

令和 6 年 4 月 29 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03591

研究課題名(和文) ドローンと船舶の同時観測で明らかにする河川水が沿岸域で駆動する物質循環

研究課題名(英文) The impact of river outflows on the coastal environment

研究代表者

木田 新一郎 (Kida, Shinichiro)

九州大学・応用力学研究所・准教授

研究者番号：50543229

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：ドローンと船舶を活用したマルチスケール観測手法と数値モデルを用いることで、河口から流出する河川水が沿岸域に拡散するプロセスの解明に取り組んだ。空撮・水上ドローン観測から推定した塩分・クロロフィルa濃度の空間分布、そして連続撮影画像から推定した流速場から河川水と海水が1m程の薄さを持つ河川フロント上で渦を形成しながら混合することを明らかにした。さらに数値実験から、厚岸湖と厚岸湾を結ぶ海峡部分で鉛直混合が潮汐に合わせて発生することを明らかにした。これらは厚岸湖がもつ浅く広い地形の特徴が作り出した現象であり、河川と厚岸湖底由来の栄養塩を取り込みながら河川水が厚岸湾へと流出していることを示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

沿岸域における河川水は、栄養塩の源として物質循環を駆動する重要な役割を担っていると考えられている。しかし沿岸域のような時間変化が大きい領域では海の中を流れる河川水の経路と変質過程を観測から把握することが難しかった。本研究では、ドローンを活用した広範囲かつ高解像度、そして海水の実測値をも獲得できる新しい観測手法を確立した。これにより河川水と海水が1mにも満たない薄い領域で、潮汐によって作り出された数時間ほどの時間帯のなかで混合することが特定できた。河川水の栄養塩が海水へと取り込まれるメカニズムの解明は、日本の沿岸域における正確な生物生産の将来予測の実現に貢献すると考えられる。

研究成果の概要(英文)：The pathway of riverine water from the river mouth to the ocean was examined by utilizing aerial images taken from UAVs and direct measurements from ships. Spatial maps of salinity, chlorophyll-a, and velocity field surrounding a river front were deduced by combining ocean color images, taken using a spectral camera, with salinity and chlorophyll-a direct measurements, taken using drone boats. Our analysis suggests intense mixing occurs along the narrow river front where many eddies form and dissipate. Numerical experiments further show that intense vertical mixing occurs at the channel between Akkeshi Lake and Akkeshi Bay near the bottom boundary layer and through internal shear-driven mixing. Strong tidal pumping is forced, which enables simultaneous mixing and export of river-origin nutrients and lake-bottom-origin nutrients to the bay.

研究分野：海洋物理学

キーワード：河川水 沿岸域 ドローン観測 物質循環

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

陸から海への物質輸送を担う河川水は、沿岸域を低塩分化するだけでなく、栄養塩の供給源として海洋生態系の基盤となる植物プランクトンの成長を促す役割を担っていると考えられている(図1)。しかし近年、気候変動に伴い集中豪雨が増加し、大量の水と土砂が陸から海へ運ばれる事象が頻発している。これらの現象は、今後、沿岸域の生態系にどのような影響をもたらしているのか、予測するには河川水が沿岸域で駆動する流れ場および物質循環の基礎過程をまず明らかにする必要がある。

沿岸域における河川水の輸送経路は、潮汐と海底地形の影響を受けて複雑になり、時間・空間変化が大きい。そのため船舶観測では観測している間に空間分布が大きく変わってしまう。衛星からの海色観測も広範囲を捉えることができるものの観測頻度が低く、瞬間値であるために時間変化が不明なままである。河口近傍(100m-1kmの空間スケール)、生物生産が起こる湾(1-10km)、そして湾口から外洋(10-100km)、と3つのオーダーを跨いで起こる流れの速い河川水の流出のような現象を観測できる手法がこれまで存在しなかった。しかし、この状況がドローンによって大きく変わりつつある。空撮ドローンや水上ドローン(ラジコンボート)を用いることで、近距離からリアルタイムに海面付近の河川水の空間分布が特定できるようになってきた。ドローンがもつ機動力を活用することができれば、沿岸域における広範囲かつ高解像度の画期的な観測手法が実現できる技術・環境が整ってきた。

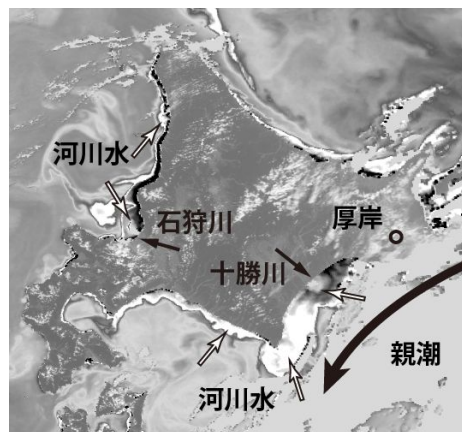


図1: 2016年台風9号通過後のクロロフィルa濃度。北海道沿岸から親潮域へ河川水が到達している様子が確認できる。

### 2. 研究の目的

本研究は、河川水が沿岸域で駆動する流れ場および物質循環の基礎過程を明らかにするため、以下の2点を目的とする：

河口近傍(100m-1kmの空間スケール)、生物生産が起こる湾(1-10km)、そして湾口から外洋(10-100km)、と3つのオーダーを跨いで起こる河川水の輸送過程を「ドローン・小型船舶・船舶」観測から明らかにする。

観測結果をもとに数値モデルを構築し、日本に数多く存在するような中小規模河川から海洋へ流入する河川水が、沿岸域でどのようなプロセスを通じて拡散し、沿岸域の植物プランクトンの増殖を促すのかを示す。

### 3. 研究の方法

ドローン・小型船舶・船舶による河川水の観測

- a. 河口観測(100m-1km)：河川水が河口から湾へと流出する過程を、水平1m以下の解像度で空撮ドローンと水上ドローンを用いて観測する(図2)。別寒辺牛川の河口付近、そして厚岸湖と厚岸湾を結ぶ海峡部付近を中心に実施する。空撮ドローンでは、河口から流出する河川水の空間分布を上空からスペクトルカメラを用いて海面海色画像を取得する。海中観測は、水上ドローンを用いて実施する。ロープに水温塩分計とクロロフィル計を鉛直30-50cm間隔で取り付けられたものを曳航し、流速計も水上ドローン上に搭載することで、水塊と流速の水平・鉛直構造を取得する。ドローンを用いることで小型船舶で侵入することが難しい、または環境場を乱してしまうような河川フロント上の擾乱場を微細スケールで獲得する。採水を観測中に定期的に行うことで、栄養塩およびクロロフィルa濃度の水平・鉛直変化を計測する。
- b. 湾内観測(1-10km)：厚岸湖に近い海域では湾内へと移動する河川水、または湖内へと移動する海水を上空から空撮ドローンで捉え、その近傍をCTD・採水観測する。湾口に近い海域では湾内の横断観測を実施し、小型船舶に取り付けた流速計とCTD・採水観測から河川水とその周辺の水塊・流速の鉛直構造を得る。
- c. 湾外観測(10-100km)：湾外の親潮域の水温・塩分・栄養塩・クロロフィルa濃度の水平・鉛直分布を北大練習船「うしお丸」にて観測する(CTD観測・ニスキン採水)。特に厚岸湾口付近を中心に横断観測を実施することで、厚岸湾と外洋との海水交換が起きている箇所を特定する。

観測は各年度に実施し、改良を加えることで3つのツールを組み合わせた沿岸域のマルチスケール観測手法を確立する。ドローンを用いた新たな観測手法を確立するうえで厚岸湾を選んだ理由は以下の2点である：

- 流入する別寒辺牛川が湿原河川であり、湿原から多量の有色溶存有機物が河川から供給されているため、河川水の色（光環境）が海水と異なる。よって上空のドローンで空撮できる海色画像からリアルタイムに河川水の水平分布が特定しやすい環境場である。
- 厚岸湖・厚岸湾は閉鎖性・半閉鎖性海域であり、河口域が沿岸流などの外的擾乱の影響を受けにくい。よって河川水と海洋の間で起こる混合および湖と湾の間で起こる流出入過程は主に潮汐によって支配されていることが予想される。海水交換を引き起こす主要プロセスが抽出しやすい環境場である。

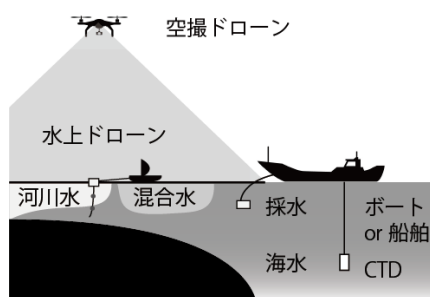


図2: 空撮ドローン・水上ドローンと小型船舶を用いた観測手法の模式図

#### ・ 数値モデルを用いた河口域から沖合いまでの流出過程の解明

非静力学数値海洋モデル KINACO(Matsumura and Hasumi, 2008)を用いて、厚岸の海域を模した数値実験を実施する(図3)。まずモデル領域を別寒辺牛川の流量、厚岸湖の面積と水深、厚岸湾の水深、の典型的な値を用いた理想モデルを構築する。このモデルに外部強制として潮汐振動を与え、河川・湖・湾の要素をもつ汽水域でおこる流況場を再現し、観測結果と比較する。さらに水深・海峡幅・鉛直混合係数・湖の面積を変化させた感度実験を行うことで厚岸海域における河川水の輸送プロセスを特徴づける主要なメカニズムを抽出する。河川水の混合が強く起こるメカニズムと領域を特定することで、河川水由来の栄養塩が海域で拡散する経路を示す。

#### 4. 研究成果

##### ・ ドローン・小型船舶・船舶による河川水の観測

空撮ドローンで取得した海色画像は河川フロントを明瞭に捉えており、フロント上に渦列が形成されていることも確認できた。さらに水上ドローンによって得られたフロント周辺の観測値を用いて海色画像から塩分・クロロフィル a 濃度の空間分布を推定した(図3左)。海色画像だけでは、河川フロントを挟んで変化する水塊特性が定性的にしか明らかにできなかったが、直接観測を実施することで定量化することに成功した。また観測に用いた水上ドローンの移動スピードでは測器を取り付けた曳航ローブが大きく斜めにならず、鉛直断面観測が可能であることも確認できた。この成果は月間海洋にて「ドローンを用いた機動的海中観測(海洋出版, 2023)」に発表した。水上ドローンを用いることで、ドローンでは得ることのできない海中の構造と実測値が明らかになり、またCTD 観測等では観測することが難しい海面から50cmにも満たない薄い層として河川水が存在していることがわかった。河川フロント上では河川水の厚みが大きくなっていたことからフロントが確かに収束域となっていることも確認できた。

河川フロント上に形成された渦には泡が数多く存在していたことから、タイムラプス画像をもとに形状変化を利用した流速値の推定を行った。口径食の除去等の後、空間的局所最適化法を用いることで、空間相関を用いた手法より

も計算コストを削減しつつ、かつ高解像度な流速場が取得できた(図3右)。渦は河川フロントとほぼ同じスピードで移動していた。またフロント上の微細な変化を捉えることが可能になったことで渦が生成と消滅を数十秒おきに繰り返していることが明らかになった。なお空撮する際、カメラを斜めにするとう撮影範囲が広がる一方で空間解像度が落ちてしまう問題があったが45度程度であれば空間的局所最適化法を用いることで十分に河川フロント上の流速場の微細な構造を解像できることも確認できた。なお画像解析から得られた流れの速さは水上ドローンで直接計測した海面付近の流れの速さと一致していたことから、空撮ドローンを用いて正確な海面の流速場が推定できることもわかった。

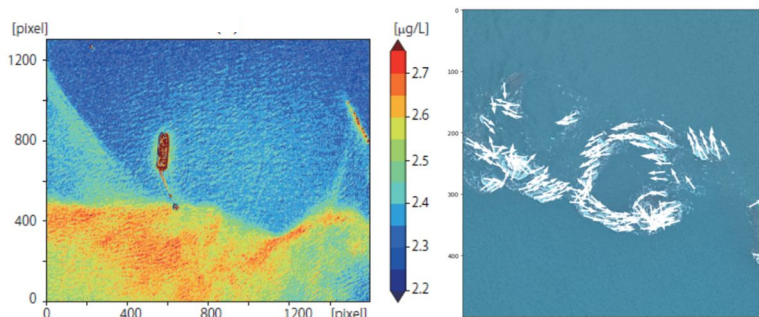


図3: (左) 空撮ドローンと水上ドローンを用いて推定したクロロフィル a 濃度の水平分布。中央に見えるのは小型船舶である。[木田ら, 2023] (右) 空撮ドローンで捉えた河川フロント上の渦とその流速場。[杉原, 2024]

ドローン観測からは、河川水が厚岸大橋付近でフロントを形成しながら厚岸湾へと流出していることが明らかになった。そこで流速計を用いて海域の流れ場の鉛直構造を計測したところ、海底付近で活発な鉛直混合が起きていることがわかった。潮汐に合わせて流れが早くなる際に、厚岸湖と厚岸湾を結ぶ狭い海峡部において海水と河川水が混合し、かつ巻き上げが発生していることが示唆された。採水によって得られた栄養塩は硝酸塩が海面ほど高い一方、リン酸塩は亜表層の方が高かった。湾内へと流出する河川水には河川水由来の成分と厚岸湖底から流出した成分の両方が含まれていること、そして厚岸湖内の海底混合層が厚岸湾の物質循環に重要な役割を担っていることが明らかになった。

湾内と湾外：小型船舶による厚岸湾の横断観測を実施したところ、河川水が厚岸湖から厚岸湾にかけて水深が深くなっている箇所によって流れつつ、反時計回りに厚岸湾に拡散していくことが明らかになった。2021年の観測時は北海道全体に赤潮が発生していたことから、湾外の沿岸域では極めて高いクロロフィル a 濃度が海面付近で計測された。厚岸湾内でも同様に高いクロロフィル a 濃度を計測した。高クロロフィル a 濃度と低塩分水の空間分布は、必ずしも一致していないことから、観測時の高い植物プランクトン濃度は外洋水が引き起こした現象であった可能性がある。小型船舶による湾内側、そしてうしお丸による湾外側の流速観測を行った結果、厚岸湾と外洋の間の海水交換は湾口の最も深い海域を中心に潮汐に合わせて起きていることが明らかになった。

#### 数値モデルを用いた河口域から沖合いまでの流出過程の解明

厚岸湖・厚岸湾を模した物理・生態系結合2次元モデルを構築したところ、河川水がもたらした栄養塩によって、日平均では河口から湾よりにずれた箇所でも植物プランクトンが最も増えることが明らかになった。河口では河川水と海水の希釈効果によって増殖が抑制される一方、湾側寄りでは増殖効果が希釈効果を上回るためである。

さらに別寒辺牛川・厚岸湖・厚岸湾を模した3次元数値モデルを構築し、海域内で起こる河川水と海水の交換メカニズムを検証した。厚岸湖のような水深が浅く・広い水域が存在すると、潮汐振幅に合わせて海水と河川水が厚岸湖と厚岸湾の間で大きく揺れ動くため、活発な鉛直混合が生じることが明らかになった。特に厚岸湖と厚岸湾を結ぶ海峡部では、流速シア混合と海底混合層の発達が同時に起こり、河川水が流出するプロセスとしてエスチュアリー循環ではなく Tidal Pumping が支配的になることがわかった。水深が浅いことで鉛直混合が海面まで到達するため、成層構造をもったエスチュアリー循環が維持できないためである。また厚岸湖の面積が広いことで潮汐に伴う収束と発散が大きくなり、海峡部では強い流れが引き起こされ、鉛直混合が活発化していた。上げ潮時は海底近傍、下げ潮時は流速シアを伴った鉛直混合が河川水と海水の間で起きることが明らかになり、この結果は水上ドローンに搭載した流速計を用いて計測した流速の鉛直構造と一致している。つまり厚岸海域における物質循環は、厚岸湖の浅く・広い地形が作り出した強い潮流によって海峡部で発生する河川水と海水の鉛直混合が駆動していること、そして河川水が湾内へと輸送される経路を決めるプロセスが Tidal Pumping であることがわかった。これらの成果は Journal of Geophysical Research Oceans にて Impact of a Large Shallow Semi-Enclosed Lagoon on Freshwater Exchange Across an Inlet Channel (Kida et al., 2024) として発表した。

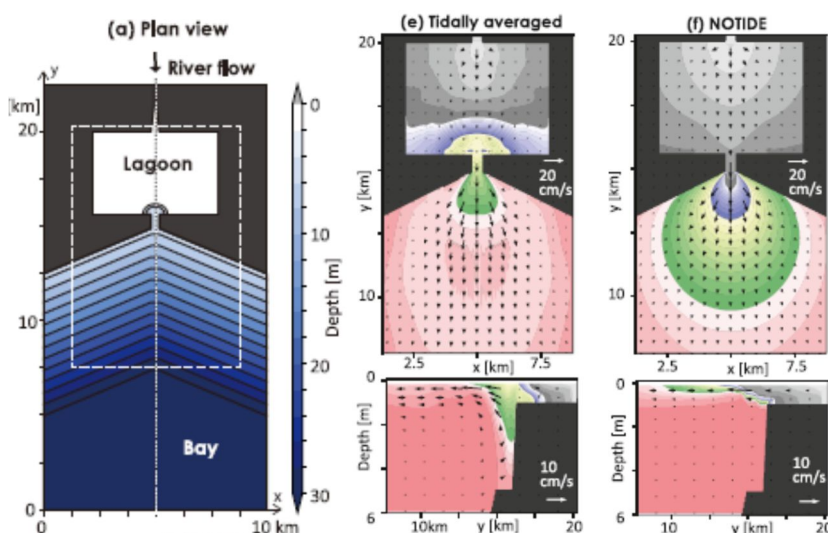


図4：(左)厚岸湖を模した理想モデルの領域図。(中)潮汐を再現した場合と(右)再現しなかった場合の厚岸湖・厚岸湾の平均海面塩分と鉛直断面図。[Kida et al., 2024]

<引用文献>

Matsumura, Y. and H. Hasumi (2008): A non-hydrostatic ocean model with a scalable multigrid Poisson solver, *Ocean Modelling*, 24, pp.15-28,  
<https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2008.05.001>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Kida Shinichiro, Tanaka Kiyoshi, Isada Tomonori, Nakamura Tomohiro	4. 巻 129
2. 論文標題 Impact of a Large Shallow Semi Enclosed Lagoon on Freshwater Exchange Across an Inlet Channel	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2023JC019755	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 木田新一郎、伊佐田智規、田中潔、中村知裕	4. 巻 55
2. 論文標題 ドローンを用いた機動的海中観測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 月刊海洋	6. 最初と最後の頁 346-350
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 無
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14件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 泉智貴, 木田新一郎
2. 発表標題 潮汐が河川水に対する海洋生態系の 応答メカニズムに与える影響
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 泉智貴, 木田新一郎
2. 発表標題 潮汐が河川水に対する海洋生態系の応答メカニズムに与える影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木田新一郎, 田中潔, 伊佐田智規, 中村 知裕
2. 発表標題 ドローンによる汽水域・沿岸域の空撮・水中同時観測
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木田新一郎, 田中潔, 伊佐田智規, 中村 知裕
2. 発表標題 ドローンボートによる海中観測
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木田新一郎, 田中潔, 伊佐田智規, 中村 知裕
2. 発表標題 河川水の流出過程に汽水湖が与える影響
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高見健大朗, 木田新一郎, 磯辺篤彦, 田中潔
2. 発表標題 ドローンとラジコンボートを用いた河川フロントの観測
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高見健大朗, 木田新一郎, 磯辺篤彦
2. 発表標題 ドローン搭載赤外線・可視カメラによる河川フロントの観測
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木田新一郎, 阿部稜, 山敷庸亮
2. 発表標題 沿岸域における河川水の行く末
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木田 新一郎, 杉原 光都, 伊佐田智規, 田中潔, 中村 知裕,
2. 発表標題 空撮ドローンとラジコンボートを用いた海況観測
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Shinichiro Kida, Kiyoshi Tanaka, Tomonori Isada, Tomohiro Nakamura
2. 発表標題 Freshwater exchange across an inlet channel of a large and semi-enclosed lagoon
3. 学会等名 Ocean Sciences Meeting (国際学会)
4. 発表年 2024年



1. 発表者名 杉原光都, 木田 新一郎
2. 発表標題 河川フロントの流速場の高解像度推定
3. 学会等名 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shinichiro Kida, Kiyoshi Tanaka, Tomonori Isada, Tomohiro Nakamura
2. 発表標題 Impact of a Semi-enclosed Estuary on Freshwater Outflow and Biogeochemical Response for a Small-scale River
3. 学会等名 Asia Oceania Geosciences Society ( 国際学会 )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 杉原 光都, 木田 新一郎, 中村 知裕, 横松 和
2. 発表標題 広範囲に捉えた河川フロントの流速場の推定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木田 新一郎, 伊佐田智規, 田中潔, 中村 知裕,
2. 発表標題 河川水の流出過程に汽水湖が与える影響
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2023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	田中 潔  (Tanaka Kiyoshi)  (20345060)	東京大学・大気海洋研究所・准教授   (12601)	
研究分担者	芳村 毅  (Yoshimura Takeshi)  (20371536)	北海道大学・水産科学研究院・准教授   (10101)	
研究分担者	伊佐田 智規  (Isada Tomonori)  (80725359)	北海道大学・北方生物圏フィールド科学センター・准教授   (10101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------