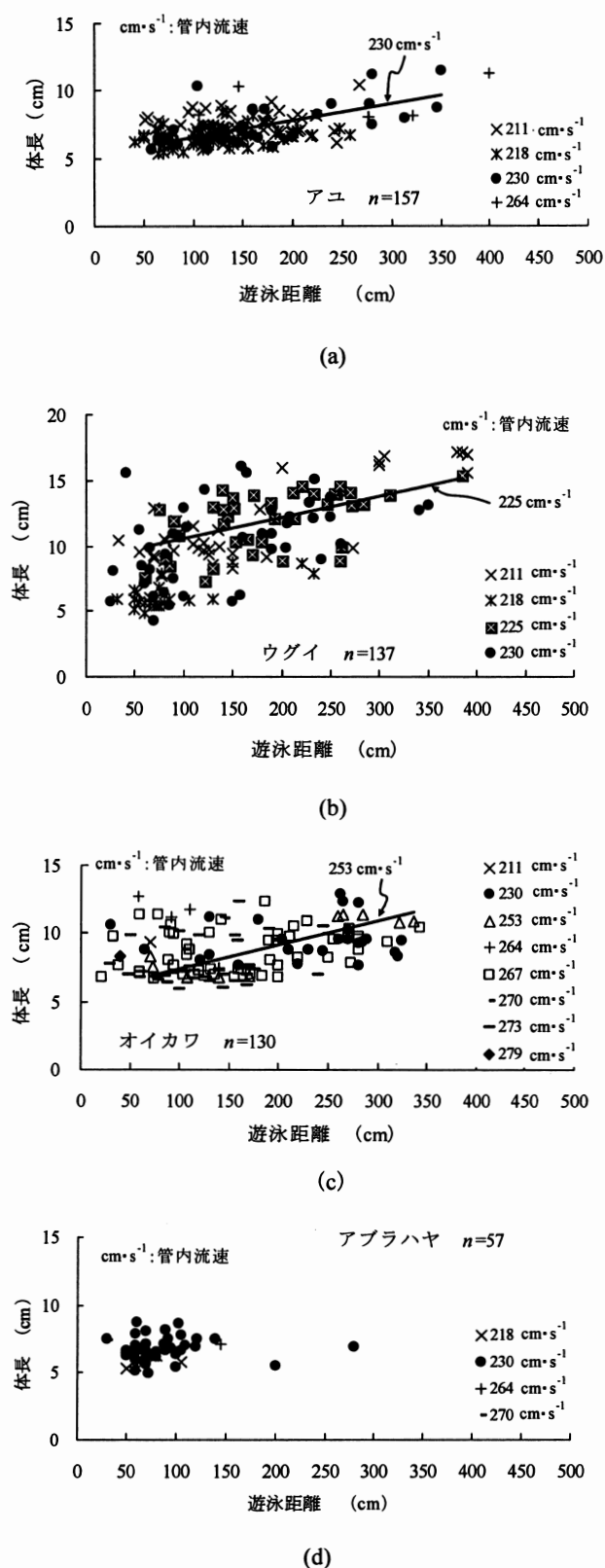


Fig.8 遊泳距離と体長の関係

The relation between the swimming distance and body length

速い条件、本実験では個体数が多い267 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の条件をそれぞれプロットした。図からオイカワについても管内代表流速が速いこともあり、既往の実験値より約100 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ とかなり速いことがわかる。

それぞれ同一個体を用いての比較実験でないので厳密

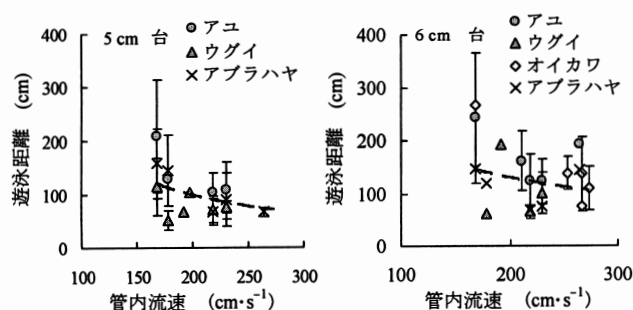


Fig.9 管内流速と遊泳距離との関係

The relation between the swimming distance and pipe-velocity

なことは言えないが、管内代表流速が類似する条件で誘導式遊泳実験値が挿入式遊泳実験値に比較して速い要因の一つとして、計測魚に対する人為的なハンドリングと実験装置周辺の無人・有人の人的な環境などが影響していると考えられる。

これらの点を踏まえると、本実験では1尾ごとの個体識別まではできないという点があるものの、遊泳意欲に関係する人為的なハンドリングの影響を排除できるので、自然誘導式遊泳実験値の方がより実際の現象を示すものと推察される。

4.7 魚道設計への突進速度指標値の提案

最近の遡上調査や突進速度の研究から、魚の遊泳速度は体長が小さな個体ほど目安としての体長の10倍を悠に超える速度で遊泳することが明らかにされてきた。

そこで、魚類が遡上できる実際的な流れ場環境について、“どのくらいの速い流れの中をどれくらいの流泳速度でどこまで泳げるのか？”に着目にして、現地魚道での実証的な調査研究をもとに魚道設計における突進速度の指標値について検討した。対象魚道は隔壁を持つプールタイプ魚道で、魚種はアユ・ウグイ・オイカワ・アブラハヤの4魚種とした。

本実験ではかなり速い高速流条件でアユ・ウグイ・オイカワ・アブラハヤの突進速度を推定したが、個々の遊泳意欲の違いによる個体差もあり対象とする個体すべてがこれらの突進速度を発揮するとは言えない。したがって、魚道を考えた場合、安全側を考慮し局所的速い流れ場を余裕を持って泳ぎ切る条件を指標値として量的に提示することがより現実的である。

これまでの遊泳実験から、①魚は流速に応じた速度で遊泳する、②自然誘導式遊泳実験から遊泳速度は体長との間に比例関係が見られ、体長が小さい個体の遊泳速度は遅い、③50cmの距離を瞬間的に遊泳する瞬間的遊泳速度は遊泳速度の約1.1倍速い、ことなどが知られている。

そこで、自然誘導式遊泳実験で得られたこれらの知見をもとに、体長4cm台の計測個体数が少ないので、Fig.4に示される体長が5cm台・6cm台の遊泳速度に着目した。そして、同一管内代表流速でも遊泳意欲などに個体差が

Table 6 遊泳距離が50cm未満の個体の割合

The rate under 50cm at the swimming distance

管内代表流速 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	アユ		ウグイ		オイカワ		アブラハヤ	
	個体数	遊泳距離長 (cm)	個体数	遊泳距離長 (cm)	個体数	遊泳距離長 (cm)	個体数	遊泳距離長 (cm)
211	0		1	33	11	0		
218	1	41	6.2	1	32	5.9	0	0
225			0					
230	0		2	30	12	1	30	11
253						0		
264	0					0		0
267						3	31	8.1
270						0		1
273						2	39	7.3
279						1	40	8.3
合計	1		4		7		2	
割合(%)	0.6		2.9		5.4		3.5	

注) 複数の個体についてはその平均値。

Table 7 実験方法の違いによる遊泳速度の比較 (ウグイ)

The comparison of the swimming speed by the difference between experimental method (*Tribolodon hakonensis*)

実験形式	管内代表流速 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	個体数 (尾)	体長 (cm)		遊泳速度 ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	
			平均値	S.D	平均値	S.D
挿入式 (泉ら, 2008)	217	70	14.3	2.4	266	21
	222	32	14.8	2.1	265	19
	合計	103	14.5	2.3	266	20
誘導式	211	13	14.8	2.3	286	25
	225	26	13.4	0.9	308	19
	合計	39	13.9	1.7	301	23

注) 1秒以上遊泳した個体, S.D: 標準偏差

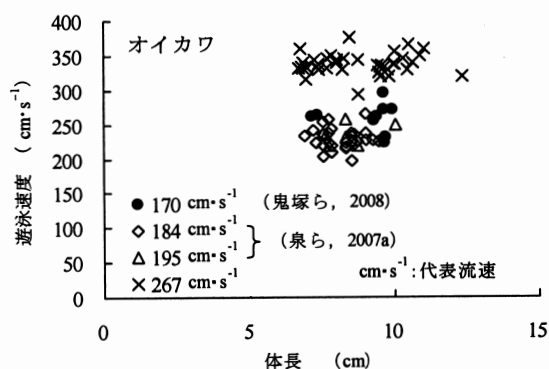


Fig.10 実験方法の違いによる遊泳速度の比較 (オイカワ)

The comparison of the swimming speed by the difference between experimental method (*Zacco platypus*)

を調べると、Table 8のように平均でアユ：0.93s、アブラハヤ：0.88s、ウグイ：0.75sであり、いずれも1秒程度の時間で遊泳していることがわかる。

一方、隔壁の厚さ30cmのアイスハーバー型魚道の越流部(水深20cm)を通過する際、体長9cm程度のアユやウグイが20cmの距離を $190\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\sim 250\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の遊泳速度で0.25sの短時間で遊泳していくことや、30cmの正方形断面の潜孔部では潜孔内の上部や中央部よりむしろ底面や隅角部を嗜好し、 $150\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}\sim 200\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ の流れ場を遊泳していくことが明らかにされている(泉ら, 2002)。さらに、同魚道での小型水中TVカメラによる魚類の遊泳経路観測と詳

Table 8 遊泳速度の指標値とその遊泳時間

Swimming time and the index-value of swimming speed,
instantaneous swimming speed of wild fishes

管内代表流速：168 (cm・s⁻¹), (泉ら, 2007b)

魚種	個体数 (尾)	体長		遊泳速度			遊泳時間	
		平均値 (cm)	S.D	平均値 (cm・s ⁻¹)	S.D	指標値	平均値 (s)	S.D
アユ	24	5.4	0.2	220	16	204	4.55	2.25
	26	6.3	0.2	227	26	201	4.77	2.69
全体	51	5.9	0.5	224	22	202	4.66	2.47
アブラハヤ	13	5.6	0.2	231	19	212	2.86	0.92
	27	6.4	0.3	233	21	212	2.51	0.98
全体	40	6.1	0.5	232	20	212	2.62	0.96
ウグイ	3	5.3	0.0	234	15	219	1.88	1.21

遊泳距離：50cm

魚種	体長	瞬間的遊泳速度	遊泳時間
アユ	5cm台	221 (cm・s ⁻¹)	0.94 (s)
	6cm台	223 (cm・s ⁻¹)	0.92 (s)
アブラハヤ	5cm台	222 (cm・s ⁻¹)	0.93 (s)
	6cm台	229 (cm・s ⁻¹)	0.83 (s)
ウグイ	5cm台	226 (cm・s ⁻¹)	0.75 (s)

細な流速分布の結果から、Table 9のように体長6cm台から7cm台のアユやウグイの80%の個体がFig.11に示す流速が200cm・s⁻¹程度と速い越流頂から10cmまでの越流水脈の下層部を流線に沿った最短距離を选好して瞬時に遊泳していくことも知られている(泉ら, 2003)。また、Fig.11のように魚道中の越流部では上流からの接近流速の影響を受け局所的に理論平均流速値より速い流れが形成されている。このことから、速い流速条件で得られた本実験の結果はこれらの実証的データと酷似している。

したがって、体長5cm台・6cm台の個体が1秒以上遊泳する遊泳速度と、瞬間的に50cmの距離を1秒程度の時間で泳ぎ切る瞬間的遊泳速度の目安をそれぞれ200cm・s⁻¹と220cm・s⁻¹として、越流水深・水位差の各水理諸元から計算される流速を局所的な流れ特性も加味し設定すれば良いと考えられる(Table 10参照)。また、体長が5cm台・6cm台よりも大きい個体を対象にしたとき、この指標値はより安全側と考えることができる。

さらに、速い流れ場の距離が短いほど遊泳していく魚にとって負荷にならないので、できる限り隔壁の厚さを薄くする工夫をした方が良いと考えられる。

なお、ヤマメ、モツゴについては計測個体数が少ないものの計測されたことに意味がある。Fig.4(e)とTable 5に示さるよう、体長9cm~15cmのヤマメや体長6cmのモツゴが200cm・s⁻¹以上の遊泳速度で50cmの距離を遊泳しているので、これらの体長範囲では目安をアユ・ウグイ・オイカワ・アブラハヤと同様におけると思われる。

5. まとめと今後の課題

現地河川の魚道中にスタミナトンネル(円筒パイプ)を設置し、管内流速値が211cm・s⁻¹~279cm・s⁻¹の高速流条件での野生魚の自然誘導式遊泳実験を行い、遊泳速度、突進速度、遊泳距離、実験手法の違いによる遊泳速度、および魚道設計への突進速度の指標値について検討した。

Table 10 魚道設計への突進速度の指標値

The index-value of burst speed for the fishway design

魚道タイプ	隔壁・潜孔・スロットのプールタイプ
魚種	アユ・ウグイ・オイカワ・アブラハヤ
体長	5cm台~6cm台
遊泳速度	200 (cm・s ⁻¹)
瞬間的遊泳速度	220 (cm・s ⁻¹)
遊泳距離	50 (cm)
遊泳時間	1秒程度

本研究で得られた知見は以下のとおりである。

(1) 遊泳魚6種類(アユ・アブラハヤ・ウグイ・オイカワ・ヤマメ・モツゴ)、底生魚2種類(カジカ・ヨシノボリsp)の合計8種の遊泳速度が計測された。

(2) 計測個体数が多いアユ、ウグイ、オイカワ、アブラハヤの魚種では、管内代表流速が増加すると遊泳速度も速くなり、同一管内流速の条件で体長と遊泳速度との間に比例の関係が見られた。

(3) 最も速い管内代表流速で1秒以上遊泳した個体の遊泳速度を突進速度と定義し、体長と突進速度の関係を直線回帰で表した。ウグイ・アブラハヤの体長4cm台~17cm台の突進速度は261cm・s⁻¹~325cm・s⁻¹、管内代表流速がそれよりも速いオイカワとアユの体長6cm台~12cm台の突進速度は、308cm・s⁻¹~355cm・s⁻¹であった。

50cmの距離を瞬間的に泳ぐ遊泳魚の瞬間的遊泳速度は遊泳速度に比較して1.07倍速く、かなり速い流速の条件ほど瞬間的遊泳速度に近い速さで泳ぐことがわかった。

(4) 同一管内代表流速のもとで体長が大きくなるにつれて遊泳距離が長くなる傾向にあり、管内流速が高速になるほど遊泳距離は曲線的に短くなることがわかった。また、遊泳魚の計測個体の95%以上が50cm以上の距離を遊泳した。

(5) 体長4cm台のヨシノボリspの遊泳距離は250cm・s⁻¹以上の速い流れ場で僅か十数センチであり、遊泳限界であると推察された。

(6) 実験方法の違いによる遊泳速度の差異をウグイで比較検討した。その結果、自然誘導式遊泳実験値の方が挿入式遊泳実験値に比べて有意に速く、人為的なハンドリングの影響を排除できる自然誘導式遊泳実験値の方がより実際の現象を示すと推察された。

(7) 魚道設計への突進速度の指標値として、50cmの距離を1秒程度の時間で瞬間的に泳ぎ切る瞬間的遊泳速度の考え方を提案し、アユ・ウグイ・オイカワ・アブラハヤの体長5cm台と6cm台の遊泳速度と瞬間的遊泳速度の目安はそれぞれ200cm・s⁻¹・220cm・s⁻¹であることを示した。

今後の課題としては、鬼塚ら(2008)も指摘するように体長別に泳げなくなる限界流速がある。本実験では実際の現地魚道の速い流れ場を想定して300cm・s⁻¹に近

い条件まで速くして実施したところ、オイカワを例にすれば $270\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ のかなり速い流速でも遊泳する個体が見られた一方で、体長が小さな個体数が少なかった。ただ、魚道を対象にしたときこれよりも速い流れで設計することはなく、流速条件としては現実的に上限であると考えられる。むしろ、体長が小さな個体数が少ないことから、体長4cm程度の遊泳能力が弱い遊泳魚や底生魚の限界遊泳速度を明らかにする必要がある。

本実験では実験Ⅱの入口部の動態観察から、遊泳魚が流れに負けて流される個体は意外と少なかった。しかし、上述のように体長4cm台の遊泳魚が速い条件で計測されていないので、流れが速くて入口部までこれがないのか、あるいは魚道下流部にこれらのサイズの個体が少ないのか明確でない。また、体長が小さな底生魚のヨシノボリspなどについては $250\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上の速い流れ場が遊泳限界であると推察されるが流速条件の違いによるデータ数が少なく明確でない。

したがって、これらの点については今後さらに明らかにする必要がある。

謝辞：本実験を行うに当たり、岩木川漁協組合、弘前市水道部をはじめとする関係各位にはお世話いただいた。弘前大学農学生命科学部の谷祐吾君、千葉裕幸君、福田貴洋君、野呂友弘君、山田真司君の学生諸氏から多大な協力と援助をいただいた。ここに記して、心より感謝の意を表します。

引用文献

- Bainbridge,R(1960) : Speed and Stamina in Three Fish, J.Experimental Biology,37,pp.129-153.
- Beamish,F.W.H(1978) : Swimming Capacity,In Fish physiology , Vol(7) (edited by W.S.Hoar and D.J.Randall),Academic Press, London,pp.101-187.
- Blaxter,J.H.S and W.Dickson(1959) : Observations on the Swimming Speeds of Fish,J.Conseil Permanent International pour Exploration de la mer(Bureau du Conseil) ,24,pp.472-479.
- Blaxter,J.H.S(1967) : Swimming Speeds of Fish,Proceedings of the FAO Conference on Fish Behaviour in relation to Fishing Techniques and Tactics,in Bergen,Norway,pp.69-100.
- 廣瀬利雄, 中村中六(1991):魚道の設計,山海堂, pp. 170-171.
- 泉 完, 高屋大介, 工藤 明, 東 信行(2002) : アイスハーバー型魚道における魚類の隔壁遡上特性, -赤石川赤石第2頭首工の魚道を事例にして-,農土論集,217, pp.55-63.
- 泉 完, 高屋大介, 工藤 明, 東 信行(2003) : 赤石第2頭首工のアイスハーバー型魚隔壁における魚類の遡上行動,水工学論文集,47, pp.763-768.
- 泉 完, 菅原賢治, 工藤 明, 東 信行(2004) : パーチカルスロット型魚道におけるアメモスの現地放流実験, 農土誌, Vol. 72-7, pp.45-50.
- 泉 完, 矢田谷健一, 東 信行, 工藤 明(2006a) : 河川流下水を用いたスタミナトンネルによるウグイの突進速度について, 農土論集, 244, pp.171-178.
- 泉 完, 伊東竜太, 矢田谷健一, 東 信行(2006b) : 岩木川取水堰の全面越流型階段式魚道における魚類等の遡上と水理特性, 農土論集,245, pp.55-64.
- 泉 完, 矢田谷健一, 東 信行, 工藤 明, 加藤 幸(2007a) : 自然河川流下水を用いたスタミナトンネルによるオイカワの突進速度に関する現地実験,水工学論文集,51, pp.1285-1290.
- 泉 完, 矢田谷健一(2007b) : 河川における自然誘導式スタミナトンネルを用いた野生魚の突進速度に関する実験, 農土論集, 249, pp.115-116.
- 泉 完, 山本泰之, 矢田谷健一, 神山公平(2008) : 河川における挿入式スタミナトンネルを用いた高速流条件でのウグイの突進速度, 農土論集, 256, pp.65-66.
- 農業土木学会発行(2002) : よりよき設計のために「頭首工の魚道」設計指針, pp.20-26.
- 鬼東幸寿, 秋山壽一郎, 山本晃義, 飯國洋平(2008) : 流速および体長別のオイカワの突進速度,水工学論文集,52,pp.1183-1188.
- 小山長雄(1967) : 魚道をめぐる諸問題-Ⅱ. 解説編一, 木曾三川河口資源調査団(KST), pp.54-65.
- 塚本勝巳, 梶原 武(1973) : 魚類の遊泳速度と遊泳能力, 水産土木, Vol. 10, No. 1, pp. 31-36.
- T.Tukamoto, T.Kajihara, M.Nishiwaki(1975) : Swimming Ability of Fish, Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries, 41(2), pp. 167-174.
- Videler,J.J(1993) : Fish Swimming ,Chapman & Hall,London,pp. 210-217.

琵琶湖から周辺低平地水路網へ遡上する魚類の行動

○室井洋佑*・宇波耕一*・河地利彦*

1. はじめに

琵琶湖周辺の低平地水田は、ニゴロブナやマナマズの産卵、仔稚魚成育の場としての機能を有するため、生態系に配慮した水利施設の設置、維持管理の重要性が認識されてきている。2001年度から2006年度に実施された滋賀県の「魚のゆりかご水田事業」においては、農業用排水路を階段状に堰上げる「排水路堰上げ式水田魚道」が数多く設置され、また、水田への親魚放流や減農薬農法のような地域での取り組みもなされている[1]。これらの営農者、集落レベルでの活動により、水田と排水路の落差解消の意義や魚類生育の場としての水田の機能が確認されてきたと考えられる。しかしながら、琵琶湖、内湖、流入河川、排水路網、水田から構成される連続した水系を回遊する魚類が対象である以上、より広域的な視点に立った合理的な生態系保全・修復戦略を構築していくことが必要である。ここでは、水利施設を設置して水田と水理的に接続した排水路へ、魚類が実際にどのような過程を経て遡上してくるのかを、2008年度に実施した調査の結果をもとに、水理・水文データと併せて検討する。

2. 対象地区の概要

2008年5月に、湖西地域北部に位置する滋賀県高島市今津町の低平地水田地帯において、琵琶湖と開水面が連続している農業用排水路に堰上げ施設を設置し、水田へ魚類が進入可能な状態にした。排水路は、コンクリート三面張り幅1600mmの比較的大規模なもので、後背地集落内の湧水が流入するため常時通水している。堰上げ施設は、間伐材を用いた越流堰4段を下流側に、下部の片隅に150mm×150mm程度の潜口を設けた透水性素材製の堰7段を上流側に配置して構成した。また、堰上げ施設の下流側に高さ20cmの落差工があり、その直下流に高さ10cmの堰板を挿入して落差を緩和した。排水路の下流端は、琵琶湖流入河川の一つである上郷(えいご)川に河口から500mの地点で合流している。上郷川の全長は5.0km、流域面積は8.0km²である。合流点と琵琶湖の間には、貫川内湖(南湖)があり、上郷川とはカルバートを通じて2か所(河口から120m地点と270m地点)で接続されている。また、河口から200m地点で、境川が合流している。写真1は、この対象地区全体の航空写真である。



写真1: 琵琶湖、内湖、河川、水路、水田からなる対象地区の全体

*京都大学大学院農学研究科，キーワード：魚類行動，生態系配慮型水利施設，降雨時系列，相関係数

3. 産卵期の魚類行動

琵琶湖に生息するニゴロブナは、産卵期の出水時に、湖岸のヨシ帯などへ移動して産卵する[2]。しかしながら、降雨、流れ場、水温など、様々な水理・水文要因のいずれに反応して行動しているのかについて十分な知見は得られていない。そこで、5月24日から25日にかけての出水時において、堰上げ施設へ遡上する魚類を観測し、水理・水文各項目の連続観測データと比較して考察する。実際には、下流側から二段目の越流堰を跳躍する魚類をビデオカメラで連続撮影し、ニゴロブナ各個体の跳躍時刻を記録して、単位時間ごとの遡上個体数に換算したものをデータとして用いる。降雨量についても、パルスロガーに接続した0.2mm転倒マス式雨量計のデータを単位時間あたりに換算する。また、

気温 T_a 、堰上げ施設の最下流部付近における水田からの排水の水温 T_p と排水路流水の水温 T_c 、貫川内湖(南湖)底層の水温 T_L 、湿度、貫川内湖(南湖)水位の琵琶湖基準水位からの偏差 h 、堰上げ施設直下流における排水路水深 d については、10分ごとに観測値をロガーに記録している。ただし、5月25日1時13分以降は、増水によって遡上魚類の確認が不可能となったため、魚類の撮影を中止した。以上の時系列データを図1に示す。なお、降雨量と遡上魚類個体数の単位時間は10分としている。気温、湿度、各水温、水温の空間的勾配に比べ、降雨量と流れ場の魚類遡上に対する影響が卓越していることが推測できる。以下では、最も単純化したモデルとして、降雨量のみから遡上魚類個体数が生成される入出力過程を考え、相関解析を行って検討する。

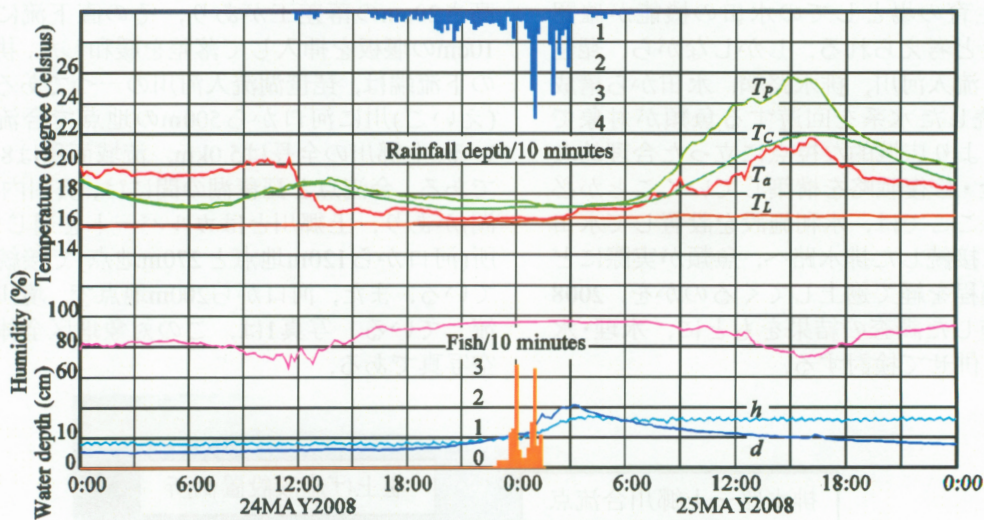


図1: 水理・水文ならびに接近魚類の時系列データ

4. 降雨量と遡上魚類個体数の相関解析

各時間ステップを t 、 t における単位時間あたりの降雨量と遡上魚類個体数をそれぞれ $r(t)$ と $f(t)$ で表す。遅れ時間を τ とし、 t と $t-\tau$ の両者が5月24日0時0分から5月25日1時13分の間となるような $r(t-\tau)$ と $f(t)$ について相関解析を行う。様々な時間ステップ間隔 Δt について相関係数が最大となるような場合を求めれば、表1のような結果となる。これより、排水路におけるニゴロブナは、降雨量の時間変化に呼応して、140秒程度の遅れ時間で遡上行動を行うことが推察できる。

5. おわりに

排水路に設置した堰上げ施設における調査により、降雨が直接的にニゴロブナの遡上行動へ影響していることが明らかとなった。琵琶湖から内湖、河川、排水路へ至る遡上行動の全過程を把握するため、より詳細な解析が必要である。

表1: 遅れ時間と最大相関係数

Δt (s)	τ	$\Delta t \times \tau$ (s)	最大相関係数
1	139	139	0.24
10	14	140	0.41
20	7	140	0.48
40	3	120	0.53
60	3	180	0.57
120	1	120	0.62
300	1	300	0.69
420	1	420	0.70
600	0	0	0.66

引用文献

[1] Unami, K., T. Kawachi, and K. Ishida: A mathematical model for ascending behavior of fish in agricultural drainage system, *Fish Passage - Models & Evaluation Session, Proc. of the 6th International Symposium on Ecohydraulics* (CD-ROM), 4p., 2007. [2] Yamamoto, T., Kohmatsu, Y., and Yuma, M.: Effects of summer drawdown on cyprinid fish larvae in Lake Biwa, Japan, *Limnology*, 7, 75-82, 2006.

小国川における鮎築の調査と水理基礎実験

山形大学大学院農学研究科 ○小川 亮・前川 勝朗・大久保 博

I. はじめに

鮎築とは産卵のために河川を降下する鮎を対象とした漁法であり、河川を堰き止め鮎を一ヶ所に誘導する「堰部」と、水を濾し鮎を捕獲する「魚取部」とからなる¹⁾。鮎築は河川を横断するため比較的規模が大きく、その起源は8世紀に遡る²⁾。また、魚取部上では容易に鮎漁の雰囲気を感じることから集客性が期待でき、観光施設に隣接して設けられているケースもある。一方で、鮎築に関する文献は少ない。本研究では鮎築の現地調査を行い、その形状などを把握すると共に、水理基礎実験により魚取部の流況特性を調べた。

II. 現地調査

調査対象とした小国川は、山形県東北部の最上町、舟形町を流れて最上川に合流する、流路延長 36.19km の一級河川である。鮎築は下流から順に、長者原(合流点から 2.8km に位置)、一ノ関、内山、大谷(Fig.1)、長尾、瀬見、大堀の7つが位置していた。築と築間の距離は下流側から順に 6.2、2.8、2.5、1.8、4.9、2.3(km) で平均は 3.4km である。光波距離計による現地測定の平面図と築の管理者に承諾を得て各築の申請図面を用いて検討を行った。

なお、長尾の築は2006年の調査時には損壊状態であった(Fig2)。聞き取り調査によって右岸側の魚取部が砂礫で埋没し、左岸側の堰部は流亡、滞筋は左岸側に移動、その後破損した魚取部は撤去された。聞き取り調査によると、このような滞筋の変化はこれまでもあり、左右岸の滞筋側に魚取部を設置してきたとのことであった。

魚取部の模式図を Fig.3 に示した。Fig.4 は縦軸に魚取部長 L_f (m)、魚取部勾配 I_s をとり、横軸に魚取部幅 B_f (m) をプロットしたものである。Fig.4 より、 B_f が大になるに伴い、 L_f は小になっていく。 B_f に L_f を乗じた値 A_f は 100 m^2 程度である。小国川では鮎築について協議する場があり、魚取部の A_f はおよそ同程度の値という事で、各築において漁獲量をほぼ同程度とする共通理解の上に $A_f \approx 100 \text{ m}^2$ としていると思われる。なお、落ち鮎の採捕時は出水時である。また、聞き取り調査によると B_f は通常は 8m 程度としているようである。



Fig.1 大谷の築 (A:魚取部、B:堰部)



Fig.2 長尾の築 右岸側下流から魚取部を撮影：砂礫で埋没

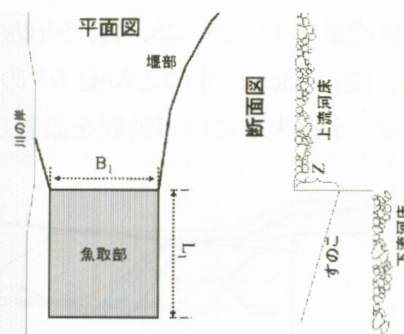


Fig.3 魚取部の模式図

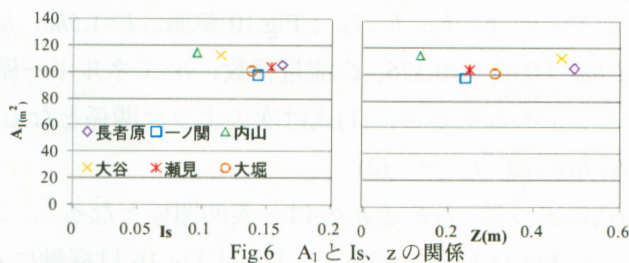
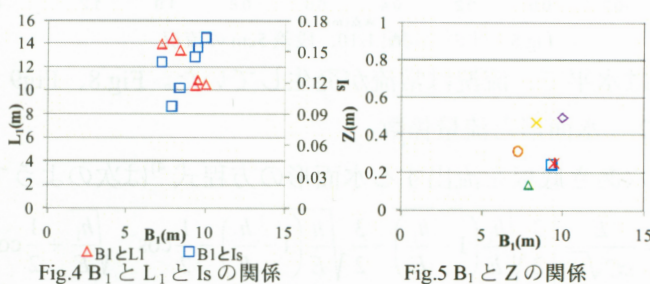


Fig.4の B_l と I_s の関係をみると、 B_l が大になるに伴い、 I_s は大になっていく。 I_s が大になることは L_l が大になることであろう。Fig.5は B_l と段差 z との関係であり、顕著な傾向は見られなかった。Fig.6は A_l と I_s 、 z の関係で、 A_l は I_s と z との関係で顕著な傾向はみられず平均すると $A_l \approx 105m^2$ であった。

このように、魚取部の長さ、幅、魚取部勾配、上流河床高との段差の間には相互の関係が見られる項目があった。なお、堰部の現地調査結果については略した³⁾。

Ⅲ. 魚取部の水理基礎実験(平水時)

1. 実験装置と実験方法

現地の魚取部を基にフルード相似で1/3縮尺の模型を製作し、水理基礎実験を行い2次元的な流況の把握を試みた。実験は山形大学農学部



Fig.7 実験の様子(Q=12ℓ/s、勾配 1/5、段差 15cm)

水理実験施設の木製長方形水路で行った。水路の中ほどには0.3mの段落部がある。水路幅は0.4m、段落部付近の両側壁は硬質アクリル板製である。この段落部に魚取部模型を取り付けた。模型の寸法は長さ1.35m、幅は現地での全幅の一部とし0.395mとした。1cm角の木材26本、5mm幅の木材を端に1本取付け、すのこの間隔は5mm間隔とした。すのこの始点の段差(上流水路床との差)を0、5、10、15(cm)の4組、流下方向のすのこの勾配0、1/20、1/10、1/5の4組、の組み合わせで16通り、実験流量を17、23、26、41、54(ℓ/s)の5組として実験を行い、その流況等を調べた。Fig.7はQ=12ℓ/s、段差15cm、すのこの勾配1/5の時の流況例である。なお、段落部からの下流水路長は約10mである。水路末端には可動堰を設置したが、本実験では堰高は0とした。魚取部模型の下流水路床勾

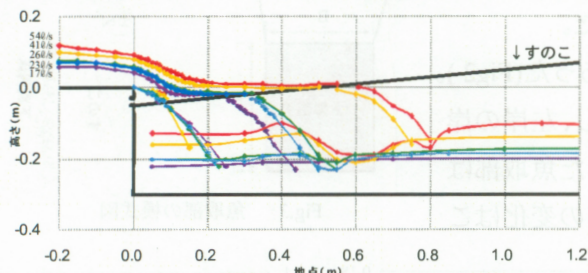


Fig.8 すのこの勾配 1/10、段差 5cm の流況

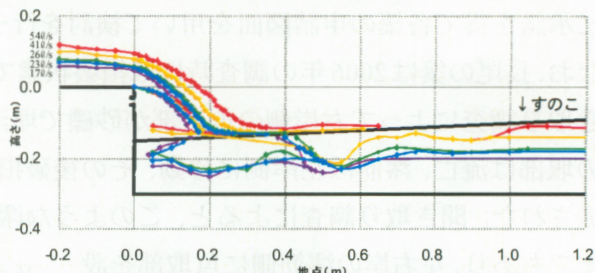


Fig.9 すのこの勾配 1/20、段差 15cm の流況

配は水平で、流況は常流が発生していた。Fig.8、Fig.9は実験流量の違いによる図である。

2. 水面形と流量係数

穴あき底板を流出する水面形の方程式⁴⁾は次のようである。

$$x = \frac{E}{\varepsilon C \sqrt{\alpha}} \left\{ \frac{3}{2} \sqrt{\frac{h_1}{E} \left(1 - \frac{h_1}{E}\right)} - \frac{3}{2} \sqrt{\frac{h}{E} \left(1 - \frac{h}{E}\right)} - \frac{1}{2} \cos^{-1} \sqrt{\frac{h_1}{E}} + \frac{1}{2} \cos^{-1} \sqrt{\frac{h}{E}} \right\} \quad \dots(1)$$

ここで、 x 、 E 、 h_1 、 h 、 l_0 : Fig.10 参照、 $E=1.5hc$ 、 hc :限界水深、 $\varepsilon: \Sigma b l_0 / (B l_0) \approx 0.325$ 、 C :流量係数、 α :エネルギー係数。ここで、 $h=0$ のとき $x=l_0$ とすると、(1)式は次のような関係となる (f :関数の意)。

$$l_0/E = f((h_1/E)^{1/2}) \quad \dots (2)$$

(2)式のように、 l_0/E と h_1/E は一義的関係となる⁵⁾。これを基に整理し

たのが Fig.11-Fig.16 である。Fig.11-Fig.16は縦軸に h/E をとり、横軸に x/E をとって、実験流量、すのこの勾配、段差 z (Fig.3 参照)の違いによる h/E と x/E の関係を見ようとしたものである。なお、 x 、

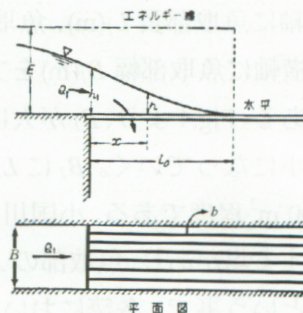
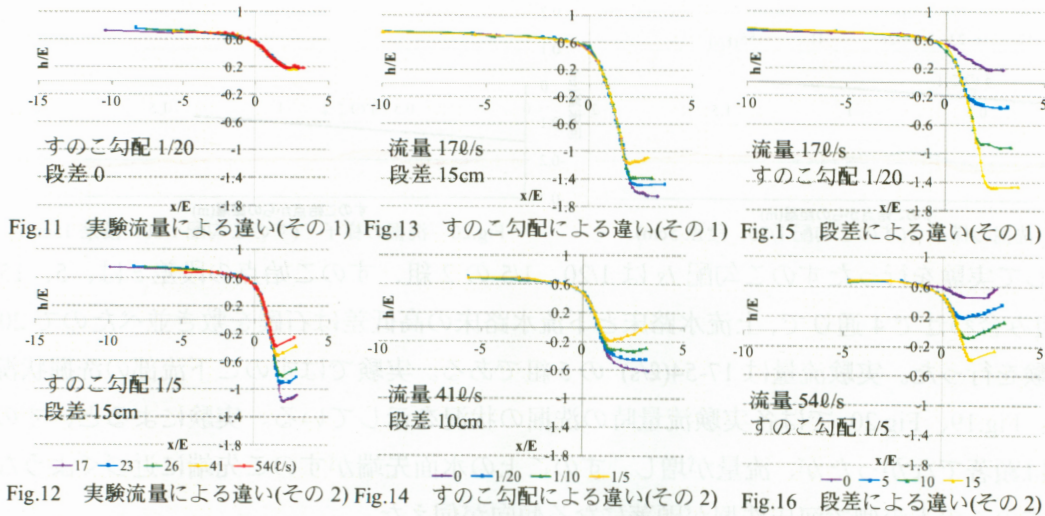


Fig.10 流れの記号 (b:すのこの隙間)



h は順にすのこ取付部の上流水路落ち口を基準 0 とした時の上下流への水平距離、上水路末端の落ち口底を 0 とした時の水深、 $E = 1.5h_c$ 、 h_c : 限界水深。

Fig.11 と Fig.12 を比べると、 $z=0$ の時、 x/E が 0 より幾分大となったところでの h/E の値は異なり、すのこ勾配 0 の時は落ち口で $h_1/E \approx 0.54$ であったがすのこ勾配 1/5 の時は $h_1/E \approx 0.59$ であった。ここで、 h_1 : 落ち口水深。 $z=0$ の時には落ち口の流れにすのこが影響しているといえよう。Fig.12 において x/E が 2.5 程度になると、 x/E の増に伴って h/E は大となるがこれはすのこ上に水があるためである。

Fig.13 と Fig.14 における落ち口の h/E の値は $h_1/E \approx 0.48$ であった。 x/E が 2.5 程度になると x/E の増に伴って h/E が大となるのはすのこ上に水がありすのこ勾配による違いである。Fig.15、Fig.16 は z による違いをみたもので、 $z/E=0$ における h/E の値は他と比べて大きい、 $5 \leq z \leq 15$ (cm) の値では h/E と x/E は一義的関係で、 x/E の値が 2.5 程度になると x/E の増に伴って h/E の値が変化する。これは z による違いである。このように、 x/E と h/E の関係をプロットすることによってすのこ上などの水面形の概観を把握できたように思われる。

(1)式において、穴あき板上の流れが消滅する $h=0$ の時の位置を l_0 とすると、流量係数 C について整理して、

$$C = \frac{E}{\epsilon_0 \sqrt{\alpha}} \left\{ \frac{3}{2} \sqrt{\frac{h_1}{E} \left(1 - \frac{h_1}{E} \right)} - \frac{1}{2} \cos^{-1} \sqrt{\frac{h_1}{E} + \frac{\pi}{4}} \right\} \dots (3)$$

(3)式において右辺の h 、 E 、 l_0 、 ϵ を与件とすると、 C の値が算出される。Fig.17 は縦軸に流量係数 C 、横軸に Z/E をとり l_5 毎にデータをプロットしたものである。

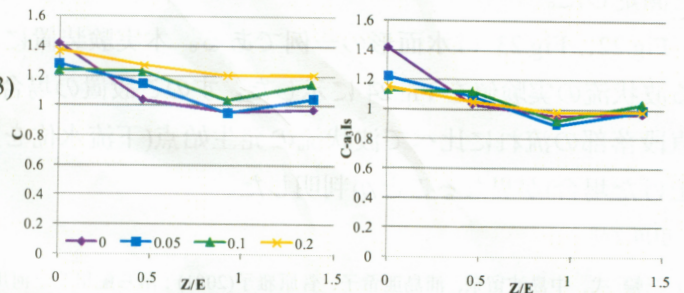


Fig.17 C と E/Z の関係(流量 230l/s) Fig.18 $C-a_3ls$ と E/Z の関係(流量 230l/s)

ここで、 Z/E が等しい C の値より、すのこ勾配 $1s$ に関するパラメータ a_3ls を算出した(a_3 : 係数)。両者の差を $C-a_3ls$ として Z/E との関係を示したものが Fig.18 である。両者にはほぼ一義的な関係が伺える。

3. 魚取部下部の洗掘について

Fig.7 に示したように、魚取部下流の流水は白濁し、水面形は変動している。魚取部下流の流れは魚取部下流の洗掘とも関係するので次のような方法で洗掘に関わる流れの様子を調べた。すのこ下部に平均粒径 6.7mm、90%粒径 9.8mm の石礫を水路全幅で厚さ 10cm、長さ 2.5m 区間敷き並べ

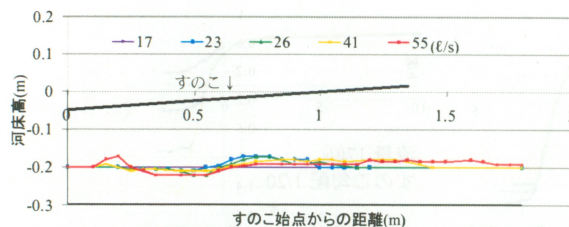


Fig.19 洗掘の様子 (すのこ勾配 1/20, 段差 5cm)

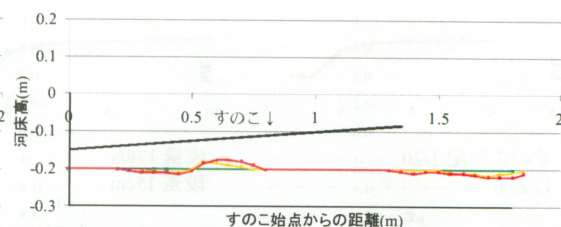


Fig.20 洗掘の様子 (すのこ勾配 1/20, 段差 15cm)

た。抽出して実験を行ったすのこ勾配 $1s$ は 1/20、1/5 の 2 組、すのこ始点の段差 z は、5、15cm の 2 組、の組み合わせで 4 通りで、上流水路床と下流水路床の高低差は石礫を敷き並べたので 20cm の状態で実験を行った。実験流量は 17-54(l/s) の 5 組である。実験ではすのこ下流部の洗掘状況などを調べた。Fig.19、Fig.20 では各実験流量時の洗掘の状況を示している。実験によると、すのこ下部の洗掘は顕著でなかったが、流量が増し、すのこ上の水面先端がすのこ先端に近づくような流れになるとすのこの下流側で河床洗掘が顕著になる傾向が伺えた。

IV. 魚取部の水理基礎実験(出水時)

出水時の流量は、小国川の計画高水流量とした。模型の縮尺は、フルード相似で 1/30 とした。実験は先述と同様の水路で、下流側に模型を取り付けを行った。すのこの寸法は、0.41m、幅 0.4m、隙間は無視し、平板とした。Fig.21 は記号の説明である。 hf_2 を 5、10(cm) の 2 組、流下方向のすのこ勾配 0-1/5 の 4 組、の組み合わせで 8 通り、実験流量 6-36(l/s) の 4 組として実験を行った。水路末端設置の可動堰高の操作により下流水位を変化させ完全越流、不完全越流における各水深などを測定した。

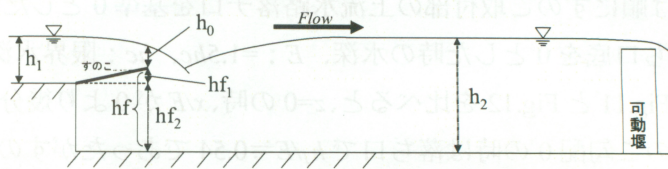


Fig.21 記号の説明

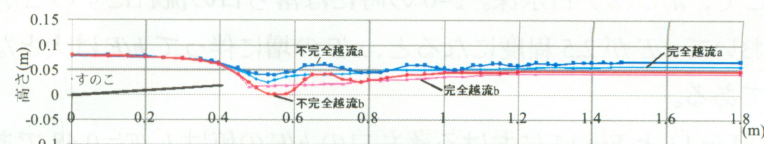


Fig.22 すのこ勾配 1/20, hf_2 10cm, 流量 12 l/s

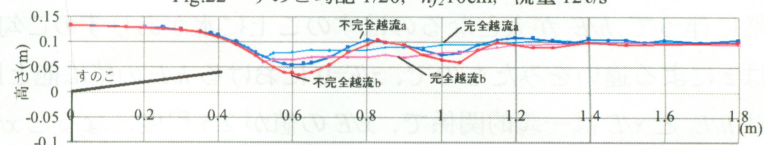


Fig.23 すのこ勾配 1/10, hf_2 10cm, 流量 24 l/s

Fig.22、Fig.23 は水面形の一例である。本実験装置における波状流の実験値を Fig.24 に示した。すのこ設置の場合、鉛直段落部の流れに比べて波状流の発生始点(下流水位を順次上げた場合)が異なることが判明した。

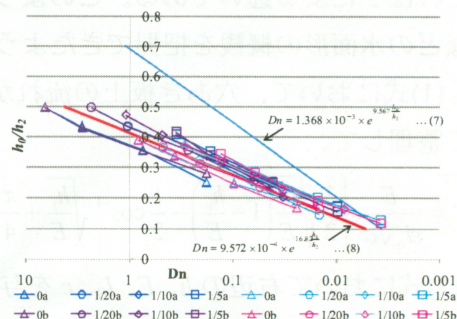


Fig.24 波状流と実験値

引用文献

- 1) 三輪 式、中島波留奈、浦島亜希子、菅原雅子(2001): 落ち鮎用築と河川砂礫堆との関係 農業土木学会誌、70 (5), pp.443-447
- 2) 吉野川やな漁保存会(奈良県): 記・紀の再現、伝統の「やな漁」復活
- 3) 前川勝朗、小川亮、大久保博(2006): 小国川における鮎築の構造について、平成 18 年度土木学会東北支部技術発表会講演概要集 II-1
- 4) 荒木正夫、椿東一郎(1962): 水理学演習(下巻)、森北出版社、pp.78-80
- 5) 小川亮ら(2008): 小国川における鮎築(魚取部)の水理基礎実験、平成 20 年度農業農村工学会大会要旨、pp.328-329
- 6) K.MAEKAWA(1968): The Fundamental Studies on the Dissipation of the Flow at the Straight Drops,山形大学紀要(農学), 5(4), pp.803-821

乱流中における異符号に帯電したコロイド粒子の凝集速度

The rate of turbulent heterocoagulation between oppositely charged particles

○小林幹佳*, 渡邊祐二*

Motoyoshi KOBAYASHI, Yuji WATANABE

1. はじめに

粘土や有機物といったコロイド粒子の凝集過程を理解することは、河口付近での濁質成分の輸送挙動の予測や水処理における固液分離プロセスの制御において重要となる。本研究では、異符号に帯電した粒子間の乱流ヘテロ凝集過程について検討するため、正に帯電する Amidine Latex 粒子と負に帯電する Sulfate Latex 粒子を採用し、攪拌乱流場における両粒子間のヘテロ凝集速度を測定した。

2. 理論

凝集が進むと粒子の数濃度が変化する。数濃度の変化は懸濁液の吸光度 E の変化に反映される。単分散状態にある球 S と球 A とのあいだの凝集初期段階を考えると、吸光度の時間変化 dE/dt は凝集速度定数 β_{SA} と式(1)で結びつけられる。

$$\beta_{SA} = \frac{1}{E_0} \left(\frac{dE}{dt} \right)_{t \rightarrow 0} \frac{(C_S X_S + C_A X_A)}{N_0 X_S X_A (C_{SA} - C_S - C_A)} \quad (1)$$

$$N_0 = N_S + N_A \quad (2)$$

$$X_A = N_A / N_0, X_S = N_S / N_0 \quad (3)$$

ここで E_0 は懸濁液の初期吸光度、 C_S と C_A はそれぞれ球 S と球 A の吸光断面積、 C_{SA} は球 S と A からなる二次粒子の吸光断面積、 N_S と N_A はそれぞれ球 S と球 A の数濃度である。式(1)より、凝集に伴う吸光度の経時変化を測定すれば、凝集速度定数を算出することができる。

3. 実験

3.1 試料

コロイド粒子として大きさが均一で球形のラテックス粒子 (IDC 製) を使用した。用いたラテックスの種類、表面電荷密度、直径、ヘテロ凝集実験時の数濃度を表 1 に示す。ヘテロ凝集実験時のイオン強度は KCl で調整し、7 つの濃度 ($1, 0.1, 1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-5}, 0 \text{ mol/L}$) で実験を行った。

3.2 乱流攪拌場

乱流は、吸光度測定用のプラスチックディスプレイ (光路長 1cm) 内にいれた懸濁液 2mL を攪拌すること

表 1 試料 (数濃度は KCl 溶液と混合後の値である)

種類	表面電荷密度 (C/m^2)	粒子直径 (μm)	数濃度 (個/ $c m^3$)
Sulfate	-0.07	2.8	1.75×10^6
Amidine	+0.43	2.8	1.75×10^6
Sulfate	-0.096	1.2	2.11×10^7
Amidine	+0.206	1.2	2.11×10^7

* 岩手大学農学部

* Faculty of Agriculture, Iwate University

キーワード: コロイド, 濁度, ヘテロ凝集, ラテックス, 相互作用

Key words: Colloid, Turbidity, Heterocoagulation, Latex, Interaction

により発生させた。攪拌はマイクロマグネティックスタラーを回転させて行った。スタラーの回転数は目盛りを最大にした状態（以下、攪拌強度 max）と半分にした状態（以下、攪拌強度 half）の2種類とした。

3. 3 乱流ヘテロ凝集速度の実験手順

Sulfate Latex 懸濁液, Amidine Latex 懸濁液, KCl 溶液をプラスチックディスポセル中で混合した。混合液を攪拌し、攪拌から 10 秒ごとに吸光度（波長 600nm）を分光光度計(U-1800 または U-1000, Hitachi)を用いて測定した。この一連の動作を総攪拌時間が 420 秒になるまで行った。同様の実験を KCl 濃度の関数として行った。なお、攪拌強度は max と half の2種類、粒子直径は $1.2\mu\text{m}$ と $2.8\mu\text{m}$ で実験を行った。今回の実験では、同径の異符号帯電粒子間のヘテロ凝集のみを対象とした。実験は全て室温（ 20°C ）で行われた。以上の実験により得られた吸光度 E の経時変化から式(1)により乱流ヘテロ凝集速度定数 β_{SA} を求めた。

4. 結果と考察

Fig. 2 に、実験結果から算出した乱流ヘテロ凝集速度定数 β_{SA} を KCl 濃度に対してプロットしたものを示す。図中の凡例の数字はラテックス粒子の直径を max, half は攪拌強度を表している。Fig. 2 は粒径が大きく攪拌強度が大きいほど、また KCl 濃度が低いほど、凝集速度定数が大きくなる傾向を示している。凝集速度定数 β_{SA} は KCl 濃度が 1×10^{-2} , $1 \times 10^{-3} \text{mol/L}$ で最小値をとった。このとき電気二重層 (EDL) は KCl の影響で圧縮し引力的 EDL の効果で促進されるヘテロ凝集の影響が弱められていると考えられる。さらに KCl 濃度が高くなると見かけの上で凝集速度定数が大きくなっている。これは EDL が一層圧縮されることによりヘテロ凝集だけでなく同一粒子間のホモ凝集も起きたためだと考えられる。

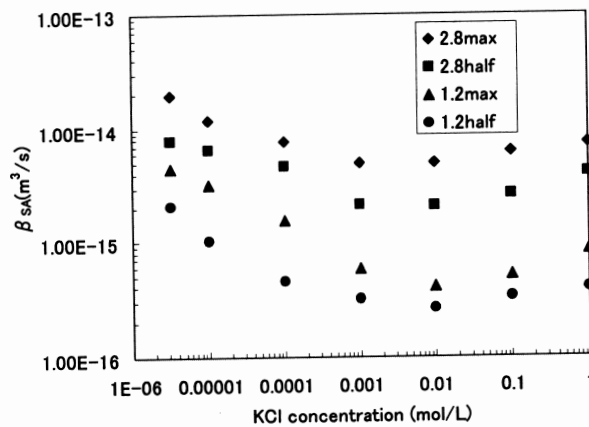


Fig.2 ヘテロ凝集速度定数 β_{SA} と KCl 濃度の関係

5. おわりに

乱流ヘテロ凝集速度について実験的に検討した。今回の実験から、粒径が大きく攪拌強度が強いほど、また塩濃度が低いほど凝集速度が速いという結果が得られた。今後は軌道理論等による理論解析を行う必要がある。

謝辞 本研究は文科省科研費 (18688013), 前田記念工学振興財団による支援を受けた。記して謝意を表す。

参考文献 小林・石橋 (2008) : 乱流中における凝集速度定数の吸光度法による評価, 農業農村工学会大会講演会要旨集, CD-ROM. Kobayashi, M (2008) Theor. Appl. Mech. Japan, 56, 267-272.