

茨城県・茨城大学共同霞ヶ浦水循環・生態系解明プロジェクト

〔事業責任者〕

(自治体等側) 茨城県霞ヶ浦環境科学センター・センター長

福島 武彦

(大学側) 地球・地域環境共創機構・助教

増永 英治

連携先

茨城県霞ヶ浦環境科学センター

プロジェクト参加者

【茨城大学】

増永 英治 (茨城大学, 助教, 総括, 調査, 解析)

石川 由紀 (茨城大学, 助教, 調査, 解析)

池田 雅 (茨城大学, 理工学研究科 M2, 調査)

佐藤 和貴 (茨城大学, 理工学研究科 M1, 調査, 解析)

到津 春樹 (茨城大学, 理工学研究科 M1, 調査)

松本大樹 (茨城大学, 工学部 B4, 調査, 解析)

【茨城県】

福島 武彦 (霞ヶ浦環境科学センター, センター長, 総括)

湯澤 美由紀 (霞ヶ浦環境科学センター, 首席研究員兼湖沼環境研究室長, 総括)

北村 立実 (霞ヶ浦環境科学センター, 主任研究員, 調査, 水質分析, 解析)

大内 孝雄 (霞ヶ浦環境科学センター, 主任, 調査, 水質分析, 解析)

【国土交通省】

館野 悟 (関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所, 副所長)

阿比留 裕信 (関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所, 湖沼環境課, 課長, 調査)

三野 剛司 (関東地方整備局霞ヶ浦河川事務所, 湖沼環境課, 専門管, 調査)

【東京大学】

伊藤 幸彦 (東京大気海洋研究所, 准教授, 乱流調査)

川口 悠介 (東京大気海洋研究所, 助教, 乱流調査)

堤 英輔 (東京大気海洋研究所, 特任助教, 乱流調査)

プロジェクトの実施概要

①プロジェクトの目的

霞ヶ浦は、琵琶湖に次ぐ国内第2位の湖面積を誇る湖として知られ、水資源として周辺の環境及び、経済産業活動に大きな影響を与えている。しかしながら霞ヶ浦においては水環境問題が顕在化しており長年、湖内や流域で水質浄化対策を講じてきたにも関わらず、水質問題の抜本的な解決には至っていない。湖沼環境の悪化には、様々な要因が挙げられるが霞ヶ浦においては富栄養化に伴う諸問題が環境悪化の要因となっている。写真-1に示すような富栄養化によるアオコの大量発生による景観の阻害及び悪臭や、水質汚濁による生物への悪影響が顕在化している。

一般的な湖沼では窒素(以下 N)が生物(植物プランクトン)増殖に対する主要な制限要因であり、これまでに N の動態に関する研究は数多く行われてきた。湖沼への N の負荷は主に河川や土壌からの流入による。これに対して、りん(以下 P)は湖そのものが発生源となることがあり、特に貧酸素水塊(溶存酸素濃度 3mg/L 以下の極めて酸素の低い水)と接触する湖底から溶出しやすい。富栄養化に伴う生物の大量増殖とそれに

伴う酸素消費も重要な問題であるが、貧酸素状態による湖底からのPの溶出も水質改善をする上では考慮する必要がある。すなわち富栄養化が進行し底質にPが堆積する湖沼では、「藻類の増殖→沈降した藻類の呼吸・分解による酸素消費→貧酸素状態による底質からのPの溶出→Pの溶出による更なる富栄養化と生物増殖→…」といった負の連鎖フィードバックが発生していると考えられる。この連鎖が水質悪化の要因と考えられている湖沼が霞ヶ浦である。そのため貧酸素水塊が頻繁に発生する霞ヶ浦では、Nの負荷量に加えPの分布をモニタリングすることが生態系の把握や富栄養化の評価にとって重要である。

さらに湖水中における栄養塩や酸素の動態は化学・生物学的プロセスに加え、移流・拡散を伴う物理学的プロセスによってもコントロールされている。しかしながら湖沼における栄養塩の化学・生物プロセスは数 km 程度の大きなスケールで扱われており、小スケールで発生する物理プロセスによる影響が考慮されることはなかった。

本連携プロジェクトでは水質環境の改善が特に急務と言われる霞ヶ浦を対象に水循環過程及び、湖沼内における水循環過程と循環に関わる栄養塩の動態について調査することを目的とした。

②連携の方法及び具体的な活動計画

湖沼や海洋における水循環や生態構造を解



写真-1. (左) アオコ大量発生時の霞ヶ浦の漁港と (右) 夏季に頻繁に水面に見られる魚類の死骸。

明するには、現地で実際に調査を行うことが

必要不可欠である。また実地調査で得たデータを精密に解析・考察することが学術的及び社会還元的なアウトプットに必要である。さらに実地調査や地域への社会還元アウトプットには、調査地域を統括する自治体との連携が必要である。そこで本プロジェクトでは、長年霞ヶ浦における水質調査の実績を持つ茨城県霞ヶ浦環境科学センターと流体现象の解析を専門に扱う茨城大学（増永研究室）が共同し、目的を達成するために連携する試みである。具体的には、茨城県が問題としている霞ヶ浦の富栄養化問題に対して、地球流体力学的な観点から大学側が調査手法の提案・指導を行い調査を進める。実地調査によって得られたデータについては、両機関の得意とする分野の解析を担当し、最終的に解析データを統合しアウトプットとする。例えば、化学分析に精通する茨城県は水質分析（NやP）を担当し、物理計測データ（水温や流速）は流体データ解析を得意とする大学研究室側で担当した。大学と県に加え、実地調査と助言を国土交通省、精密な乱流計測を東京大学の研究者に指導を頂いた。

霞ヶ浦は、主に3つの西浦と北浦から構成されている（図-1）。本事業初年度は北浦のみを調査対象域としていたが、昨年度からは

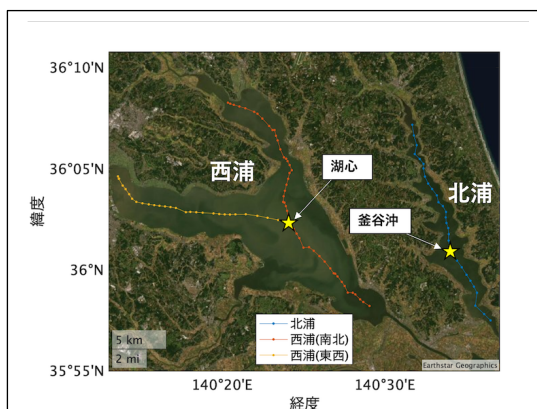


図-1. 実地調査地域地図。星印は主な係留観測装置設置場所。点を伴う線は8月4日の観測ラインを示す。

北浦に加え西浦も調査水域に加えることで、

霞ヶ浦の水循環像や関連する生態系構造の全体像を把握することを計画した。また本年度は昨年度から本格運用を開始した乱流計測用の水温係留装置及び微細構造観測装置（VMP-250）に加え、係留型の微細構造観測装置（Vector）を東京大学川口助教の協力のもと北浦で実施することを試みた。

③期待される成果

まず県と大学が共同調査を実施し、詳細な湖の物理構造を把握することで、これまで明らかとなっていなかった霞ヶ浦における基礎的な水循環プロセスが把握できる。この水循環プロセスと化学的な反応を伴う富栄養化過程の関連性を調査し、物理学と化学を統合させた水・栄養塩循環構造が明らかとなる。さらに茨城大学と茨城県の連携だけでなく、国土交通省と東京大学大気海洋研究所の協力を得ることで本連携事業が促進されることが期待される。

明らかとなった水循環過程に関わる富栄養化動態を、県や国に報告し、将来的な水環境対策への提案へ繋げる。例えば、貧酸素水塊発生と栄養塩溶出に対するメカニズムが明らかとなれば、より効率的な水環境改善策へ繋げることができる。また水や栄養塩循環の過程を漁業者と共有することで効率的な漁獲や養殖へ発展させられることが期待できる。昨今地球環境を取り巻く上で大きな問題となっている気候変動に伴う霞ヶ浦の環境の変化も、水循環や生態系構造が明らかとならなければ気候変動に伴う適応策にも生かすことが可能である。水循環過程解明に伴う環境対策提案が実現すれば、茨城県霞ヶ浦における富栄養化湖沼の対策を世界の同様な問題を抱える地域へ向けモデルケースとして発信することも可能である。

本プロジェクトに関わる合同の調査・報告会等の実績を時系列順に下に列挙する。

- 4月2日：県・大学プロジェクト打ち合わせ（茨城大学日立キャンパス）
- 5月27～28日：水温計と流速計係留系を北浦、西浦へ設置
- 7月16～17日：流速計一時撤収（メンテナンス）
- 7月28～30日：係留系再設置
- 8月4日：北浦・西浦集中実地調査
- 8月11～12日：北浦・西浦集中実地調査
- 9月29～30日：水温係留系回収，流速計係留系メンテナンス
- 12月3日：調査報告会（霞ヶ浦環境科学センター）
- 1月20～21日：全係留系回収

連携3年目である本年度は、昨年度から漁協の協力により実施することが可能になった7月中旬～8月の貧酸素水塊の発生が頻繁に起こる時期に集中的に実施した。調査は、大きく4つの項目に分けられ、(1)係留系観測、(2)曳航式観測装置を用いた高解像度断面観測、(3)採水水質調査及び(4)乱流微細構造計測である。係留系は、水温計及び流速計を北浦釜谷沖、西浦湖心に設置した。また流速計のみを用いた係留系を5箇所を設置した。曳航式観測装置を用いた調査は、8月の集中観測時に実施した。水質調査では、栄養塩、濁度、クロロフィルa濃度やフィコシアニン濃度を計測した。昨年度から本格運用を始めた物質の鉛直輸送量を定量化可能なVMP-250に加え、本年度は固定係留式の微細構造観測装置Vector（Nortek）を釜谷沖に湖底直上（1m）に設置した。このVectorに高解像度酸素計を搭載することで、酸素の鉛直輸送量

プロジェクトの実施成果

① 活動実績

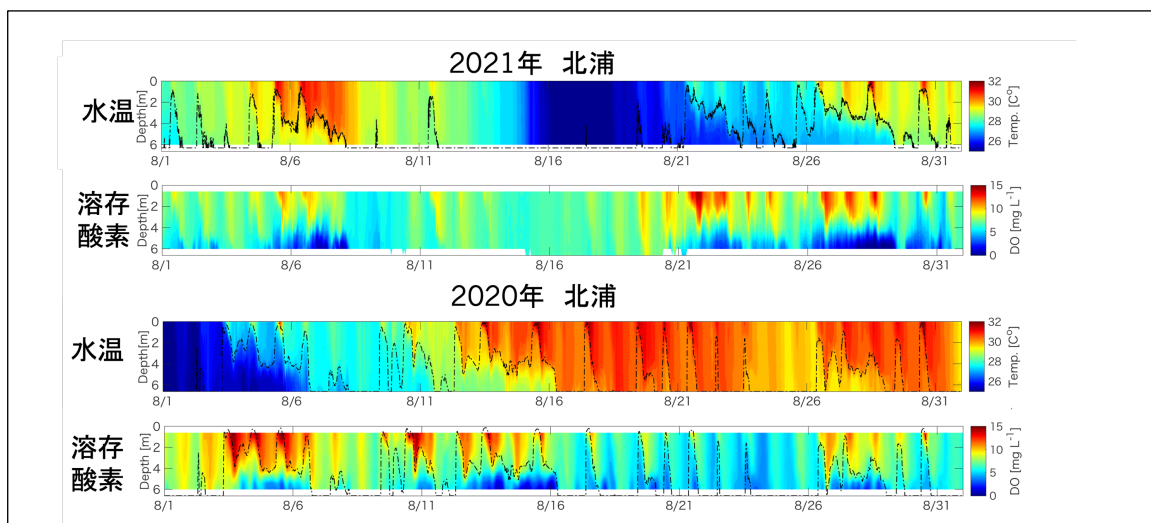


図-2. 北浦釜谷沖における8月の水温と溶存酸素の鉛直時系列の2020年と2021年の比較.

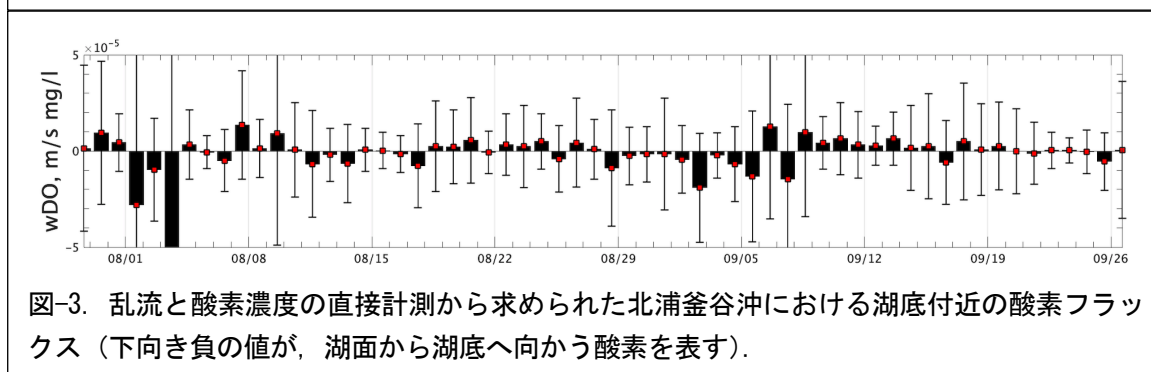


図-3. 乱流と酸素濃度の直接計測から求められた北浦釜谷沖における湖底付近の酸素フラックス（下向き負の値が、湖面から湖底へ向かう酸素を表す）.

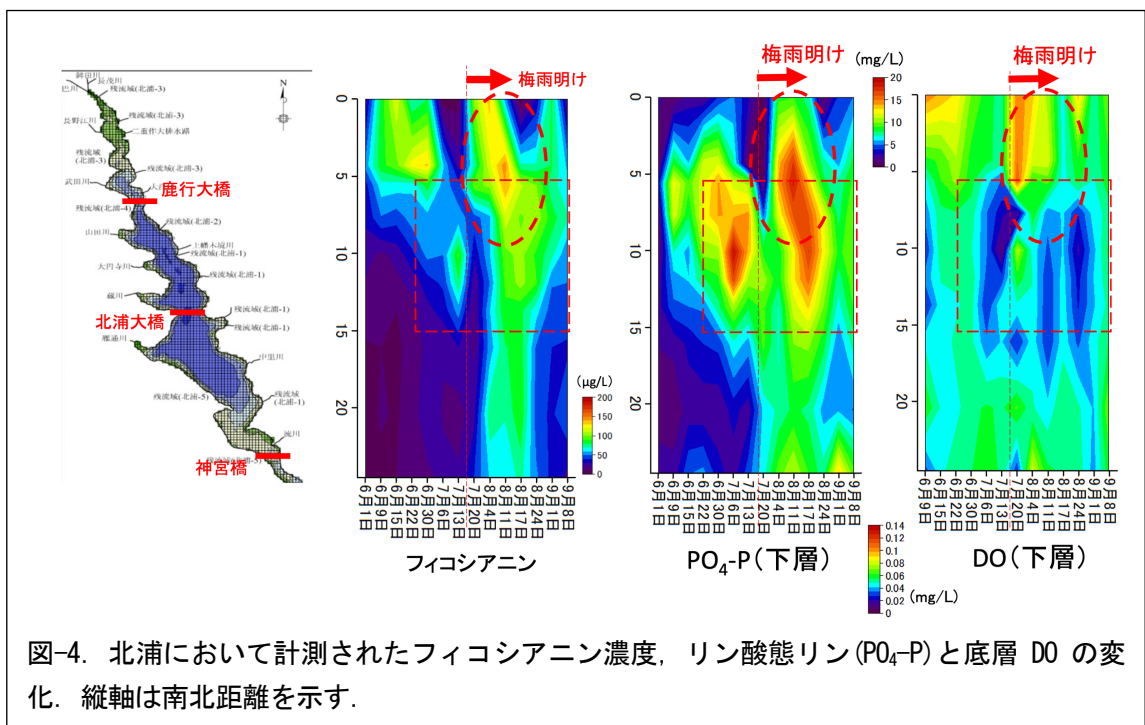
の直接計測を試みた.

調査の結果、北浦と西浦では同じ気象条件下にあるにも関わらず混合状態が異なることがわかった。西浦の方が湖面積が大きく風の影響を受けやすく、鉛直混合が促進され底泥の巻き上げが強く、貧酸素水塊の発生も少ない。一方北浦では顕著な貧酸素水塊が発生していた（詳細は昨年度の報告書に記載）。このことは、昨年度の結果と同様であるが継続的に同様な現象が年を跨ぎ発生していることが明らかになったことは顕著な成果と言える。また2年間の継続した調査から、暑夏出であった昨年度に比べ本年度は、水温が1.5°C程度低く貧酸素水塊の発生が少なかったことがわかった（図-2）。

Vector と高解像度溶存酸素計を用いた計測

から鉛直方向の酸素の輸送は、一定ではなく断続的に強い湖底への酸素供給が発生していることがわかった（図-3）。本研究が実施した湖沼における乱流混合と酸素輸送動態の直接計測は、学術的にも新しく日本の淡水湖で実施された初の事例である。本プロジェクトが技術的な計測技術の発展にも貢献していると言える。

継続的な採水調査の結果から、梅雨明け前後の貧酸素水塊発生と同時にリン酸濃度が上昇し、フィコシアニン濃度が上昇していることがわかった（図-4）（フィコシアニンとはアオコの原因となる藍藻類に含まれる色素のことである）。このことは、貧酸素状態化で底泥から溶出したリンを元に藍藻類が大量発生していることを示唆している。また混合状態から環境問題として懸念されているアオコ発



生への一連の流れを明らかにする重要な調査結果と言える。

12月には調査結果の報告会を設け、茨城大学、茨城県、国土交通省、東京大学大気海洋研究所の担当者間で調査結果を共有し、水質改善策へ向けた議論を実施した(写真-2)。

今年度の連携成果により発信した学術的アウトプットを下に記す。太字は本年度のプロジェクト参加者を示す。

・学術論文

小室俊輔，北村立実，大内孝雄，増永英治，浅岡大輝，鮎川和泰，三上育英，清家泰，湯澤美由紀，**福島武彦**，2021年，北浦における貧酸素水塊の詳細分布と貧酸素水域面積の推計，水環境学会誌，44/5，157-164。

・学会発表等

Eiji Masunaga, Tatsumi Kitamura, Sachihiko Itoh, Vertical mixing and mass transport in a shallow lake, Lake Kasumigaura, Japan, JpGU Meeting 2021, 2021年6月。



写真-2. 報告会の様子。

北村立実，大内孝雄，木村夏紀，古川真莉子，湯澤美由紀，福島武彦，増永英治，鮎川和泰，清家泰，北浦における底泥からのリン溶出速度の特徴，第85回日本陸水学会東京大会，2021年9月。

北村立実，大内孝雄，木村夏紀，古川真莉子，湯澤美由紀，福島武彦，増永英治，島根大学 鮎川和泰，清家泰，北浦における現場観測データを用いた底泥からのPO₄-P溶出量算出の試み，第56回日本水環境学会年会，2022年3月。

影響を評価することも今後進める。

北村立実, 増永英治, 鮎川和泰, 夏季の北浦における水温成層及び貧酸素水塊の形成と消失条件の検討, 霞ヶ浦流域研究2022, 2022年3月.

佐藤和貴, 増永英治, 北村立実, 夏期の霞ヶ浦の西浦と北浦の混合状態の比較, 霞ヶ浦流域研究2022, 2022年3月.

② プロジェクトの達成状況

プロジェクトの2年目の目標として設定した西浦と北浦の両水域における調査と夏季の貧酸素水塊発生時に集中調査を実施したことから, プロジェクトの目標は十分に達成できていると言える。また自治体と大学研究室の連携による学会発表や論文投稿も積極的に行っていることから, 連携の成果が学術的アウトプットとして学術論文や学会等を通じて社会への知の還元として十分に現れていると言える。特に流体力学的な知見から大学側がサポートを行い県が中心になり執筆し投稿した論文が掲載されたことは, 有意義な連携が行われていることが成果として確実に現れている(小室ら2021)。

国土交通省の北浦水質改善委員会へ委員として参加している増永は, 本連携事業の成果を踏まえて北浦の水質改善への提言を行なっていることから, 政策提言としてのアウトプットという役割も果たしていると言える。

③ 今後の計画と課題

本年度で3年目となるため本連携事業は本年度で終了であるが, 継続的に県と連携しこれまで取得した膨大な調査データの解析が課題として残っているため, 継続してデータの解析を進める。気候変動的な要素も取り入れた解析を実施し, 将来予測等の実用可能な解析データの蓄積を進める。また実地調査に加え, 流体のシミュレーションも導入することでより詳細な水循環構造とその生態系への