

令和7年度 河川砂防技術研究開発公募 地域課題分野(河川生態) 研究開発テーマ
＜一般研究:事後評価結果＞

テーマおよび概要		研究代表者名	評価	審議結果
テーマ	流況変化に対する河川－海洋沿岸生態系の応答:狩野川水系における解明と生態系保全策	静岡大学 塚越 哲	A	研究目的は達成され、 十分な研究成果があった。
概要	年間降水量が2000mmを超える伊豆半島を集水域とする狩野川を対象に、大規模出水が河川中・下流域と河口、および河口沿岸の生態系に与える影響を中流に設けられた放水路の開閉との関連を併せて明らかにする。			

評価の凡例

- A: 研究目的は達成され、十分な研究成果があった。
- B: 研究目的は概ね達成され、研究成果があった。
- C: 一定の研究成果があった。
- D: 研究成果があったと言い難い。

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

① 研究代表者		氏 名 （ふりがな）	所 属				役 職	
		塚越 哲	静岡大学 理学部				教授	
② 技術研究 開発テーマ	名称	流況変化に対する河川－海洋沿岸生態系の応答:狩野川水系における解明と生態系保全策						
③ 研究経費 （単位：万円）		令和1年度	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	総 合 計
	※端数切り捨て。	500	1,499	1,499	1,499	1,499	1,499	7,495
④ 研究者氏名 （研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）								
氏 名		所属機関・役職（※令和7年3月31日現在）						
知花 武佳		政策研究大学院大学・教授， 河川学						
森 康二		（株）ブルーアースセキュリティ取締役,シミュレーション						
宗林 留美		静岡大学・准教授， 水圏生化学						
加藤 憲二		静岡大学・名誉教授， 特任教授，水圏微生物生態						
東城 幸治		信州大学・教授， 水生昆虫の分子生態						
徳岡 徹		静岡大学・准教授， 河畔林の植物生態						
佐藤 慎一		静岡大学・教授， 沿岸堆積物と二枚貝の生態						
日下部 誠		静岡大学・教授， アユの塩分耐性機構						
岩田 智也		山梨大学・教授， 物質循環と沿岸生態系						
⑤ 研究の目的・目標 （様式地生-1， 地生-2に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。） 放水路を有する河川は全国に数多く存在するものの，その開閉が河川や沿岸の生態系機能にどのように影響を与えているのかについての知見は極めて乏しい． 狩野川放水路によるピークカットが50余年を経て下流生態系にどのような影響を与えたか． また近年多発する豪雨イベントに伴う放水路の開閉が河川環境や生物群へのどの程度の影響を与えるのか，また河川の流量調節が沿岸生態系へのどのような影響を与えているかを押さえることが，水災害の多発に認められるように今日の気候変動下にある河川管理の上でも喫緊の課題となると考え， 具体的な内容は2019年度の申請時に以下のような目標の項目立てを行った．								
1. 50余年経過した放水路（バイパス）がもたらす生態系影響評価 ① 河川における動物の移動・分散および流域における植生の侵入・喪失を推定する． ② 放水路口（江浦湾）における貝類等の生息状況から放水路の長期影響を推定する． ③ 過去の資料と現場観測により，流況調整による河川構造の変化を分析する． 2. 豪雨イベントの直接影響評価 ④ 水位変動予測モデルを作成し，降雨パターンと河床形態の関連を見出す． ⑤ 水位変動に対する底生動物の応答および出水時のアユが受ける生態的影響を見出す． ⑥ 降雨イベントと河川水質の関係，並びに湧水の河川および沿岸環境への関与を示す．								

3. 沿岸生態系への影響評価

- ⑦ 水位変動が本川河口部および沿岸部のメイオベントスに与える影響を示す。
- ⑧ 河川水量の変動を受けて、生産力から見た沿岸生態系の応答を示す。

なお用いられた方法や引用された文献については方法が多岐にわたるため別添内部資料を参照されたい。

⑥ 研究成果

狩野川という川は放水路という機能を付加したことによってどのように変わったかをいくつかの観点から考察した。それらをすべて繋ぐことはとてもできないが、いくつかの nexus は見えてきた。たとえば、

- ・火山地帯を流れる狩野川はリンやケイ素などの栄養塩が豊富で、流量は小さいものの駿河湾沿岸生態系の一次生産から生態系へまで影響を及ぼしていることが確認された。また影響は豪雨時に増大するであろうことを直接示すデータが得られた。駿河湾沿岸生態系の一次生産力を維持する目安となる水量も検討された。
- ・放水路分派点を境に河川水の流速は放水路上流側で加速し下流側で減速することや、放水路が開放されるとそこに向かった強い流れが生じ、流路に洗堀も認められることがシミュレーションされた。描かれた水深は実測と差異はなかった。
- ・流速が大きく河岸が侵食されやすい場合には草本類ではなくメダケが生育する傾向が認められるが、経年的には放水路下流側で河道の縮小とメダケ群落の増大が認められた。メダケ群落の増大は生態系を構成する生物群集の多様性に影響する可能性があるとともに、河岸ではその根圏に土砂を堆積させる可能性があり、生物が河道の形状に影響を及ぼす可能性が推測された。
- ・放水路は河道が大きく湾曲する箇所に作られたため、主に表層水は直線方向の放水路に流出し、河床の土砂含む水が本川へ流れることになる。その結果、放水路出口の江浦湾には浮遊する落葉などの有機物が一気に運び込まれ海底に堆積している。これが微生物分解を加速し、自然とは違った還元的な黒色汚泥の堆積物が江浦湾内に広がっている。出水時の放流の影響を低減させる方策が求められる。
- ・また、出水は河口海浜の粒度組成に変化をもたらし、そこに生息する底生動物の群集組成にも影響することが示された。

以下に各項目での成果を、I. 狩野川水系の物理化学的特徴、II. 生物から見た狩野川水系、III. 狩野川が沿岸生態系へ及ぼす影響 の三つの観点から報告するとともに、該当する目標事項の番号を記した。

I. 狩野川水系の物理化学的特徴

1. 狩野川の構造 ③

狩野川は天城山系から伊豆半島を北上し沼津市街地を経て駿河湾に注ぐ一級河川である(図1)。狩野川を河川工学的に見た知見と生物現象の場としての狩野川を繋ないでゆく一つの方策として、まず縦断勾配と特に河床粒径に着目してセグメントの整理を行なった。その要点を以下に列記する。



図1. 狩野川中下流概

- ・狩野川流域の大半は、新第三紀中新世に噴出した安山岩等の上に、第四紀チバニアン期に噴出した安山岩が覆い被さった状態であるが、黄瀬川及び柿田川は富士山の三島溶岩（第四紀完新世，10170–9360 年前）を流下してくる点で特徴が異なる。これらの支川の顕著な違いは、その縦断面形に加え、黒色発泡岩片の占有率に見られ、今後流域間での土砂流出量の比率をみる指標となる可能性がある。
- ・縦断勾配に基づきセグメントを表 1 のように整理し（括弧内は河口から計測した距離），セグメントごとに粒度組成の特徴を分析した。その結果，2-2-②は 10 mm 以上の材料があまり見られず 0.2～3 mm が主体，2-2-①は 0.5～20 mm が主体，2-1-①と②は前者に河原がみられるのに後者でみられないなどの河床形態の差はあるが，粒度は似ており，主に 10～80 mm を主体とし，1～10 mm が局所的にまとまって堆積することもある。一方，110 mm 以上は上流からほとんど流下してこない。セグメント 1 は，上流端部では 2～800 mm という我が国の扇状地河川でもトップレベルの粒度幅となるが，下流端部までに 400 mm 以上が見られなくなり，上述した通り 110 mm 以上は下流へと流れていない。
- ・セグメント M-2 はセグメント 1 とほぼ同じ粒度であるが，セグメント M-1 から 80 cm 以上のものはほとんど流下してこない。そしてセグメント M-1 は 2 m 近い巨礫から砂まで幅広い粒度となる。
- ・メダケによる樹林化が顕著であったのはセグメント 2-1-②と 2-2-①であり，放水路による流況変化と，粒度や河道形状等の河道特性とが複合的に影響した結果である。

表 1. 本研究で提案する山間部も含めた狩野川のセグメント区分

河口からの距離（距離標）	上流端	セグメント区分
0～9 km	徳倉山の水衝部	セグメント 2-2-②
9～11(12.2) km	大場川合流点	セグメント 2-2-① (2-1, 2-2 移行帯)
11(12.2)～16.1(17.3) km	守山の狭窄部	セグメント 2-1-② (2-1, 2-2 移行帯)
16.1(17.3)～22.2(23.8) km	城山の水衝部	セグメント 2-1-①
22.2(23.8)～26.2(27.8) km	修善寺橋の狭窄部	セグメント 1
26.2(27.8)～39 km	猫越川合流点	セグメント M-2
39～48.5 km	本谷川 沢合流部	セグメント M-1-② (41.5 km 付近に浄蓮の滝)
48.5 km～	水源	セグメント M-1-①

2. 放水路による河床と流れの変化 ③

・本節では，狩野川中下流域の 1959 年から約 60 年間の河道形状変化を分析した結果，放水路の建設がもたらした洪水分派による流量減少への応答は，セグメントごとに異なっていた。図 2 に 1959 年から 2019 年までの最深部河床高の縦断面プロファイルを示した。1970 年から 1980 年にかけて，狩野川中下流域の河床高はほぼ全域的に 1～2m 低下した。これは，狩野川中下流域に流入する土砂の量が減少していることを示唆している。放水路分派点の直上流で河床低下がみられなかったのは，放水路分派の際に掃流力が落ち，土砂が局所的に堆積するからと考えられる。

・次に，分派点から勾配変化点となる河口 11 km 地点（距離標 12 km）周辺まで（セグメント 2-1-②）の河道形状変化を考察した。もともとの河道の大きさは，分派点上流の平均年最大流量に相当する 900 m³/s 程度であった。しかし放水路の建設後は，その分派によって 500 m³/s 程度まで小さくなった。解析結果からは，洪水は河道の全幅を流れず，その一部に集中して流れることが推測された。同時に，さまざまな原因から土砂の供給量が減少し，河床高が局所的に低下した。一部分が河床低下することで，低水路内に比高差が生じ，土砂の堆積と高水敷化が進んだ。現在では，メダケなどの植生繁茂も相まって，河岸の土砂堆積が進み，深く狭い河道が形成されている。

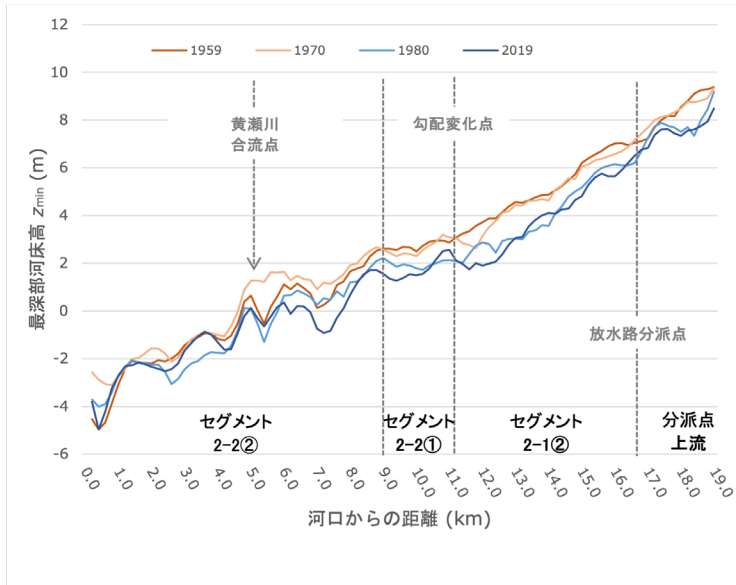


図2.最深部河床高の変化.

- ・一方でセグメント2-2-① (2-1②から徳倉山の水衝部付近まで)では、1970年から1980年に河床の全体が低下し、元の高水敷の比高差が増大したことで、1980年からは高水敷への土砂堆積が進み、結果として川幅が徐々に縮小していた。
- ・セグメントごとの河川環境特性に合わせて計画を検討する重要性が再認識された。

3. 地表水—地下水交換フラックスから読み解く狩野川流域の水の動き ④

- ・地表水、地下水の同時流れを考慮する統合型流域モデリングにより、狩野川流域の地表水—地下水交換フラックスを解析し、豪雨時と平常時の狩野川水系における水の動きの比較検討と放水路による洪水コントロールの影響を可視化した (図3)。
- ・地表水—地下水交換フラックスの解析には数値シミュレータHydroGeoSphere (カナダ, Aquanty社製, HGS) を適用し、放水路周辺に着目した詳細な河道スケールと流域全体を対象とした流域スケールの二つのモデルを構築した。
- ・河道スケールモデルでは地表水と地下水の経時的な交換の様子が可視化され (図3), 豪雨時 (10月12日15:00) には河道を越えた広範な範囲への雨水の地下浸透が推定された。地下浸透した水は豪雨が治った数時間ののち地表へと流出した (10月13日14:00)。

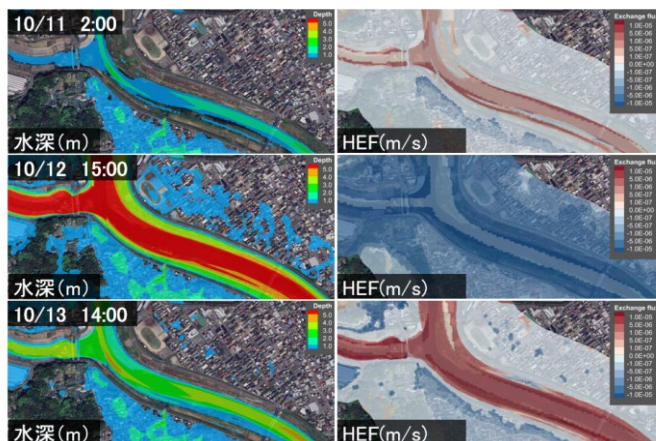


図3. 2019年10月12日に伊豆半島に上陸し、湯ヶ島観測所での72時間降水量が760mmに達した台風19号(Hagibis)のデータによりHGSでシミュレートした結果。左が水深、水色が1m、赤が5m以上を示す。右は同時刻の地表水—地下水交換フラックス。えんじ色が湧出を、青色が浸出を示す。

・放水路開放時には河道地形も影響して左岸側で最も深い滞筋を経由して放水路へ流出する挙動を解析した。この滞筋の最深部は、水中ドローンでの実測からも確認された分派点直前の洗堀箇所と合致し、周辺部より2mほど深掘りされていることが実測により確認され、HGSシミュレーションの精度が保証された(図4)。

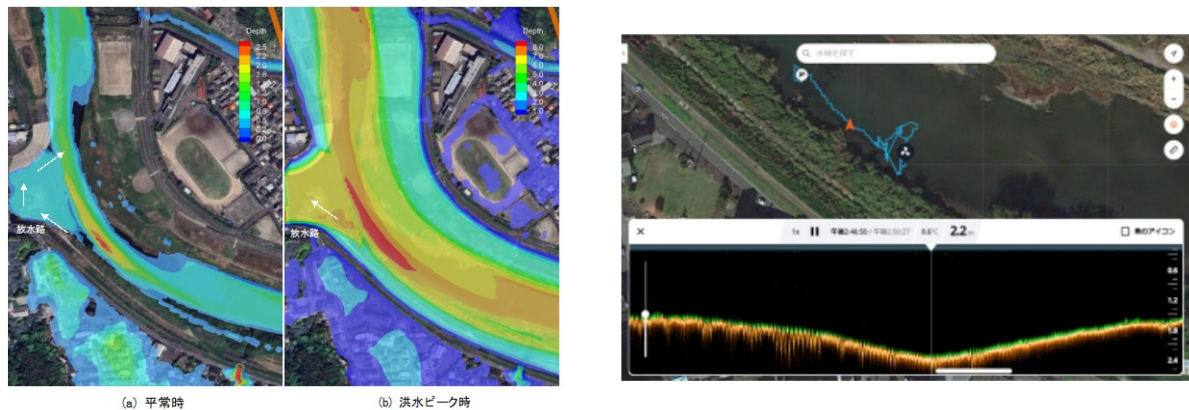


図4. 平常時と洪水ピーク時の放水路分派点近傍の水深の変化(左図)と洗堀箇所の水深計測結果(右図)。

・また、河川流況を可視化する流跡線や流速ベクトルからは、草本類が定着しにくい流れの早い水際へのメダケ群落の形成への関与の可能性が示唆された(図5)。

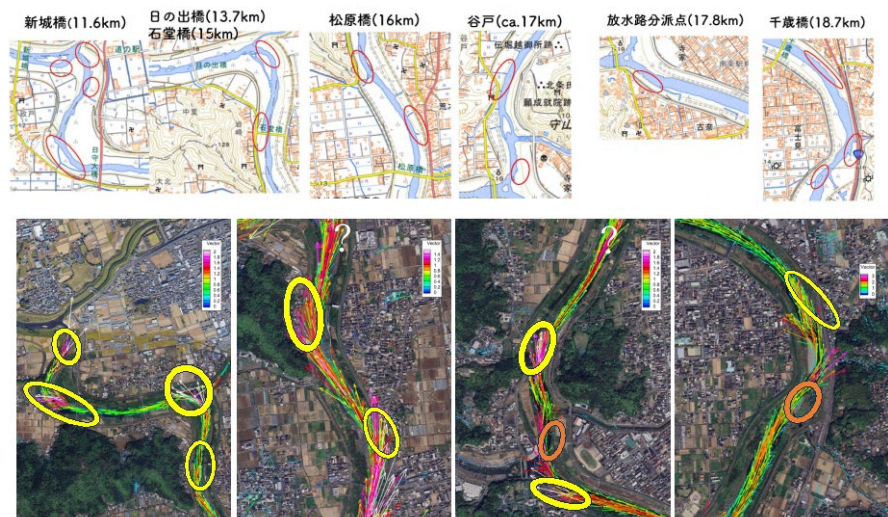


図5. HGS シミュレータによる流速ベクトル図と、メダケ群落生育の比較。

・流域スケールモデルでは、源流域から河口までの狩野川の集水域構造を可視化するとともに、豪雨通過時における河道、水田、森林、地下地層等の様々な流域構成要素に対する洪水貯留量変化を推計した。洪水被害を受ける市街地を対象とした事例とは異なり、狩野川集水域全体を対象としてみると、洪水貯留にはやはり森林の寄与が大きいこと。さらに地表水貯留速度が大きい飽和点には早く達する一方、地下水は緩やかな貯留がより長く続くことが示された。

4. 駿河湾流入四河川における狩野川の特徴 ⑥

・狩野川下流は、駿河湾に流入する他の主要河川と比較してケイ酸($\text{Si}(\text{OH})_4$)とリン酸イオン(PO_4^{3-})の濃度が高く、流域の地質が新生代の火山岩に起因することに関係していると考えられる(図6)。

・狩野川下流は亜硝酸イオン(NO_2^-)、アンモニウムイオン(NH_4^+)の濃度が高く、人間活動による窒素の付加が多いことと、それを利用する微生物の活性が高いことが考えられる。そのため、狩野川は、

硝酸イオン (NO_3^-) 濃度が富士川より低いものの、溶存無機窒素 (DIN) 濃度は富士川と同程度に高いことがわかった。

・駿河湾に流入する主要4河川に対して、狩野川の流量は13%と少ないものの、栄養塩のフラックスは1/4程度を占め、駿河湾への栄養塩供給源として無視できないことがわかった。

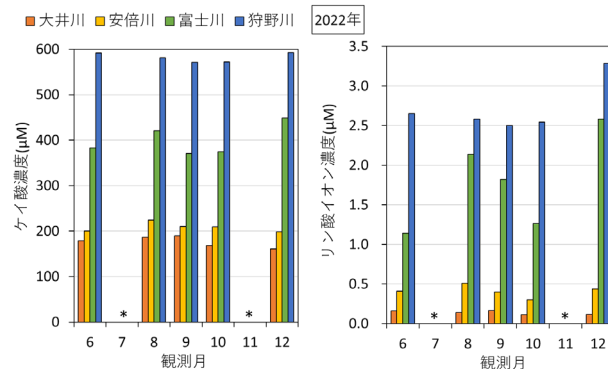


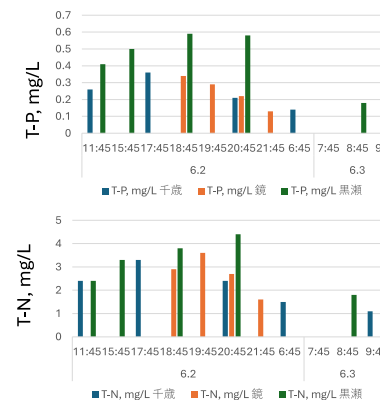
図6. 栄養塩（ケイ酸とリン酸イオン）の濃度. *は観測未実施を示す。

・また狩野川が微生物活性の高い河川であることが、溶存有機物 (DOM) の三次元励起蛍光スペクトルの多変量解析により、励起波長 350 nm/蛍光波長 460 nm のピークが腐植様物質と考えられる物質の濃度が高いことから支持されている。

5. 豪雨時と平常時で狩野川の河川水はどう違うか ⑥

・豪雨は、河川水量のみならず水質においても平時の2倍以上の高濃度のリンや窒素成分を含むことが示唆された。2023年6月2日水位上昇が始まった午前11時45分から3日の午前9時45分にかけて放水路が開放されたタイミングに千歳橋、放水路直上の鏡橋並びに黒瀬橋下で採水された河川水中の全窒素 (T-N) と全リン (T-P) 濃度を図7に示す。上述したように特にリン濃度の上昇が顕著であった。

図7. 2023年6月2日から3日にかけての豪雨(2日間の降水量として湯ヶ島観測所で234mmが観測された)期間における河川水中の全窒素(T-N)と全リン(T-P)濃度。



II. 生物から見た狩野川水系

1. 微生物から見た狩野川の河川水と放水路が作りだす生態場 ⑤ ⑥

・生態系メンバーとしての微生物(原核生物)の特徴は、小さいということもさることながら増殖速度の大きさ、つまり好適な条件のもとでの世代時間の短さが挙げられる。環境変化に対する生物としての応答が真っ先に現れることになる。

・そのような考えの元、豪雨に対する応答を調べた。得られた結果は、豪雨時には微生物群集構成の多様さが平常時に勝った。2024年6月28日から29日にかけて湯ヶ島観測所で210.5mmの降雨が記録され、8月29日から31日にかけては同観測所で370.0 mmの雨が降った。これらの豪雨時と、7月18日の平常時の河川水中の微生物群集構成をDNA解析によって求めた。狩野川河川水中には1Lあたりおよそ1000万細胞の原核生物が存在するであろうが、クローン(遺伝的に類似度の高い原核生物の集まり。解析する手法によってグループ化に用いる一定の数値が提案されている)数としては1000のオーダーが存在すると考えられる。その中の多様性を見た結果が表2である。つまり、平常時の河川水中には含まれない細菌群が豪雨時の河川水中には存在することを示唆している。

表2. 2024年6月29日(豪雨直後), 7月18日(平水時)及び8月31日(豪雨ピーク時)の
河川水中のShannon-Wiener による微生物多様性指標

千歳橋 6.29	千歳橋 7.18	千歳橋 8.31	徳倉橋 6.29	徳倉橋 7.18	鏡橋 8.31	黒瀬橋 8.31
4.799	4.436	4.81	4.735	3.934	5.158	5.100

・次に放水路分派点の上下流で同様の方法で微生物群集の構成を調べた。放水路は河川が大きく湾曲する位置に建設されたため、開放されると表層水が放水路側に強い流れを作り、本川には下層の砂粒子を多量に含む水が流れ出すと考えられる。

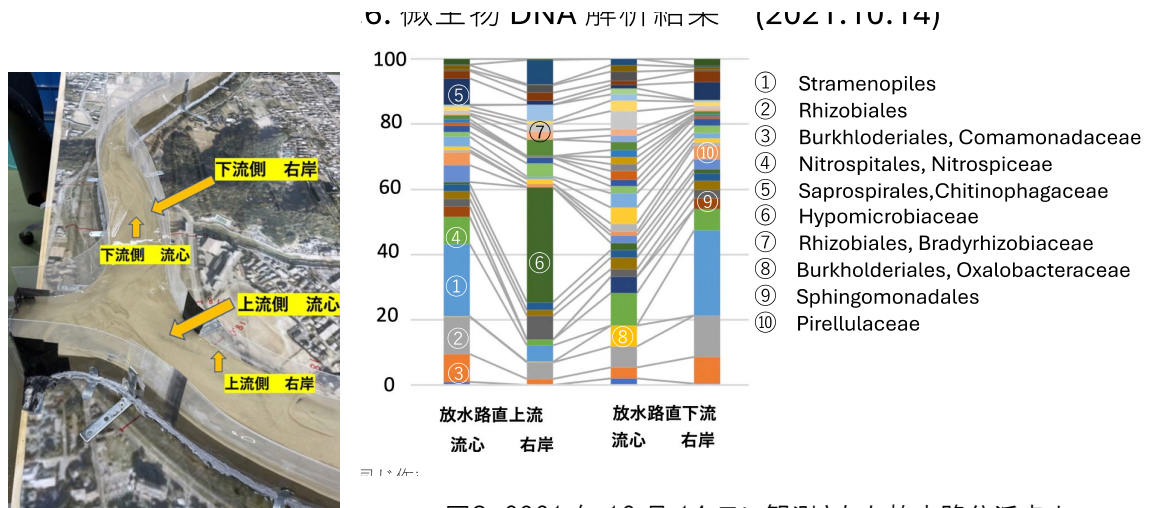


図9. 2021年10月14日に観測された放水路分派点上下流の堆積物中の微生物群集構成

図8. 放水路をはさむ上下流の河床堆積物中の微生物 DNA 解析を行った地点(狩野川の放水路上下流を対象とした 1/1000 模型. 東京大学知花研究室作成)。

・分派点を挟む上流側流心に多量の砂が堆積している。河川の形状の影響を受け、出水時に開放される放水路の働きによって多量の砂粒子が分派点下流側に輸送され河道狭窄部の手前右岸側に堆積する。ここでは礫まじりに砂が堆積する上流右岸や下流流心とは異なり非常に類似性の高い微生物群集が生態系基盤を作ることが見出された(図8, 9)。河床粒径の類似する場には似た群集構成からなる微生物生態系が出現した(図10)。

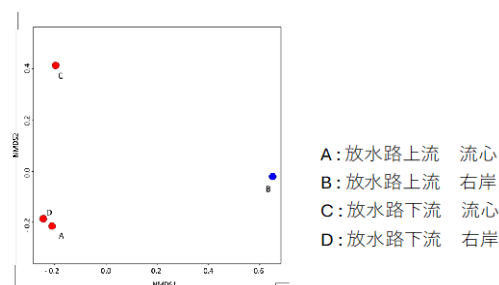


図10. Jaccard (Sørensen)による2021年10月14日に採取された放水路上下流の堆積物中の微生物群集 NMDS 解析結果. Silhouette が最も高い(0.1809) Cluster 2 の結果を示す。

2. 水生昆虫から見た狩野川水系ネットワーク ① ⑤

・本研究では、狩野川に設置された放水路における底生動物への影響評価を目的とした研究として、狩野川水系全体の底生動物相の把握や、水系内における底生動物群集のネットワークを評価した。はじめに底生動物相について調べた結果、個体密度に関して、狩野川放水路より下流側において高い傾向にあり、放水路下流側では洪水時の攪乱が半減されることの影響の可能性が考えられたが、洪水時における調査は困難であり、今後の課題である。

・狩野川本流と様々な支流における、生物の移動分散の方向性や強度を検討するために日本列島の河川において優占するヒゲナガカワトビケラ *Stenopsyche marmorata* に焦点を当て、その個体群構造と遺伝構造を調べ、支流を含め水系内全域において広く遺伝子流動を検出した。ヒゲナガカワトビケラ用に開発された遺伝子マーカーのうち、狩野川水系内の移動分散力を評価し得る配列を解析した。

移動分散の方向性と強度に関する結果を「Source（遺伝情報の移動分散元）-Sink（遺伝情報の移動分散先）」の関係性として考察した結果、黄瀬川内での移動分散が高く、かつ他への移動も高いことなどが見られた。水生昆虫一種を取り出しても狩野川という場を水系として捉えることの重要性が見えてくる。

次に豪雨の影響を詳細に調べるために遺伝子解析手法の開発を進めた。出水時には放水路を経由して駿河湾へと掃流されてしまう底生動物や魚類もかなり多いと予想される。そのことをも含めた個体群動態を把握する手法として環境DNA解析を用いたメタバーコーディングが挙げられるが、水生昆虫を対象とした研究は立ち遅れている。メタバーコーディングにおける好適な解析領域の絞り込みを実施し有効性に高い手法を確立することができた。残念ながら研究期間内にその適用は叶わなかったが、今後の展開を期している。

3. 狩野川におけるメダケの生育特性とその駆除が植生へ与える影響 ①

河道内の樹林化が河川管理上の大きな問題の一つであるが、河道内の樹林化の原因となる代表的な樹種としては、マルバヤナギ (*Salix chaenomeloides* Kimura) やタチヤナギ (*Salix triandra* L. subsp. *nipponica* (Franch. et Sav.) A. K. Skvortsov) などのヤナギ類、マダケ (*Phyllostachys reticulata* (Rupr.) K. Koch) やメダケ (*Pleioblastus simonii* (Carrière) Nakai) などのタケ・ササ類があげられる。この中で狩野川ではメダケが管理上最も重要な樹種である。狩野川中流域47地点についてメダケの生育状況を調べた結果、とりわけ河道の湾曲部外側でメダケ群落の形成が目立った（図5参照）。

2013年に撮影された航空写真（地理院地図）と今回の観察からメダケ群落の生育域を比較した（図11）。この10年間のメダケ群落の広域化が認められるが、とりわけ放水路下流側で増大の傾向が著しい。

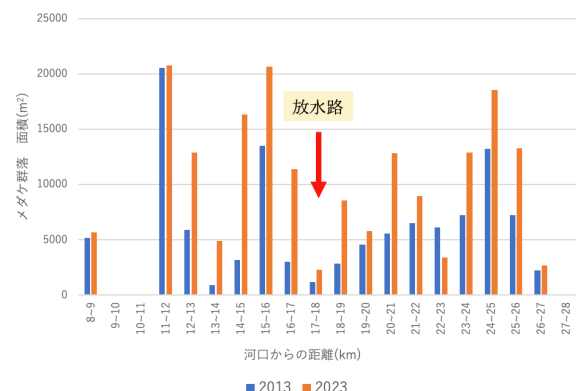


図 11. メダケ群落の面積比較(2023 年の本研究と 2013 年の国土地理院地図の比較)。

・現地調査やオルソ画像から、メダケ群落は河川湾曲部の外岸（水の流れのカーブ外側）や中州、ワンド、支流との合流点などの河道内において大きな攪乱が起りやすい環境に群落を形成していた（図5）。一方、メダケが生育する環境は掃流力が大きく、洪水流の影響を受けやすい環境であることが示唆された（図12）。また、メダケが分布する地点は洪水時に洪水流が乗り上げるような高水敷の法肩という共通点があった。

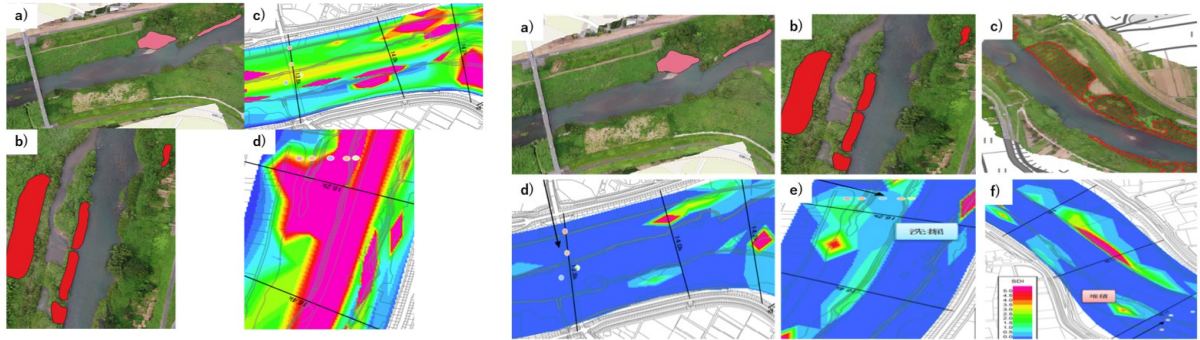


図12. メダケの分布(a, b)と無次元掃流力(c, d)の相関(左図, a, c:日守大橋上流付近, c, d:松原橋上流付近, 無次元掃流力が大きい場所を赤色で示す)と右図は メダケの分布(a, b, c)とSDI(d, e, f)の相関(a, d: 日守大橋上流付近, b, e: 松原橋上流付近, c, f: 新城橋付近,SDIが高い場所を赤色で示す)。

一般的に植物がない環境では、上流から流れてくる細粒土砂は堆積せず下流に流れるのに対し、相対的に高い位置の植生域では有意な細粒堆積が起ると報告がある（藤田，2003）。このことから、メダケが生育する環境においても、洪水による冠水によって細粒土砂が流入し、メダケの発達した稈や地下茎によって土砂の堆積が生じている可能性がある。ただ、メダケ群落によって土砂が堆積しやすい環境が形成されているのか、土砂が堆積しやすい環境にメダケが侵入しているのかは本研究からは判断できない。しかし、根茎から再繁茂しやすいメダケが一旦侵入すれば、その場所は土砂が堆積しやすい環境となりメダケが分布拡大しやすくなると考えられる。

・メダケの駆除に関わる問題点としては、駆除方法である天地返しに植生にどのような影響を与えるのかを明らかにした。その結果、天地返しによって外来種の割合が極端に高くなること、メダケの再繁茂には効果が見られるが他の広葉樹種がかえって繁茂すること、オオブタクサの抑制には効果がないこと、アレチウリには一定の効果が見られたが早い時期に繁茂することが明らかになった。

メダケ群落の拡大は、草本類などの生息場を奪い河畔植生の多様性を減少させるのみならず、河道にも影響を及ぼすことが明らかになってきた。その管理には容易な解決策を見出せないことに鑑み、管理と研究観察の一体化が必要であろう。

III. 狩野川が沿岸生態系へ及ぼす影響

1. 狩野川の出水が本川河口部および放水路出口沿岸の貝形虫群集に与える影響 ⑦

小型甲殻類である貝形虫類の底生種を用いて狩野川本川河口部と放水路出口のある江浦湾における出水の影響について、本川河口部では間隙性種を江浦湾では表在性種についてそれぞれ個体数密度の動態を観測した。

・本川河口部においては、間隙性貝形虫類が安定して産出する地点が見つからず、本川河口部の南に広がる我入道海岸の南端（河口部から約 400 m）地点（KS2）に比較的まとまった個体数が産出する地点を見つけ、出水前後の個体数密度変化と堆積物粒度組成を観測した。そこでは、図 13 に示されたとおり、台風や梅雨時の集中豪雨のあとは個体数が激減するとともに、間隙性貝形虫類が多く生息する粒径 1–2 mm の堆積物が減少する様子がとらえられた。ちなみに間隙性貝形虫類は主に冬から春にかけて個体数密度が高くなることが知られており、この結果は貝形虫類の個体数密度の季節変動よりも出水イベントが優先されることがわかる。また、砂浜海岸の波（水）のエネルギーの強さを示す「露出度」を測ると、河口部は他の海岸よりも露出度が高いことがわかった。河口部の砂浜に棲む間隙性貝形虫類は運動能力が高いものが優占することも確かめられ、底質の動きが激しい河口部にはそのような種のみが適応可能であると考えられる。



図 13. KS2 地点における間隙性貝形虫類の個体数密度変化と堆積物の粒度組成変化および観測間における降雨イベント。

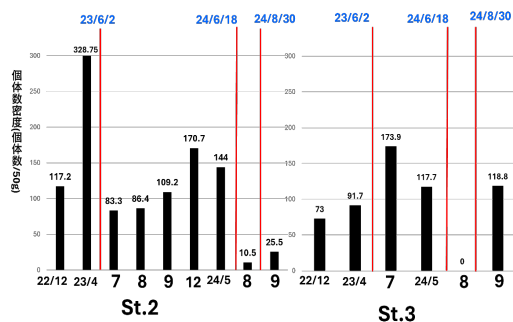


図 14. St. 2(水深 15.2m)および St. 3(水深 23.1m)における個体数密度の変化。縦軸に個体数密度(上限 300), 横軸に採集月, 赤い縦線は放水路可動堰の開放日を示す。

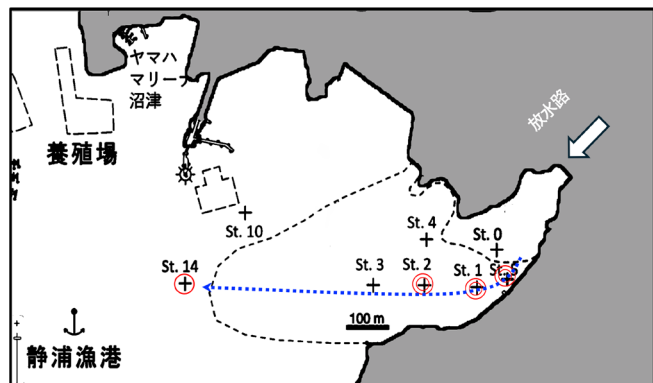


図 15. 貝形虫類の群集に放水路可動堰開放の影響が強く表れる地点。影響を強く受けるおおよその経路を青い点線でつなぐ。

・放水路のある江浦湾においては、表在性貝形虫類の個体数密度が、放水路可動堰の開放とどのように変化するかを湾内に設定された 8 つの定点で観測された。例えば放水路出口から約 500 m 沖の St. 2 とそこからさらに約 120 m 沖の St. 3 を比較すると、前者では放水路可動堰が開放されるたびに個体数密度が激減する様子が観測されたが、後者では必ずしも放水路可動堰開放のタイミングに合わせて個体数密度が減るわけではなかった。可動堰開放以外の他の要素、たとえば固定堰の自然越流などによっても個体が運び去られて数密度が減少したり、他の地点から低層流によって貝形虫個体が運び込まれたりするなど場である可能性が考えられる(図 14)。

・江浦湾の貝形虫類相の大きな特徴として、淡水性貝形虫類の混入が挙げられる。淡水性種は死後分解されやすい性質をもつため、海洋環境の湾内で産出することはほとんど知られていない。江浦湾では 2 つの観測点を除く他の地点すべてにおいて新鮮な状態で淡水性種が確認され、放水路出口から約 1000 m 離れた地点においても確認された(図 15)。表在性種全体の個体数密度の変化や淡水性種の今夕の観点から、放水路は出口から少なくとも 1000 m 離れた地点でもその影響を及ぼしていること、また放水路の影響は左岸沿いでより強く出ることが確認された。

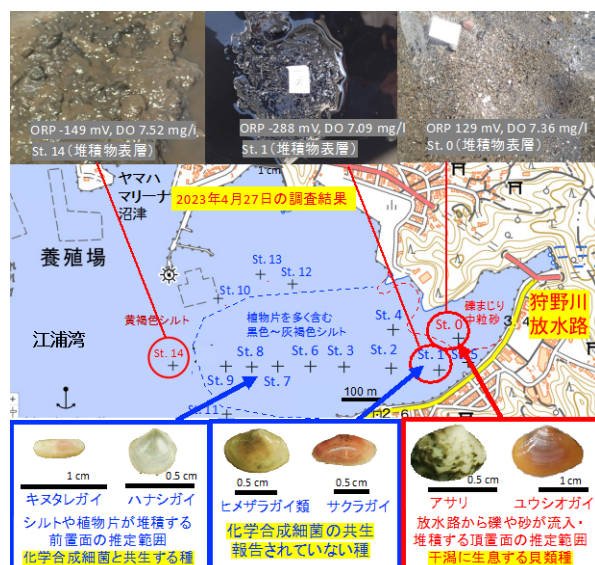
1. 放水路が江浦湾に与えた影響 ②

先にも指摘したが(III.1 参照)放水路が建設された位置の河川形状から放水路開放時には主に表層水が放水路に流れ出る。そのことによって放水路出口の環境に何らかの影響はないか船外機を走らせて海底を観察し、予想外の、時には硫化水素集も発生する黒色堆積物の存在が発見された。

出水時に放水路から放出された陸起源の有機物は江浦湾の海底に堆積し、盛んな有機物分解により還元的な環境が形成されていた。落葉は明らかに広葉樹とわかるものを多く含み、有機物は陸起源であることが確認された。明らかになったことは;

- ・放水路出口周辺海域（江浦湾）では、水深 7 m 以深の海底に大量の陸生植物片を含む黒色シルトが堆積し、最大で沖合 1000 m 付近まで広がることを確認した(図 16)。分布は水深 2 m あたりから一気に 10m 付近まで急激に深度を増した後から沖合へと広がっている。図 16 右図)。
- ・黒色シルト中では、嫌気性菌による植物片の分解により硫化水素が発生し、常に堆積物の酸化還元電位が低く、夏季には毎年のように貧酸素が発生した。
- ・還元的な黒色シルトから、キヌタレガイなど化学合成細菌との共生が報告済みの二枚貝種とともに、サクラガイなど共生細菌の報告がない種も常に採集された。

黒色堆積物中（図 16 St. 1, St. 2）には、海水中や干潟（同 St. 0）と異なり、還元環境下で分解活性を発揮する嫌気性細菌が多数含まれていた。中には無酸素環境のもと硫酸イオンを電子受容体として有機物分解を進め硫化水素を発生する硫酸還元菌も認められた。鉛直方向に約 16.5cm のコア試料を採泥し、 ^{210}Pb 年代測定を試みたところ堆積は 24 年前(1998 年)と推定された。堆積泥はさらに深くまで存在するがこの深度の堆積物が放水路建設後のものであることが確認された。そこで黒色堆積物直上の酸素濃度変化から有機物供給と分解が放水路からの出水にどの程度左右されているかを調べたが、微生物活性は環境の温度変化の影響にも強く左右されることなどから放水路の開放と堆積物の消長との直接的な関係は見出すことはできていない。



垂直分布

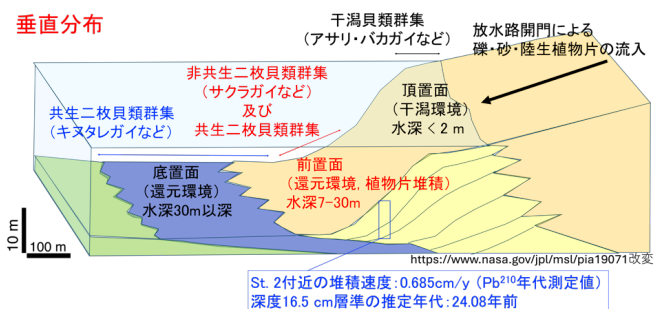


図 16. 江浦湾内における堆積物の特徴とそこに生息する二枚貝の種構成(左図)と堆積箇所の海底地形の概念図(右図)。

2. アユ遡上の可能性 ⑤

放水路が開放される豪雨は当初台風によるもののみを想定したが、今日では梅雨期においても豪雨化が認められる。アユは秋に孵化した直後に海にくぐり、仔稚魚期を沿岸域で成長したのち春に遡上する。では夏から秋にかけての豪雨によって放水路が開放されアユの成魚が多数生息する放水路上流側から放水路によって海に流されたアユは一体どのような行動を取るのでしょうか。伝聞情報で豪雨の後江浦湾の沿岸でアユを見るということは知られていた。そこで科学的には未解決のアユの成魚が海水環境で生残性しうるか、またそのようなアユは川へ再び遡上するのかを調べることにした。

2 週間の海水馴致実験を行い、海水馴致個体の血漿浸透圧の測定を行った。海水移行 1 日後に血漿浸透圧が有意に上昇するが、これは生理学的に生存可能な範囲内のものである。その後は海水移行前及び淡水馴致群と同じレベルまで低下し、その値を維持した。これは、アユ成魚は海水環境でも体内恒常性の維持が可能であることを示唆する。

海水馴致させたアユが浸透圧調整に必要なエラや腎臓で Na^+/K^+ -ポンプを駆動させる $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{ATPase}$ (NKA) をコードする遺伝子を発現させるかを mRNA やタンパク質レベルで確認し、アユ成魚が海水環境下でも生存できることを初めて遺伝子レベルで解明した。

次に、東京大学の大槌沿岸センターに設置されている大型の Y 字水槽を用いて塩分嗜好性の検証実験を行った。Y 字水槽を用いた行動実験でアユ成魚は明確な淡水選好性を示さなかったが、水流に逆らい行動する強い正の流走性を持つことが認められた。このため狩野川放水路によって江浦湾に流されたアユは、放水路の水流を感知し、狩野川放水路内を遡上することが予想される。

では、アユが実際に放水路を経て狩野川に遡上することができるようにするにはどのような設計が考えられるだろうか。森教授（岐阜協立大学）によると、分流堰の左岸側にある水門を改良し、本流の左岸流を流すように可動堰などを検討できれば、魚道の設置が可能かもしれない（図 4 を参照）。また、下流に通水する呼水流路を設置し、堰直下域の魚類に流向を察知させる工夫もあっていいかもしれないとのことであった。

3. 沿岸生態系への影響 ⑧

・衛星画像解析の結果、駿河湾の主要流入河川の流量増加に伴い $\text{Chl.}a$ が強い増殖応答を示し、とくに狩野川沖合ではその傾向が顕著であることが明らかとなった。

出水イベント（最大流量 = $41.6 \sim 1,396 \text{ m}^3/\text{s}$ 、中央値: $61.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ）について GCOM-C/SGLI の衛星画像データを用いて植物プランクトンの応答を詳細に解析したところ、出水規模の増大とともに植物プランクトンの比増殖速度 μ は上昇し、狩野川の影響範囲も駿河湾北東部内浦湾とその西側海域へと徐々に広がることが明らかとなった。

・ついで、狩野川の出水規模の増加に伴い植物プランクトンは非線形に応答し、日平均流量およそ $500 \text{ m}^3/\text{s}$ まで増殖速度が急上昇することが明らかとなった。

・現地調査の結果、狩野川沖合では珪藻類が最も優占しており、とくに夏季において玄武岩質溶岩から供給されるケイ素が珪藻類を主体とする植物プランクトンの増殖を支えていることが明らかとなった。

・炭素・窒素安定同位体分析と脂肪酸分析を用いた食物網解析を行ったところ、沿岸帯および深海帯の生物群集を支える基底資源として、大型植物プランクトンが最も高い寄与率を示し、狩野川由来の懸濁物質の寄与は低かった。

・狩野川の栄養塩が出水を通じて駿河湾に供給されることで、とくに夏季の駿河湾表層の珪藻類の増殖を促進し、これらが表層から深海に至る消費者の重要な餌資源となっている可能性が示された。

以上、各メンバーの研究成果を紹介したが、ここでおこなわれた研究をつなぐならば図 17 のようになるであろうか。私たちが見るができなかった、また見ることを思いつかなかった **nexus** を埋めていく作業が、水況変化とその生態系影響についての理解をよりしっかりとしたものにするには求められている。

最後に放水路の設計変更にも繋がった狩野川台風を実際に経験した 3 名へのインタビューを行い、流域に住む人々の狩野川への思いを聞く機会を持った。5 時間に及ぶ 3 名のインタビューをごく簡単にまとめるならば以下ようになる。

・狩野川台風（1958 年）の以前、狩野川には日常的な体験が溢れており、それが流域住民にとっての基本的な狩野川の思い出やイメージを構築していた。これは今回、狩野川台風に関する聞き取りをおこなったにもかかわらず、川の日常的な思い出が多く語られたことによって裏付けられた。また、そのイメージは、たとえ同年代であっても、流域のどこに住んでいたかによって大きく異なるようであった。

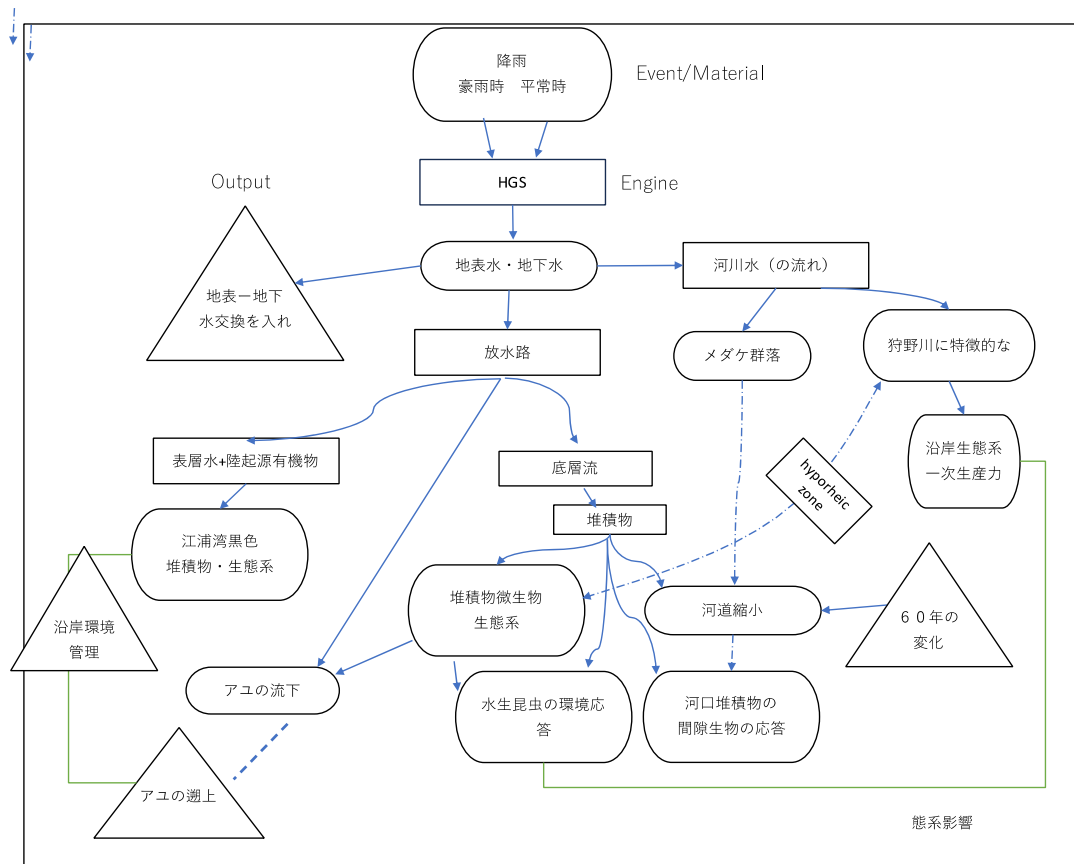


図17.狩野川研究の相互の繋がり.

以上.

流況変化に対する河川－海洋沿岸生態系の応答：狩野川水系における解明と生態系保全策

Responses of riverine and marine coastal ecosystems to changes in flow regime in Kanogawa River

研究代表者 塚越 哲（静岡大学 教授）

Possible influence on the river itself and coastal ecosystem caused by the operation of flood control channel under the torrential rainfall was studied from various aspects.

Key Words: Kanogawa River, flood control channel, ecosystem, estuary, simulation

1. 研究の背景・目的

狩野川放水路によるピークカットがほぼ50余年経て、放水路（バイパス）が下流および沿岸生態系にどのような影響を与えたか。また近年多発する豪雨イベントに伴う放水路の開閉が河川環境や生物群へ、あるいは河川の流量調節が沿岸生態系へどのような影響を与えているかを知ることを目的として研究が進められた。

2. 3カ年の研究内容

研究は、2020-2022年をPhase1: [何が起きているか] 河川工学、生態学の個別研究、2021-2023年をPhase2: [それはどういう意味か] 河川工学と生態学の共同研究、2024年をPhase3: [それをどうするか] 河川管理と社会合意への橋渡しを目指した統合研究と位置付け、研究内容は①50余年経過した放水路の生態系影響評価、②豪雨イベントの直接影響評価、③沿岸生態系への影響評価と括った。

3. 研究成果

研究は多岐に亘るので研究内容を I. 狩野川水系の物理化学的特徴, II. 生物から見た狩野川水系, III. 狩野川が沿岸生態系へ及ぼす影響と整理し、内容を抜粋して以下に成果を紹介する。

I. 狩野川水系の物理化学的特徴から

狩野川中下流域の1959年から約60年間の河道形状変化を分析した結果、放水路の建設がもたらした洪水分派による流量減少への応答は、セグメントごとに異なっていた。図-1に1959年から2019年までの最深部河床高の変化を示した。1970年から1980年にかけて、狩野川中下流域の河床高はほぼ全域的に1~2m低下した。

放水路建設によって、分派点下流の平均年最大流量は分派点上流の現在の平均年最大流量に相当する900 m³/s程から、放水路の分派によって500 m³/s程度まで減少したと考えられる。解析結果からは、洪水は河道の全幅を流れず、その一部に集中して流れる様になると推論される。同時に、さまざまな原因から土砂の供給量が減少し、河床高が局所的に低下した。一部分が河床低下することで、低水路内に比高差が生じ、土砂の堆積と高水敷化が進んだ。現在では、メダケなどの植生繁茂も相まって、河岸の土砂堆積が進み、深く狭い河道が分派点直下流に形成されている。

つぎに2019年10月12日に伊豆半島を襲った台風19号による豪雨を対象にカナダAquanty社のシミュレータHydroGeoSphereを使って水動きを可視化したところ（図-2）河道に沿って湧出していた地下水は台風通過のピーク時（10月12日 15:00）には河道を超えて広く水が地下へ浸透し、通過間も無く（10月13日14:00）には水は強く湧出していることが示された。

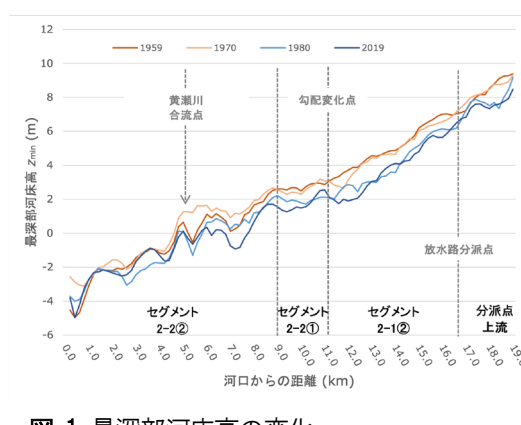


図-1 最深部河床高の変化。

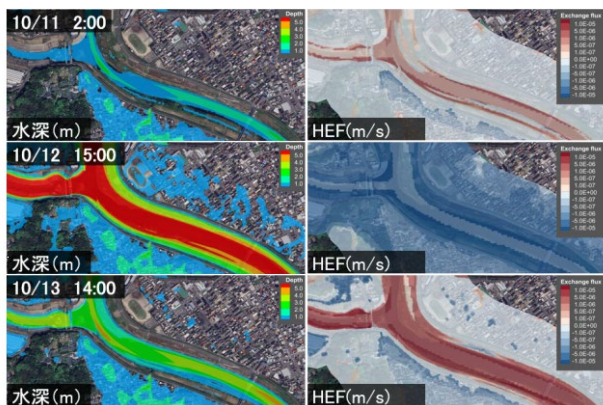


図-2 2019年10月12日に伊豆半島に上陸し、湯ヶ島観測所での72時間降水量が760mmに達した台風19号(Hagibis)のデータによりHGSでシミュレートした結果。左が水深、水色は1m、赤が5m以上を示す。右は同時刻の地表—地下水交換フラックス。えんじ色が湧出を、青色が浸透を示す。

またシミュレータの上でHagibis襲来時に放水路がなければどうの様な違いが生じるかを可視化したところ、放水路によって分派点上流側の流速はとりわけ放水路に向かう左岸側で加速し、分派点下流側で減速する様子が明瞭に描き出された(図-2)。下流側では特に高水敷での流速の低下が明瞭であった。

火山地帯を流下し、下流では湧水に涵養された柿田川が合流するなどリンなどに富んだ地下水を含む狩野川は、駿河湾に流入する他の一級河川(大井川、安倍川、富士川)と比べて流量は全量の13%と小さいものの栄養塩のフラックスでは4分の一程度を占めていた。図-3)。

この河川から沿岸生態系に及ぼす栄養塩供給の働きは豪雨時にさらに高まることが狩野川での観測で確認された。観測は2023年6月2日水位上昇が始まった午前11時45分から3日の午前9時45分にかけて放水路が開放されたタイミングで千歳橋、放水路直上の鏡橋並びに黒瀬橋下で採水された河川水中の全窒素(T-N)と全リン(T-P)濃度を図に示す。上述したように特にリン濃度の上昇が顕著であった(図-4)。2024年にも同様の結果を得ている。

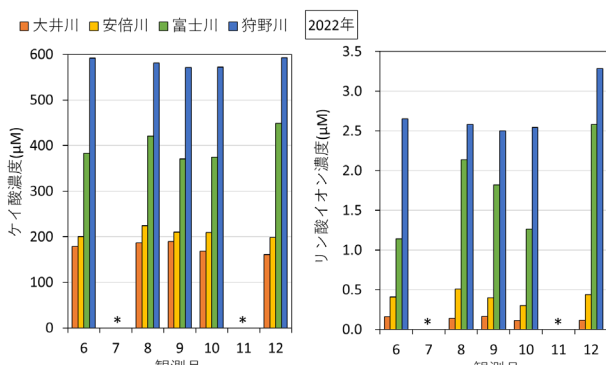


図-3 栄養塩(ケイ酸とリン酸イオン)の濃度。
*は観測未実施を示す。

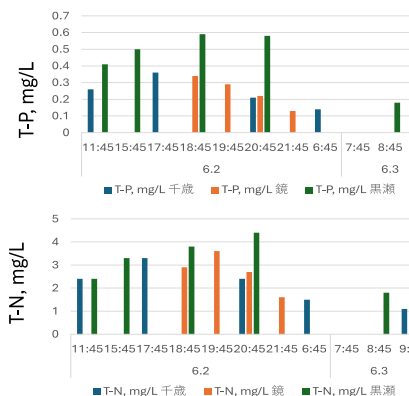


図-4 2023年6月2日から3日にかけての豪雨(2日間の降水量として湯ヶ島観測所で234mmが観測された)期間における河川水中の全窒素(T-N)と全リン(T-P)濃度(採水、分析は(株)八千代エンジニアリングによる)。

II. 生物から見た狩野川水系と放水路

環境変化に最も早く応答する原核生物の群集構成からは、豪雨時には河川水に含まれる原核生物の多様性が高まることが見出された(表-1)。

狩野川河川水中には1Lあたりおよそ1000万細胞の原核生物が存在するであろうが、遺伝子解析によって得られるクローン(遺伝的に類似度の高い原核生物の集まり)数としては1000のオーダーが存在すると考えられる。その中の多様性を見た結果が表-1である。豪雨直後の多様性が平常時より高いことがわかる。つまり、平常時の河川水中には含まれない細菌群が豪雨時の河川水中には存在することを示唆している。

河床を生息場とし河川生態系を構成する主要なメンバーの水生昆虫については、狩野川では個体密度に関して、放水路より下流側において高い傾向にあり、放水路下流側では洪水時の攪乱が半減されることの影響の可能性が考えられた。豪雨の水生昆虫への直接影響については手法を確立する必要もあり十分なデータの取得に至らなかったが、水生昆虫の環境変化への応答、それに伴う中長期的な移動分散について考えるには狩野川本川だけではなく、支川を含めた狩野川水系で捉えることが重要であることがヒゲナガカワトビケラの遺伝子解析によって明らかになった。移動分散の方向性と強度に関する結果を「Source(遺伝情報の移動分散元)-Sink(遺伝情報の移動分散先)」の関係性として考察した結果、黄瀬川内での移動分散が高く、かつ他への移動も高いことなどが見て

表-1 2024年6月29日(豪雨直後)、7月18日(平常時)及び8月31日(豪雨ピーク時)の河川水中のShannon-Wienerによる微生物多様性指標。

千歳橋 6.29	千歳橋 7.18	千歳橋 8.31	徳倉橋 6.29	徳倉橋 7.18	鏡橋 8.31	黒瀬橋 8.31
4.799	4.436	4.81	4.735	3.934	5.158	5.100

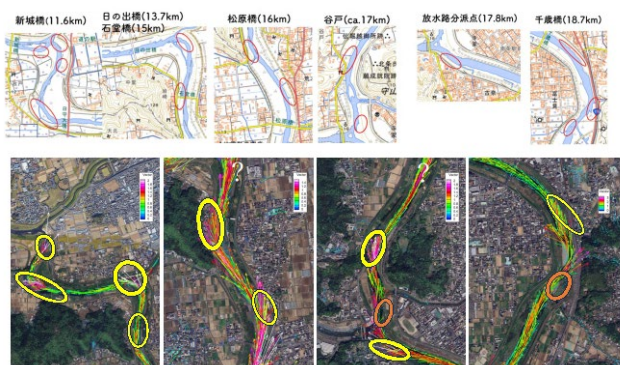


図-5 HGS シミュレータによる流速ベクトル図（下図）と、メダケ群落生育（上図）の比較。

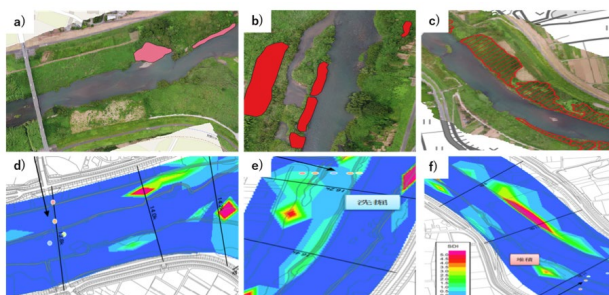


図-6 メダケの分布 (a, b, c) と SDI (d, e, f) の相関 (a, d: 日守大橋上流付近, b, e: 松原橋上流付近, c, f: 新城橋付近, SDI が高い場所を赤色で示す)。

とれる。

つぎに河道内の樹林化問題として狩野川ではメダケの増殖がまず挙げられる。既往データと今回の観測との比較から、2013年から2023年までの間にとりわけ放水路下流側でメダケ群落の増大の傾向が著しいことが明らかになった（図-5）。

放水路を挟む狩野川中下流域での観測からは、メダケ群落は河川湾曲部の外岸や、中州、ワンド、支流との合流点などの河道内において大きな攪乱が起こりやすい環境に群落を形成していることが認められた。HydroGeoSphereによるシミュレーションから流速ベクトルを得ると、その大きな場所とメダケ群落が多くの地点で一致することが示される（図-6）。

一方、メダケが生育する環境は掃流力が大きく、洪水流の影響を受けやすい環境であることが示唆された（図-6）。他にメダケが分布する地点は洪水時に洪水流が乗り上げるような高水敷の法肩という共通点もあった。ただメダケの増殖が実際に土砂の堆積を促進しているのか、或いは土砂の堆積しやすい土地にメダケ群落が形成されるかは定かではない。

III. 狩野川が沿岸生態系へ及ぼす影響

流況変化が河道形状や流れに現れる変化へ生物がどのように応答するかという課題のほか、本研究では流況の変化が河口や沿岸域の生物現象に与える影響を考察

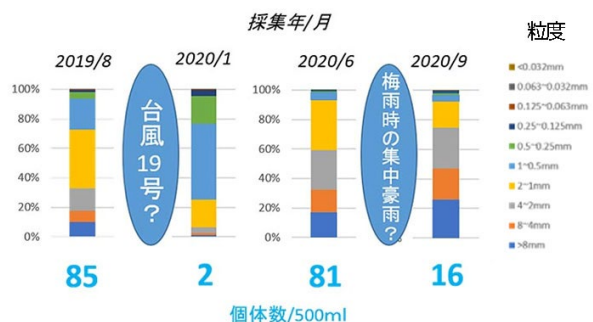


図-7 狩野川本川河口部から 400m 離れた海浜における間隙性貝形虫の個体数密度変化と粒度塑性の変化

するということが課題であった。

海浜の間隙環境に生息する貝形虫の観察から以下の現象が確認された。観測地点では2019年8月には500 ml あたり85個体の間隙性貝形虫類が産出したが、翌2020年1月には2個体まで減少した。また同年の6月には81個体まで回復したが同年9月には16個体まで減少した。前者では大型の台風(Hagibis)による海浜を作る粒子の細粒化が、後者では粗粒化が間隙性貝形虫類を多産する粒径1-2 mmの粒子環境を大きく改変したことが大きな個体数変動をもたらした（図-7）。

では放水路の出口ではどうか。放水路が建設された位置の河川形状から放水路開放時には主に表層水が放水路に流れ出る。この流れが表層に浮遊していた落葉などの有機物を一気に江浦湾に持ち込む。それが湾内の水深7 m以深の海底に大量の陸生植物片を含む黒色シルトとなって堆積し、最大で沖合1000 m付近までそれが広がっていることが確認された（図-8）。有機物分解が加速し還元状態に至った黒色堆積物中には硫酸還元菌の活性まで認められた。

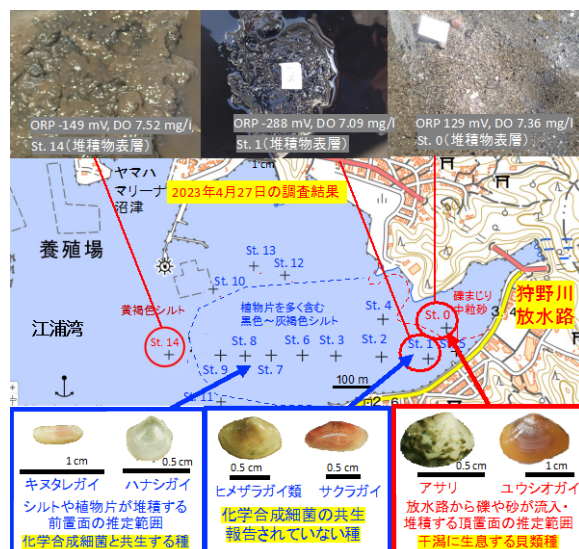


図-8 江浦湾内における堆積物の特徴とそこに生息する二枚貝の種構成

黒色堆積物の ^{210}Pb 年代測定からは、約16.5cmのコア試料では堆積は24年前(1998年)と推定され、これらが放水路の可動に伴い残存し続けていることが推測された。

放水路からは落葉などばかりではなく産卵期前のアユの成魚が豪雨によって放水路から江浦湾に流出することが現地で見聞きされている。

海水に出た成魚のアユが生残できるのかを血漿浸透圧の変化から確認したのち、これを踏まえて、浸透圧の調節に関わる遺伝子とそれによるタンパク質の発現までを確認することができた。これはアユについて初めての研究成果である。放水路からのアユの流下についての伝聞情報に科学的な裏付けができたことになり、今後の対策についての議論のあと押しができたと言える。森教授(岐阜協立大学)の指摘では、分流堰の左岸側にある水門を改良し、本流の左岸流を流すように可動堰などを検討できれば、魚道の設置が可能かもしれない。また、下流に通水する呼水流路を設置し、堰直下域の魚類に流向を察知させる工夫もあっていいかもしれないとのことであった。

狩野川の栄養塩(PやSiなど)が沿岸生態系の一次生産力(植物プランクトンの増殖速度)に正の影響を与えていることを先に指摘したが(I), 2018~2022年の狩野川の流量データから抽出した全出水イベントのうち、出水前後5日間の衛星画像が取得できた37回のイベントを対象にイベント前後のChl.a濃度の変化から観測グリッドごとにみかけの比増殖速度 μ (d $^{-1}$)を推定した。その結果、狩野川本川河口から駿河湾北東部に増殖速度の大きな水域が広がる様子が確認された。放水路出口についても植物プランクトンの増殖に影出水が影響する様子を確認した。さらに狩野川出水時の最大流量と駿河湾表層の植物プランクトンの比増殖速度との関係からは日平均最大流量約500 m 3 /sまで生産力が明瞭に上昇することがわかった。また一次生産された珪藻を主体とする植物プランクトンはさらに上位の栄養段階へと連鎖することも安定同位体や脂肪酸分析で確認された。

最後に狩野川台風を実際に経験した3名へのインタビューを行った。狩野川台風に関する聞き取りであったにもかかわらず、特に幼少期の経験から川の日常的な思い出が多く語られた。このことから、それが流域住民にとっての基本的な狩野川の思い出やイメージを構築していたことが裏付けられた。また、そのイメージは、たとえ同年代であっても、流域のどこに住んでいたかによって大きく異なるようであった。

4. 今後の展望

流況変化と海までを含めた生物の応答の関係について

て明らかにしてきたが、作用間の連続性(まさに生態系)についてはさらなる研究の展開が求められている。メダケや江浦湾など管理に直結する事柄については研究者と管理主体との緊密な連携が保たれることを期待する。

5. 河川等政策への質の向上への寄与

本研究ではとりわけ沼津河川国道事務所との連携を重視した。現場を理解する研究的視点や視野の管理への流し込みが基本となると考えたからである。放水路の改修を含め防災対策の強化は必須であるが、放水路の運用方法などのソフト面も本研究を踏まえしっかり考慮されたい。シミュレーターも使った流域住民との対話などもプランニング段階で必須ではないだろうか。

6. 主な発表論文及びホームページ等

1. 狩野川における30年間の水質変化, 加藤憲二ほか, 応用生態工学会誌, 27 (2025).
2. Revisiting Mt. Fuji's groundwater origins with helium, vanadium and environmental DNA tracers. O. Schilling,,R.Sohrin,,K.Kato, Nature Water 1: 60–73 (2023).
3. 松本浩茂,伊藤史晃,程谷浩成,真鍋尚司,栗山康弘,土屋郁夫,十田一秀,宮本健也,舟橋弥生,澤田みつ子,宗林留美,永翁一代, 加藤憲二,ドローンを用いた河川水温の測定による地下水湧出箇所の探査,陸水学雑誌83: 141–148 (2022).
4. 静岡大学に設置の当該研究プロジェクトのHP:
<https://www.shizuoka.ac.jp/kanogawa/>

参考文献

- 1) Sugiyama, A., Masuda, S., Nagaosa, K., Tsujimura, M. & Kato, K. (2018) Tracking the direct impact of rainfall on groundwater at Mt. Fuji by multiple analyses including microbial DNA. Biogeosciences 15: 721–732.