

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12415

研究課題名(和文) 集中豪雨に伴う淡水流入が沿岸海域の貧酸素化に及ぼす物理的影響の評価手法の開発

研究課題名(英文) Examination of evaluation methods of the physical impact of freshwater inflow associated with the heavy rainfall on hypoxia in coastal seas

研究代表者

小林 志保 (Kobayashi, Shiho)

京都大学・フィールド科学教育研究センター・助教

研究者番号：60432340

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では河川モデルと海洋モデルを結合して豪雨時の淡水流入量を算出し、淡水流入が貧酸素化に及ぼす影響を生物化学過程と物理過程に分けることにより、集中豪雨による流動構造の変化が貧酸素化に及ぼす物理的影響を定量化した。本研究の対象海域では豪雨に伴う河川出水時には海水交換が促進されたが、出水後には強い塩分成層により海水交換とそれに伴う酸素供給が抑制されるようになると考えられた。現地観測の結果とモデルによるシミュレーションの結果から、底層の基礎生産力が高く有機物が豊富で夏季に酸素消費量が大きくなる浅い閉鎖性海域では、豪雨の増加により一時的な強い貧酸素化が起きやすくなる可能性があることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では河川モデルと海洋モデルを結合し、これにより任意の海域において、集中豪雨時の淡水流入量を迅速に評価できるようにした。また、淡水流入が貧酸素化に及ぼす影響を生物化学過程と物理過程に分け、これまで不明な点が多かった集中豪雨による流動構造の変化が貧酸素化に及ぼす物理的影響を示した。これにより流量データのない二級河川のみが流入する半閉鎖性海域においても、豪雨時に海域に流入する淡水量を降雨量から推定し、豪雨による海洋構造の変化を把握することができる。また急な低塩分化による養殖貝類のストレス評価、気候変動により増加する集中豪雨が海洋の貧酸素化に及ぼす影響の予測等、社会的な課題の解決にも応用できる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we estimated freshwater inflow to the small inlet during heavy rainfall by combining a river model and an ocean model, and divided the influence of freshwater inflow on hypoxia into biochemical and physical processes, in order to quantify the physical impacts of changes in flow structure caused by heavy rainfall on hypoxia in coastal seas. In this study area, seawater exchange is enhanced during river runoff due to heavy rainfall, but after the runoff, strong salinity stratification suppresses seawater exchange and the associated oxygen supply. The results of the field observations and the model simulations suggest that shallow enclosed seas with high benthic productivity of the bottom layer, rich in organic matter, and high oxygen consumption in summer may be susceptible to temporary strong hypoxia due to increased heavy rainfall.

研究分野：海洋環境学

キーワード：集中豪雨 貧酸素化 沿岸海域

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

貧酸素化は、水域において酸素の消費が供給を上回った場合に発生し、水圏生物の窒息死を招く深刻な環境問題である。近年の集中豪雨の増加は、低塩分水が海面を覆って水域内部への酸素供給を妨げる期間の長期化につながり、新たな貧酸素化のリスク要因となっている。集中豪雨が沿岸海域の貧酸素化に及ぼす影響を評価するには、淡水とともに流入した有機物等の分解が酸素消費に及ぼす生物化学的影響と、淡水流入に伴う海域の流動構造の変化が酸素供給に及ぼす物理的影響を明らかにする必要がある。後者の物理的影響は、海域における貧酸素化の進行または緩和に対して支配的であることが知られているが(藤原ら,2001)、集中豪雨時における淡水流入量やそれによる流動構造の変化について不明な海域も多く、集中豪雨の増加が海域の貧酸素化に及ぼす影響評価を困難にする要因の一つとなっている。

日本海側の七尾湾においては集中豪雨の直後に、貧酸素水塊が拡大することが確認された。しかしながら陸域からの淡水流入量が定量化されていないこうした海域では、貧酸素水塊の変動メカニズムの解明は困難であった。

申請者はこれまでに、海域への淡水流入によって起きる上層流出、中下層流入の密度流(図1 黒矢印)の変動機構やそれが沿岸生態系に及ぼす影響を解析するために、沿岸の流動・生態系モデル(Kobayashi et al.,2009)を開発している。このモデルに、本研究を通じて流域水収支モデルを接続することにより、任意の海域において、集中豪雨に伴う淡水供給が貧酸素化に及ぼす物理的影響を評価できるようにすることを考えた。

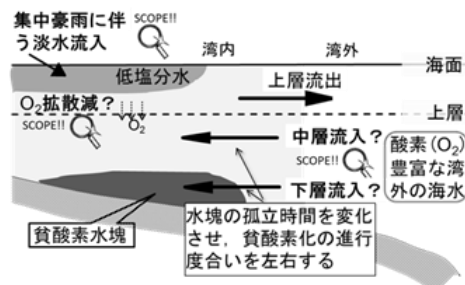


図1 集中豪雨が海域の貧酸素化に及ぼす物理的影響

### 2. 研究の目的

本研究では、任意の海域において集中豪雨の影響を迅速に評価するために、海岸沿いの塩分を用いた流域水収支モデルの調整法と淡水流入量の推定法を開発し、申請者らの開発してきた沿岸海域の流動・生態系モデルに接続する。このモデルを用い、集中豪雨に伴う淡水流入が、海域の流動構造と海域下層への酸素供給量を変化させることを通じて、貧酸素化に及ぼす影響を定量評価できるようにする。このような物理過程は貧酸素化の進行を大きく左右する。このため本研究の成果は、集中豪雨に伴う大規模な淡水流入によって貧酸素化するリスクが高まる海域の把握につながり、気候変動に対する適応策の立案に役立つ。

### 3. 研究の方法

本研究では、集中豪雨に伴う淡水流入が貧酸素化に及ぼす物理的影響を、以下の手順で定量的に評価した。現地観測は、降雨後に貧酸素水塊が拡大することが確認されている日本海側の七尾湾をモデル海域として行なった。

(1) 図2に示した観測点において2019年から2022年7月から9月まで2週間ごとに水温、塩分、溶存酸素濃度の鉛直分布を測定した。降雨後および晴天時等に現地観測を行なって、海面塩分および溶存酸素濃度の分布とその変動を調べ、豪雨が貧酸素水塊の規模の変化に及ぼす影響を明らかにした。

(2) また2021年、2022年7月から8月の2か月間、湾内の3地点に設置された塩分連続記録計のデータを解析するとともに、湾に流入する熊木川に水位計と流速計を設置して1時間ごとの流量を求めた。このデータを用いて陸域からの流域水収支モデルの係数を推定し、またそのモデルを用いて淡水流入量を定量化した。

(3) 沿岸の流動・生態系モデルに(2)の結果を含めた気象・海象データを境界条件として与え、淡水流入量を変化させる感度実験を行ない、降雨量を含む気象条件の変化が海水交換に及ぼす影響を評価することにより、集中豪雨による流動構造の変化が貧酸素化に及ぼす物理的影響を示した。

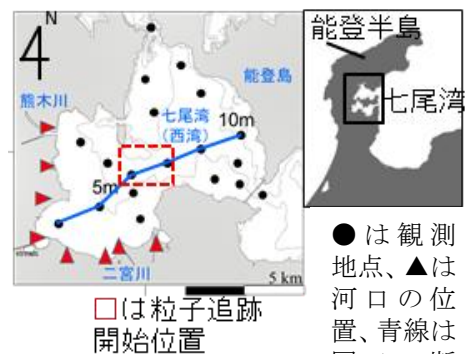


図2 観測地点図

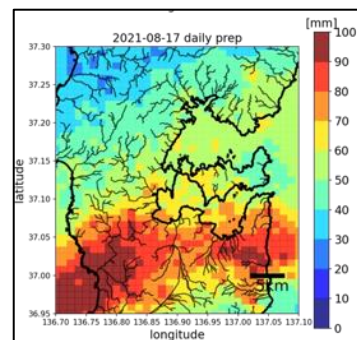
●は観測地点、▲は河口の位置、青線は図4の断面を表す。

### 4. 研究成果

#### (1) 豪雨が海域環境に及ぼす影響

気象庁解析雨量データによると2021年7月から8月にかけて七尾湾集水域において日降水量100mmを超える大雨が4回観測されている(図3)。降雨から数日後における海洋観測では、表層の顕著な低塩分化と下層の貧酸素化が確認され、その影響は少なくとも1週間続いていた(図4)。また連

図3 2021年8月17日の日降水量の分布



続塩分記録計により得られた表層塩分の時系列変化から、降雨後の低塩分は海上風が北東風である場合には南西風である場合に比べて長く続くことが示された。長く続く表層の低塩分は鉛直成層が強い状態が長く続くことを意味しており、海域下層への鉛直的な酸素供給量が低下する影響をもたらすと考えられる。また河川水の流入によって海域の水平密度勾配が高まり、エスチュアリー循環による湾奥-湾口方向の海水交換率が上昇すると考えられるが、北東風はこれを抑制すると考えられる。降雨後の貧酸素化はこれらの影響を反映していることが示唆された。

### (2) 陸域からの淡水流入量の推定

対象海域に流入する最大河川の一つである熊木川における連続観測から得られた1時間ごとの流量と1時間降雨量とを図5に示した。貯留関数法を用いて1kmメッシュのレーダー解析雨量(気象予報業務センター)から河川流量を推定する河川モデルを作成し、観測した流量を用いて検証し、降水の損失を反映する有効雨量を調整することによって流量の推定精度を上げた。モデル値と観測値の差は出水期間にやや大きくなったが、全期間のRMSEは3.0であり、十分な精度を示した。そこでこのモデルを用いて、集水域全体から海域に流入する淡水量を推定した。

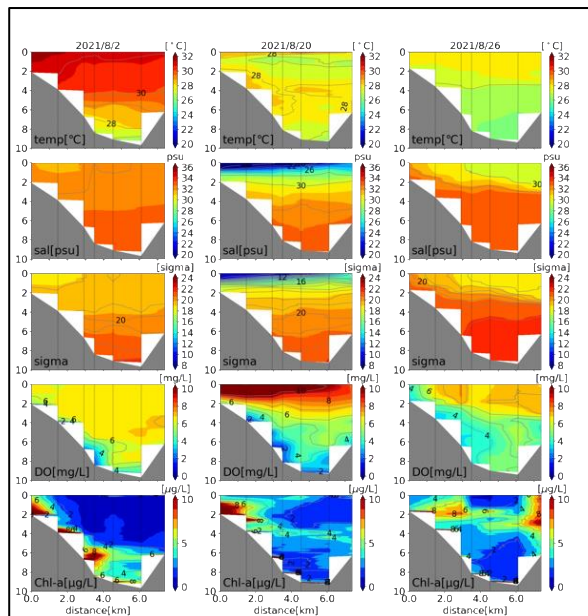


図4 2021年8月の海洋観測結果

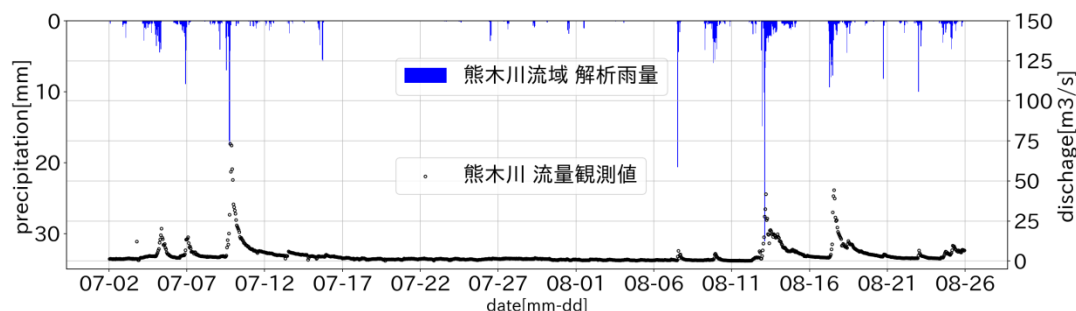


図5 1時間当たりの降雨量と河川流量

### (3) 豪雨による流動構造の変化が貧酸素化に及ぼす物理的影響

沿岸の流動・生態系モデルに(2)の結果を含めた気象・海象データを境界条件として与え、(1)の現地観測結果を用いて表層の塩分が実測結果と合うように河川流出モデルの係数を最適化した。最適化後のモデル計算結果と実測値の誤差(RMSE)は全層の水・塩分について(観測3回分のデータ×26地点×0.1mごと、n=6805)それぞれ1.05, 3.75であり、十分な精度を保てると思われた。淡水流入量が増加すると上層から湾内の水が流出し、下層から湾外の水が流入する海水交換が強まることから、湾口における流速分布の時間変化によって示された(図6)。

また、出水時と出水後に貧酸素化領域である湾中央部下層に粒子を置いて追跡を行なった。次に風、潮汐、淡水流入とそれらの相互作用の影響を除去して粒子追跡を行い、海水交換に対する各要因の寄与を調べた結果を図7に示した。この結果、風は海水交換を促進し、潮汐は海水交換を抑制していると思われた。一方、淡水流入は出水時には海水交換を促進すると思われたが、塩分層の形成されていた出水後(平水時)には、海水交換を抑制する結果となった。

湾奥上層から湾口に向けて低塩分水が流出し、湾口から湾奥下層に酸素を多く含む高塩分水

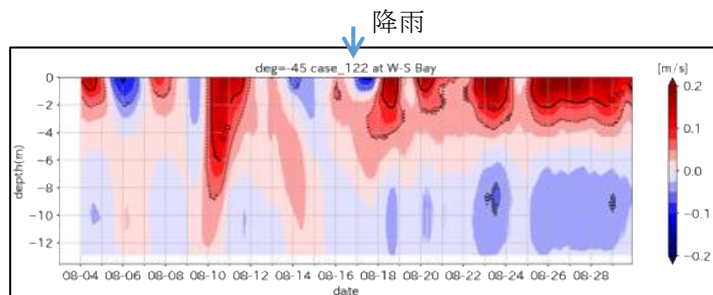


図6 湾口における25時間平均流速の鉛直分布の時間変化

が流入する鉛直循環流が発達している内湾においては、河川水の流入は内湾の海水交換や貧酸素化領域への酸素供給を促進することが多いことが過去の研究により知られている。本研究の対象海域では豪雨に伴う河川出水時には海水交換が促進されたが、出水後には強い塩分成層の影響で海水交換とそれに伴う酸素供給が抑制されるようになると考えられた。底層の基礎生産力が高く有機物が豊富で夏季に酸素消費量が大きくなる浅い閉鎖性海域では、豪雨の増加により一時的な強い貧酸素化が起きやすくなる可能性があることが示唆された。

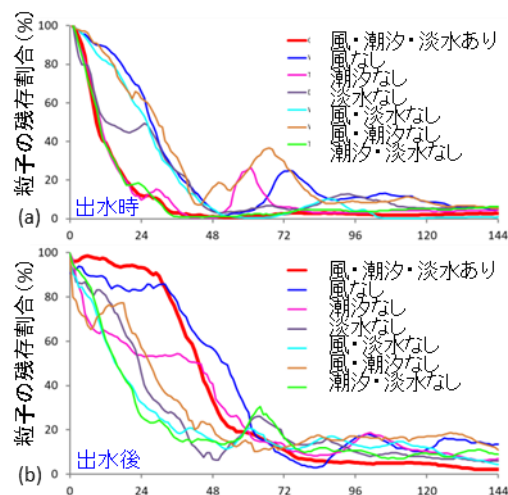


図 7 モデルによる粒子追跡の結果. 最初に粒子を置いた領域内に残存する粒子の減少速度が大きいほど下層の海水交換が大きいと考えられる

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shiho Kobayashi, Kentaro Nagao, Daiki Tsurushima, Satoshi Sasakura, Tateki Fujiwara	4. 巻 45
2. 論文標題 Seasonal Changes of Estuarine Gravitational Circulation: Response to the Annual Temperature Change	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Estuaries and Coasts	6. 最初と最後の頁 737-753
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12237-021-00991-6	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 Lavergne Edouard, Kume Manabu, Ahn Hyojin, Henmi Yumi, Terashima Yuki, Ye Feng, Kameyama Satoshi, Kai Yoshiaki, Kadowaki Kohmei, Kobayashi Shiho, Yamashita Yoh, Kasai Akihide	4. 巻 -
2. 論文標題 Effects of forest cover on richness of threatened fish species in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Conservation Biology	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） 10.1111/cobi.13849	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 渡部 夏帆, 小林 志保, 淵 真輝, 浅岡 聡, 林 美鶴	4. 巻 43
2. 論文標題 淀川河口部汽水域における有機物の起源と分解特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 水環境学会誌	6. 最初と最後の頁 87-96
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 Kei Senbokuya, Shiho Kobayashi, Noriyuki Ookei, Yoh Yamashita	4. 巻 85(2)
2. 論文標題 Impact of nighttime hypoxia on ark shell <i>Scapharca broughtonii</i> mortality on a semi-enclosed embayment seabed	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Fisheries Science	6. 最初と最後の頁 369-377
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 Kobayashi, S., S. Nakada, A. Futamura, K. Nagamoto, T. Fujiwara	4. 巻 17(3)
2. 論文標題 Observation and modeling of seawater exchange in a strait-basin system in the Seto Inland Sea, Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Water and Environment Technology	6. 最初と最後の頁 141-152
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 -

〔学会発表〕 計13件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Kobayashi, Shiho; Okuno, Jun-ichi; Senbokuya, Kei; Nakada, Satoshi; Nambu, Masahiro
2. 発表標題 Impact of Heavy Rainfall on the Seawater Exchange Rate of Hypoxic Area in a Semi-enclosed Bay (Nanao Bay, Japan)
3. 学会等名 WET2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kobayashi, Shiho; Okuno, Jun-ichi; Senbokuya, Kei; Nakada, Satoshi; Nambu, Masahiro
2. 発表標題 The physical impact of the heavy rainfall and freshwater inflow on hypoxia in a semi-enclosed sea
3. 学会等名 JpGU2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nambu, Masahiro; Okuno, Juichi; Senbokuya, Kei; Okei, Noriyuki; Kobayashi, Shiho
2. 発表標題 Estimation of freshwater inflow into a semi-enclosed bay during heavy rainfall: A case study in Nanao Bay, Ishikawa Prefecture
3. 学会等名 JpGU2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 奥野充一、仙北屋圭、小林志保
2. 発表標題 七尾湾西湾カキ養殖場の底泥酸素消費および底質からの栄養塩溶出
3. 学会等名 富山湾研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shiho Kobayashi, Satoshi Nakada, Masaki Fuchi, Mitsuru Hayashi, Joji Ishizaka
2. 発表標題 Evaluation of Chlorophyll-a Concentration derived from a Satellite Ocean Color Sensor (COMS/GOCI) in Osaka Bay
3. 学会等名 WET2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shiho KOBAYASHI, Satoshi NAKADA, Jun-ichi OKUNO, Kei SENBOKUYA
2. 発表標題 Estimation of coastal freshwater discharge using surface salinity of Nanao Bay
3. 学会等名 JpGU2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林志保、中田聡史、仙北屋圭 奥野充一、南部正裕
2. 発表標題 高解像度海洋モデルを用いた極浅海域における貧酸素水塊の消長機構の解析
3. 学会等名 水環境学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kobayashi,Shiho; Watanabe,Kaho; Fuchi,Masaki; Asaoka,Satoshi; Asahi,Toshimasa; Yamamoto,Keigo ;Akiyama, Satoshi
2. 発表標題 Spatial changes in form of nitrogen and biodegradability of organic matter in a river front zone
3. 学会等名 JpGU2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 KOBAYASHI,Shiho; NAKADA,Satoshi; OKUNO,Jun-ichi; SENBOKUYA Kei
2. 発表標題 Simulating the Impact of Heavy Rainfall on Coastal Marine Environment for the Case with No River Discharge Data
3. 学会等名 WET2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林志保, 上田幸男, 湯浅明彦, 原田慈雄, 御所豊穂, 中田聡史, 山本圭吾, 秋山諭
2. 発表標題 有色溶存有機物の光吸収係数を用いた河川水の影響範囲の推定方法の検討
3. 学会等名 2020年度 日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林志保, 中田聡史, 秋山諭, 山本圭吾, 石坂丞二, 淵真輝, 林美鶴
2. 発表標題 高解像度衛星観測データを用いた河川出水時における河口フロントの移動の可視化
3. 学会等名 2020年度 水環境学会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 小林志保, 久米学, Hyojin Ahn, 遠見由美, Edouard Lavergne, 寺島佑樹, Feng Ye, 亀山哲, 甲斐嘉晃, 山下洋, 笠井亮秀
2. 発表標題 環境DNAによる森里海連環の解明～河口域魚類群集に底層溶存酸素濃度が及ぼす影響～
3. 学会等名 日本水産学会春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林志保
2. 発表標題 七尾湾の海洋環境 - アマモの果たす役割とは -
3. 学会等名 能登の森里海研究会講演会（招待講演）
4. 発表年 2019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

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