

令和 2 年 5 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03311

研究課題名（和文）溶存酸素動態を新機軸とする持続可能な河川ワンド環境のインテリジェントデザイン

研究課題名（英文）Scientific sustainable design of river embayment environment based on DO transfer mechanics

研究代表者

山上 路生 (Sanjou, Michio)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80362458

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,200,000 円

研究成果の概要（和文）：ワンド内へのDO供給源として気液界面とワンド開口部の2つに注目し、定量比較を行った。主流DOを極力良好なレベルに保つことが重要であることがわかった。濃度境界層厚さの空間変化式を導出した。これより境界層厚は主流の空間勾配と水面の乱流拡散係数/分子拡散係数比によって支配されることを突き止めた。乱流過生成やマウンド形成による主流の加速によって、大気からの酸素供給効率を増加させられることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ワンドやたまりに代表される閉鎖水域における物質輸送、さらには関連する諸現象の解明は水理工学に求められる重点研究項目である。基礎科学知見に基づいたDO輸送動態モデルの構築と持続可能な河川ワンドのインテリジェントデザインという未知の課題に挑戦する独創的な特進プロジェクトである。全体構想を着実に遂行するために、水路実験と野外観測における科学的知見によって強固な学術基盤を築く。これらの成果が得られれば、河川水理のガス輸送分野と河川環境工学に関する研究促進の突破口になり、環境水理学や応用生態学の進展に大きく貢献するものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We compared quantitatively two sources of DO into the embayment, in order to acquire basic knowledge for the scientific design. Then the DO level in the main-channel is found to play a key role to control the embayment DO level. Hence, Hence this project study lead theoretical equation of developing concentration boundary layer in open-channel flow, and we measured streamwise variation of concentration boundary layer thickness by using an extrafine needle-type DO probe. It suggested the local gas transfer is controlled by two significant terms, i. e., streamwise gradient of mean velocity and relative intensity of turbulence diffusion. Focusing on the open-channel flows including partly submerged strip roughness zone, we could explain formation mechanism of concentration boundary layer by comparison with the present theory. Therefore, turbulence promotion of permeable roughness and accelerating by contraction are found to increase locally DO level.

研究分野：水工水理学

キーワード：ワンド DO輸送 河川環境

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

河川中流域は人間の生活領域と密接するため、環境保全や親水性の必要性が見直されている。その一環として多様な生物空間の創出が各地の河川で検討されてきた。水生生物の生息には小さな流速の流れが必要であるが、ダム建設や堰および水制工の河川構造物の設置により流量が過小になり貧酸素化を招く。特にワンドやたまりなどの閉鎖水域は酸欠になりやすくこの保全や新規の創造においては溶存酸素の収支バランスを定量予測しなければならない。ワンドは淡水生物の生息環境としての役割をもつことから、人工的な建設や復元などの創出プロジェクトが全国的に推進されており、河川環境の向上だけでなく親水空間を通じての環境教育においても大きな役割を果たしている。このようにワンドゾーンは河川における多様な生態空間を提供することから、これまで数多くの建設・保全プロジェクトが進められてきた。一方で土砂によるワンド本体の埋没や交換口の堆積による水質悪化などの問題も生じており、いまだに根本的解決法は見いだせていない。

2. 研究の目的

溶存酸素 (DO) の輸送動態を新機軸とし、室内実験と野外観測から DO バランスに影響する各要因についてワンド環境へのインパクトを定量評価する。ワンドに代表される半閉鎖水域における DO の主な供給源である 1) 水面を介する大気からの輸送 (再曝気)、2) 主流からの流入輸送 に注目してこれらを議論するための理論導出も含めて、ワンドゾーンの科学知見にもとづくデザイン法を提案する。

3. 研究の方法

本プロジェクトでは、インテリジェントデザインを実現化するための基礎的知見を得るために、ワンド内への DO 供給源として気液界面とワンド開口部の 2 つに注目し、それらの定量的比較を行った。岐阜県自然共生研究センターの試験ワンドにて本プロジェクト開始以前から継続している DO モニタリング (文献 2 を参考) によって、低水路との開口部の閉塞の有無が DO 値に及ぼす影響を調べた。その結果、閉塞状態の方がワンド内は低 DO レベルとなった。現地観測で得られた傾向をより詳細に科学的に分析するために、京都大学乱流水理実験室の 40cm 幅水路を用いて実験を行った。正方ワンドを対象に、ワンド開口部の大きさや位置を変化させた。水路はタンク状態となっており、まずはポンプを止めて脱気させる。また初期時間に開口部をしきり板で低水路と隔離した。水流発生と同時にしきり板をはずし、DO 計で DO の回復状況をモニタリングした。回復率をケースごとに比較した。その結果、界面よりも主流からの供給がワンド内 DO を支配することがわかった (次節参照)。特に開口部長が全ワンド長の 1% でもあれば、界面輸送はあまり重要でなくなる。

以上より、ワンドそのものの設計よりも主流 DO を極力良好なレベルに保つことが重要であることが認識された。そこで 2 次元開水路を対象とした濃度境界層の輸送方程式を展開し、濃度境界層厚さの空間変化式を導出した。これより濃度境界層厚は主流の空間勾配と水面近傍の乱流拡散係数 / 分子拡散係数比によってコントロールされることを突き止めた。

同一流量条件であれば、沈水型植生による水面での乱流過生成やマウンド形成による主流の加速が境界層厚さを減少させて、大気からの溶存酸素供給効率を増加させることができる。

4. 研究成果

1) ワンドの二重 DO 供給構造に関する成果報告

DO 回復実験では主流は飽和させ、ワンド域のみ脱気させておく。仕切り板を引き抜いた時刻を $t=0$ とする。脱気剤が完全に消費されるまで DO は初期値からほとんど変化しない。ここで DO が上昇する開始する時刻を T_{lag} とする。また飽和に要する時間スケールとして

T_r を定義する． T_r はEXP関数を実測値にフィットさせて求める．

図-1は断面平均流速 $U_m=40\text{cm/s}$ のケースを比較する．参考として主流との交換がなく流れもない完全に隔離したワンド ($\Delta=0$) の結果も併示する．まず土砂堆積を想定した完全隔離では界面における分子拡散のみのDO供給であるから回復には50時間程度と長い時間を要する．一方で開口度が大きいほど短時間で回復する．また交換開始からDO上昇開始までの T_{lag} も小さいことが確認できる．ただし染料濃度と異なり大気からの供給が存在し，これはワンド内の循環や界面発散に依存する．ここで得られた回復特性は主流からの供給と界面供給の両者の合算であることに注意を要する．

図-2は隔離ワンドの回復時刻 T_c に対する T_r の比を整理したものである．なお T_c は隔離ワンド条件における式(2)より評価した T_r である．開口部長さが15%以上になると主流速に関係なく閉塞ワンドの2%程度の時間で回復する．また開口部長がわずかに1%程度でも閉塞時に比べて回復時間は15~20%と大きく短縮される．

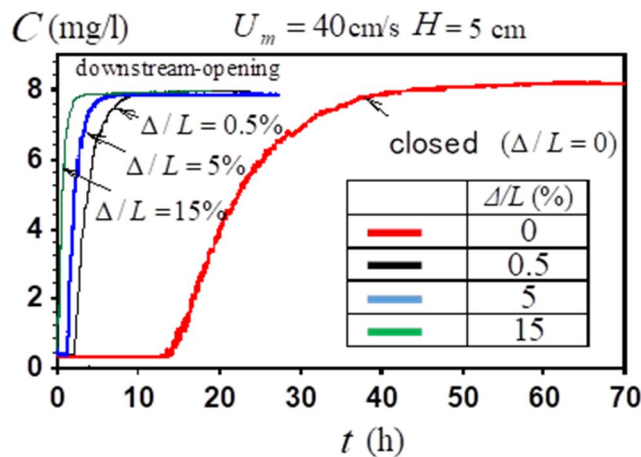


図-1 溶存酸素濃度の時間回復

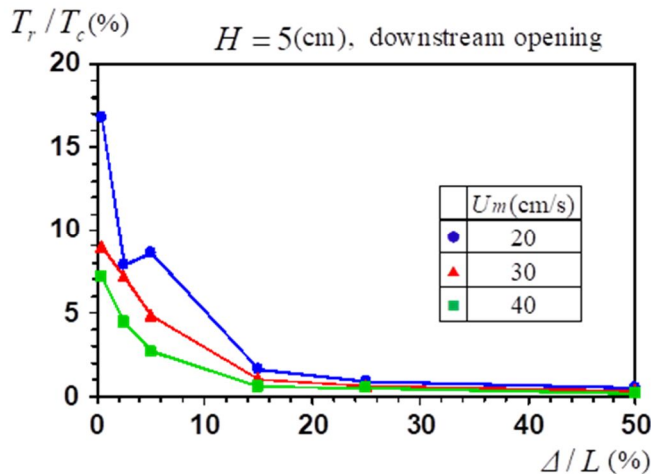


図-2 開口率による回復率の比較

2) 直線開水路の濃度境界層厚の理論展開と考察

図-3の直線水路に，植生粗度を部分設置して粗度急変流を再現した．植生部では植生高さより下層では主流が減速される一方で植生高さから水面にかけての上層では加速する．実験ではPIVによる流速計測と，脱気状態からの回復期におけるガス濃度境界層厚の主流方向分布を極細DOプローブで計測した．詳細については文献1)を参考にされたい．

また溶存ガス濃度の輸送方程式より，濃度境界層厚(ガス輸送速度の逆数に対応)に関す

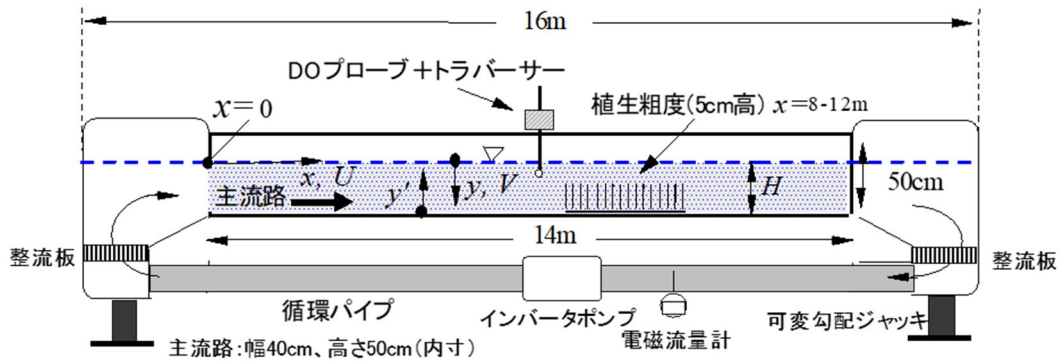


図-3 濃度境界層厚さの実測に用いた粗度急変水路

る次の微分方程式を導出した．右辺第 1 項が主流の加速効果，第 2 項が乱れによる効果を示す．本研究では B 内の乱流拡散係数 D_t は，実測した左辺と右辺第 1 項より評価した．

$$\frac{\partial \delta}{\partial x} = A(x)\delta + B(x)\delta^{-1} \quad (1)$$

ただし，

$$A = -\frac{\partial U_s}{\partial x} \left(1 - \frac{2}{e}\right) \frac{1}{C_o U_s} \quad (2)$$

$$B = \frac{1}{C_o U_s} \left\{ \left(1 - \frac{1}{e}\right) D - \frac{1}{e} D_t(\delta) \right\} \quad (3)$$

図-4 は急変粗度ケースにおける界面近傍の流速および乱れエネルギー k_s の流下方向変化である． $x/H = 53$ までの平坦床流れに比べて $x/H = 60$ から下流の粗度領域では U_s が大きく増加していることがわかる．また平坦床領域では流下につれ U_s は微増するのに対し，植生領域では U_s はほぼ一定の値を示す． k_s については，平坦床領域 ($x/H = 40 \sim 53$) ではほぼ一定であるが植生領域にはいると $x/H = 60$ で微増し，その後流下とともに大きく増加する．このことから植生先端で生成された乱れが水面に輸送されるまでにある程度の距離が必要であると考える．

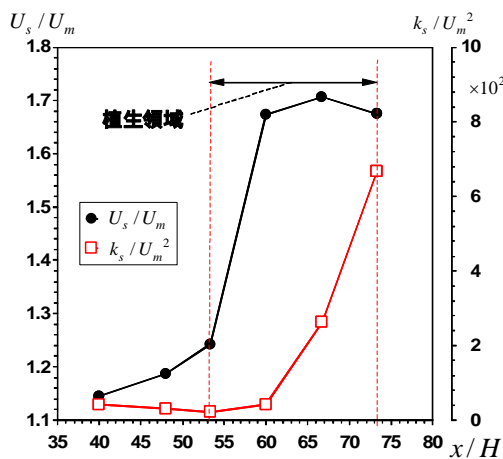


図-4 主流速と乱れエネルギーの流下変化

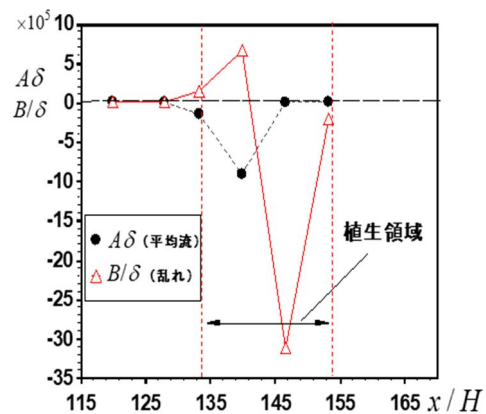


図-5 A 項, B 項の空間変化

この現象をより詳細に考察するために式(1)をもとに平均流と乱れのガス輸送への寄与を考える．改めて式(1)の $A\delta$ は表面流速の流下方向変化 $\partial U_s / \partial x$ ， B/δ はそれぞれ分子拡散と $y = \delta$ における乱流拡散のバランスを表す項である．つまり δ が流下につれ減少する要因として， $\partial U_s / \partial x$ の増大と乱流拡散の影響が挙げられる．図-5 に $A\delta$ と B/δ の流下方向変化を示

す。先に述べたように植生粗度区間では主流速の変化に続いて乱れの増加が生じる。まず植生粗度領域に遷移した直後 ($x/H = 53\sim 60$) では、界面における乱れエネルギー k_s が相対的に小さい一方で、 U_s の x 方向変化が大きい。すなわちこの領域では式(1)において平均流項が乱れ項よりも卓越し、主流速の変化 ($\partial U_s / \partial x > 0$) に対応して δ が減少を開始する。さらに下流の領域 ($x/H = 60\sim 73$) では、 U_s の変化が小さくなる一方で、界面における乱れエネルギー k_s が増加して乱流拡散係数 $D_t(\delta)$ が分子拡散係数 D よりも卓越し δ の減少が進むと考えられる。ピークの絶対値については平均流項よりも乱れ項の方がおよそ3倍にもなり、平均流の空間変化よりも乱流生成の方がガス輸送に果たす役割が大きいといえる。

3) DO 動態を考慮したワンドのインテリジェントデザイン

以上より生化学反応を考えない場合、主流の DO 値がワンド内 DO を支配すると思われる。また本理論より再曝気効率は加速や乱れ生成によって局所的にコントロールが可能のため、開口部付近に流れの加速ゾーンを設けることで効率が上昇する。ただし現地では種々の不確定要素があるため、土砂や植生管理は合わせて行う必要がある。

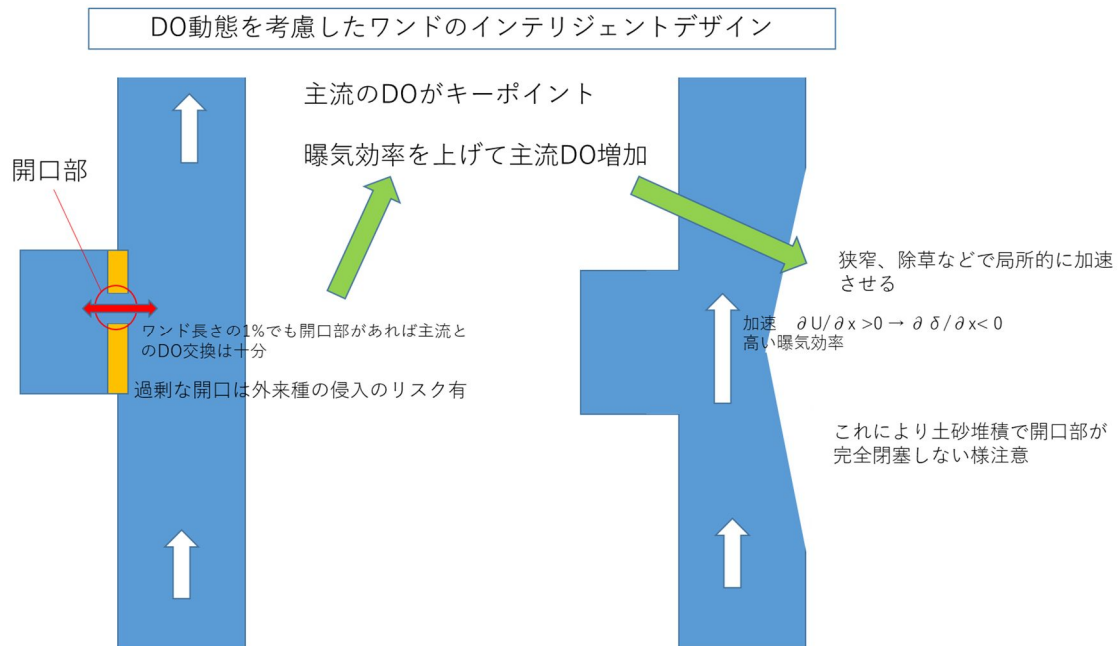


図-6 DO 動態を考慮したワンドのインテリジェントデザイン

参考文献

- 1) 山上路生・岡本隆明：開水路乱流における局所ガス輸送特性に関する基礎的研究，土木学会論文集 B1, Vol.75, No.1, pp.100-111, 2019.
- 2) Sanjou, M., Okamoto, T. and Nezu, I.: Dissolved oxygen transfer into a square embayment connected to an open-channel flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, Elsevier, Vol.125, 1169-1180, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Sanjou, M. and Okamoto, T.	4. 巻 USB-ROM
2. 論文標題 D0 transfer in Side-cavity connected to Straight Open-channel	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. Annual conference of engineering and applied science 2018	6. 最初と最後の頁 425-431
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 山上路生、磯部駿佑、重田明日香、岡本隆明、戸田圭一	4. 巻 38
2. 論文標題 自動水文観測を実現するロボット流速・流量計の2研究 - 中小直線河道における実証試験 -	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 自然災害科学	6. 最初と最後の頁 87-97
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nagayama S., Nakamura F	4. 巻 19(1)
2. 論文標題 The significance of meandering channel to habitat diversity and fish assemblage: a case study in the Shibetsu River, northern Japan	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Limnology	6. 最初と最後の頁 7-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 永山滋也・加藤康充・宮脇成生・原田守啓・萱場祐一	4. 巻 21(2)
2. 論文標題 イシガイ類に着目した河道内における氾濫原水域環境の汎用的評価手法の検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 応用生態工学	6. 最初と最後の頁 135-144
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto, T. and Sanjou, M.	4. 巻 S8-10-2
2. 論文標題 Effect of aquatic vegetation on gas transfer velocity in open-channel flows,	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of 12th ISE 2018 Congress, Tokyo	6. 最初と最後の頁 USB
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sanjou, M., Okamoto, T. and Nezu, I.	4. 巻 11
2. 論文標題 Experimental study on fluid energy reduction through a flood protection forest	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J.Flood Risk Management	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1111/jfr3.12339	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sanjou, M. and Nagasaka, T.	4. 巻 53
2. 論文標題 Development of autonomous boat-type robot for automated velocity measurement in straight natural river	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Water Resources Research	6. 最初と最後の頁 9089-9105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1002/2017WR020672	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Sanjou, M., Nezu, I. and Okamoto, T.	4. 巻 29
2. 論文標題 Surface velocity divergence model of air / water interfacial gas transfer in open-channel flows	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 45107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1063/1.4981228	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 岡本隆明、山上路生、檀原義信	4. 巻 74
2. 論文標題 橋脚周辺における流木の3次元的集積に関して	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 水工学論文集	6. 最初と最後の頁 i_673-678
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sanjou, M., Okamoto, T. and Nezu,	4. 巻 125
2. 論文標題 Dissolved oxygen transfer into a square embayment connected to an open-channel flow	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 1169-1180
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Sanjou, M.
2. 発表標題 D0 transfer in Side-cavity connected to Straight Open-channel
3. 学会等名 Annual conference of engineering and applied science 2018, Osaka (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永山滋也
2. 発表標題 「木曾川ワンド・たまりにおけるイタセンパラ稚魚の環境DNA検出精度の検証」
3. 学会等名 第1回環境DNA学会、東京
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nagayama S.
2. 発表標題 Reasonability of cyclic floodplain rejuvenation for strategic biodiversity conservation in Japanese lowland rivers
3. 学会等名 2th International Symposium on Ecohydraulics (ISE2018). Tokyo.
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山上路生
2. 発表標題 Recent works of hydraulics laboratory in Kyoto University
3. 学会等名 YTU-MES-JSCE joint seminar 2017, Yangon (招待講演) (国際学会) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山上路生
2. 発表標題 Experimental study on drag force and pitching moment stability of drifting object
3. 学会等名 International Symposium on Engineering and Applied Science, Osaka (国際学会) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岡本隆明
2. 発表標題 橋脚周辺における流木の3次元集積に関して
3. 学会等名 2018年度水工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 永山滋也
2. 発表標題 Seasonability of cyclic floodplain rejuvenation for biodiversity and flood management in Japanese lowland rivers
3. 学会等名 14th Asian Wetland Symposium (AWS2017); Wetlands for Sustainable Life -. Saga (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永山滋也
2. 発表標題 “木曽川の歴史を踏まえ今できること、今後やれること”
3. 学会等名 応用生態工学会名古屋 フィールドシンポジウムin木曽川「河川環境の保全・再生を目指して」. 応用生態工学会名古屋支部 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 永山滋也
2. 発表標題 “河川，都市，農地における淡水生物保全の事例”
3. 学会等名 2017年度日本魚類学会年会シンポジウム「淡水魚保全における河川行政との連携」. 日本魚類学会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大石哲也
2. 発表標題 洪水時における礫州上への種子着床に関する検討
3. 学会等名 平成29年度全国大会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大石 哲也
2. 発表標題 河川植生の維持管理～基本と実践～
3. 学会等名 第53回水工学に関する夏期研修会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大石 哲也
2. 発表標題 洪水に伴う礫州内への種子供給と土砂移動特性の関係性とそれが初期の植物相に与える影響について
3. 学会等名 河川環境保全を力学的視点から考える集い(招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	原田 守啓 (Harada Morihiro) (00647042)	岐阜大学・流域圏科学研究センター・准教授 (13701)	
研究分担者	永山 滋也 (Nagayama Shigeya) (70540558)	岐阜大学・流域圏科学研究センター・研究員 (13701)	
研究分担者	岡本 隆明 (Okamoto Takaaki) (70599612)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	大石 哲也 (Oishi Tetsuya) (10355886)	国立研究開発法人土木研究所・土木研究所（つくば中央研究 所）・研究員 (82114)	