

陸域海洋圏生態研究部



研究テーマ・キーワード

- 環北極域における大気-陸域水循環の変動と地球温暖化
- 気候変動や人間活動が陸域生態系・水循環に及ぼす影響
- 南極大陸における温暖化・人間活動影響の検出・評価
- アジアモンスーン域の雲・降水変動とその変動機構
- 縁辺海や沿岸域における植物プランクトンの動態
- 気候変化に伴う外洋生態系および物質循環過程の変化
- 海洋の波動現象と気候変動との相互作用
- 海洋表層から中深層への生物起源物質の輸送過程
- 現地観測、データ解析および数値モデルによる総合的解析

地球表層に存在する陸域海洋圏は、太陽からのエネルギーを吸収し、エネルギーの再配分を行うとともに、水や二酸化炭素などの物質循環を通して地球の気候システムの形成と維持に重要な役割を果たしている。本研究部では、地域から全球規模までの陸域海洋圏の生態系におけるエネルギー・水輸送と物質循環を、多地点での現地観測を行いつつ、全球を網羅する人工衛星データや大気再解析データ、数値モデル等を駆使して総合的に研究を行っている。

陸域については、熱帯域から極域に至る世界各地を研究対象とし、地球温暖化や人間活動が水循環・物質循環に及ぼす影響を評価するとともに、そのメカニズムを解明する研究に取り組んでいる。フィールド観測、ラボ実験、データ解析、そして数値シミュレーションなどの研究手法を組み合わせ、北極域における温暖化の実態把握、大気-陸面間で起こる水循環過程の解明、アジア域における雲・降水活動の変動機構の解明、気候変化に伴う植生変化の予測、南極大陸における温暖化影響の検出など多彩な研究に取り組んでいる。

海洋については、最新の人工衛星による観測や数値シミュレーションによる研究を、海洋の現場観測も行いながら進めている。海洋の熱収支や流れ・波浪が大気環境とどのように相互作用し、気候や台風などの気象現象とどのように関連しあっているのか、これによって起こる海洋の流れや混合過程が海洋の一次生産者である植物プランクトンを基盤とした海洋生態系にどのように影響を与えているのか、逆に生態系が物理現象や気候へ影響する可能性などについて、互いに関連し合う海洋の物理・生物・化学過程さらに気候や気象現象を含め、総合的に研究している。

2022 年度の主な活動

北極域河川の冬の河川流出量は夏の正味降水量で決まる

北極域河川の東シベリア・レナ川では、1980年代から2010年代にかけて冬の河川流出量が増加傾向にあった。しかしその理由は分かっておらず、気候変動に伴う永久凍土融解や陸面水収支の変化など、複数の仮説が考えられていた。我々は陸面モデルと河川モデルを結合した水文モデルを用いて、1979-2016年（38年間）を対象に、レナ川の冬の河川流出量をトレンド解析し、それに影響すると考えられる永久凍土融解と陸面水収支のトレンド解析を行った。その結果、夏の正味降水量が増加傾向を示したレナ川上流域（流域南部）において、冬の基底流出量が増加傾向を示すことを見出した。（なお、正味降水量とは、降水量から蒸発散量を差し引いた水量、すなわち陸面が正味に受け取った水量のことである。）夏の正味降水量の増加は、夏から秋（8-9月）に深化傾向を示した活動層内の土壌水分量の増加を引き起こし、秋から冬にかけての基底流出量の増加に結びついていた。活動層の深さ、土壌水分量、基底流出量の関係を見たところ、秋には、レナ川上流域（流域南部）と下流域（流域北部）において、全てが正の相関関係にあった。一方、冬には流域北部は活動層が再凍結してしまうため、レナ川上流域にのみ、正の相関関係を示す領域が存在することが分かった。これらの解析に加え、温暖化に伴う河川氷

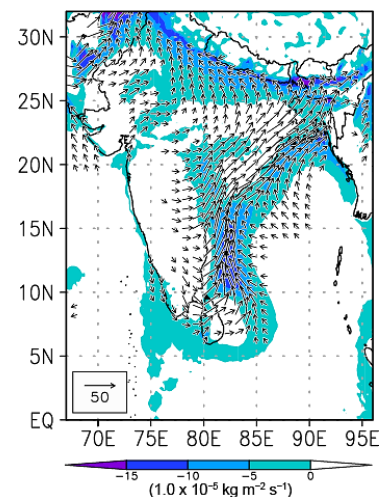
の薄氷化も、冬の河川流出量の増加に寄与することが分かった。これらの解析結果は、温暖化に伴う河川氷の薄氷化と永久凍土融解（活動層深化）とともに、気候変動によってもたらされる夏の正味降水量の変動が、冬の河川流出量の変動に大きく寄与することを示している。

(Reference: Hiyama, T., H. Park, K. Kobayashi, L. Lebedeva, and D. Gustafsson (2023): Contribution of summer net precipitation to winter river discharge in permafrost zone of the Lena River basin. *Journal of Hydrology*, 616, 128797, doi:10.1016/j.jhydrol.2022.128797)

南アジア多雨地帯に夜間降雨をもたらし大規模夜間湿潤気流

夏季南アジアの多雨地帯であるヒマラヤ山脈とメガラヤ高原周辺は夜間降水が卓越する。この降水はヒマラヤ山脈の水河を涵養し、ガンジス川・ブラマプトラ川といった大河の水源となる。本研究は、高時間空間解像度（1時間間隔・0.25度格子）のERA5を用いた解析から、夜間にベンガル湾西部の海岸域に沿って大規模に下層の南風が強化され、ガンジス平原に流入する現象（大規模夜間湿潤気流）を発見した（図）。この大規模夜間湿潤気流は、海上から陸上への水蒸気輸送量を増やし、ヒマラヤ山脈とメガラヤ高原周辺の夜間降水強化の要因となる。この大規模夜間湿潤気流はインド半島の熱的・力学的効果の日変化の影響を強く受けている。日中のインド半島上は、対流混合層が発達する。この層は下層の強い西風（モンスーン西風）に対して摩擦力として作用するため、風速が非常に弱くなる。一方、夜間にはインド半島上に安定層が形成され、摩擦力が弱くなる。そのため、モンスーン西風が加速する。同時に、インド半島南端のから続く下層ジェット構造を伴った強い南西風がベンガル湾西部の海岸域に発生する。インド半島からの強いモンスーン西風とこの南西風が合流し、ベンガル湾西部の海岸域からガンジス平原にわたる大規模夜間湿潤気流が形成される。

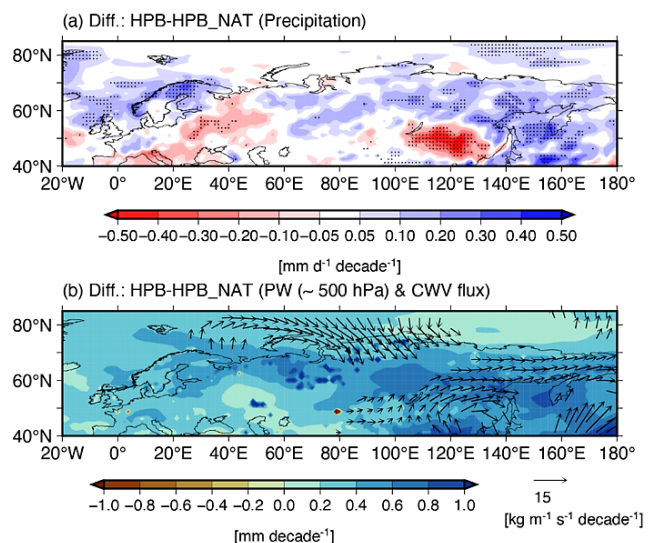
(Reference: Fujinami, H., T. Sato, H. Kanamori, and M. Kato (2022): Nocturnal southerly moist surge parallel to the coastline over the western Bay of Bengal. *Geophysical Research Letters*, 49, e2022GL100174, doi:10.1029/2022GL100174)



夜間の鉛直積分水蒸気フラックス偏差（ベクトル）とその収束偏差（色階調は収束域）。

シベリアの夏季降水量の増加傾向における地球温暖化の影響評価

1990–2000年代にシベリアでは夏季降水量の顕著な増加傾向が観測された。この増加傾向における地球温暖化の影響を明らかにするために、本研究では、大規模アンサンブル気候実験 d4PDF（Database for Policy Decision Making for Future Climate Change: 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース）で提供されている過去再現実験と非温暖化実験のデータを用いて、ユーラシア大陸北東部の夏季降水量の長期変化傾向を解析した。過去再現実験の100メンバーのアンサンブル平均ではシベリアの夏期降水量の増加傾向は観測データと整合的だった一方、中国北東部とモンゴルで観測された減少傾向は、再現されなかった。このことから、メンバー間の内部変動に伴う夏季東アジアモンスーンの長期変化傾向の不確実性がこの地域の降水量の長期変化傾向に大きな影響を与



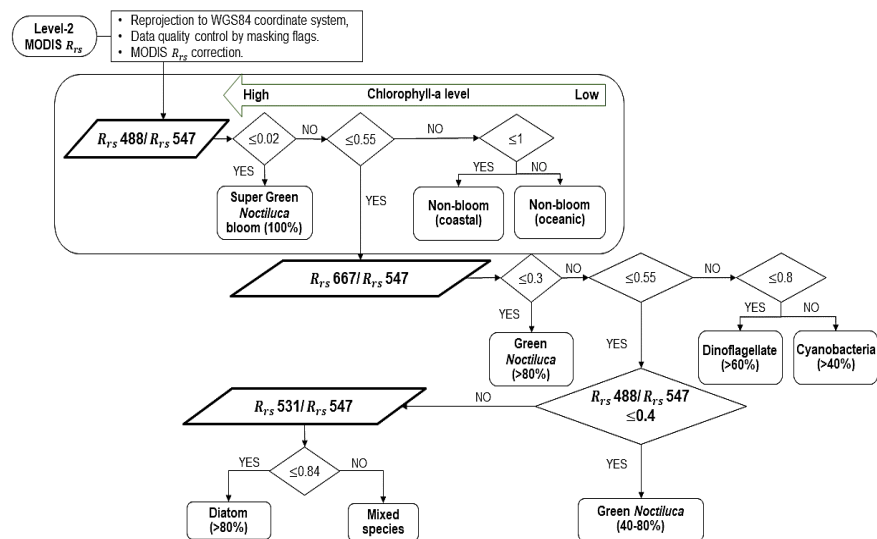
1990–2010年の夏季(6–8月)における降水量(上図)および、水蒸気フラックスと対流圏下層の水蒸気量(下図)の過去再現実験と非温暖化実験の差。

えることが示唆された。次に、観測値と類似した降水傾向のパターンを持つメンバーを抽出するために、両実験のそれぞれ 100 アンサンブルメンバーのシベリアにおける夏季降水量の長期変化傾向に対して EOF 解析を適応した。両実験の第 1 モードは東シベリア（中国東北部）の降水量の増加（減少）を示す観測と整合的な空間構造を抽出していた。EOF 解析から抽出されたメンバー平均の両実験の差から（図）、東シベリア（中国東北部）北部における 10 年周期・数十年周期の下層低気圧性（高気圧性）循環傾向の空間パターンが温暖化によって増幅され、西シベリアから東シベリアへの水蒸気輸送量が増加することが明らかになった。また、地球温暖化により顕著な中国東北部の地表面加熱が、同時に東シベリアの低気圧性循環を強化することが示唆された。さらに、近年顕著に観測されている北極海の水表面積の減少も東シベリアの低気圧性循環の強化に寄与し、北極海からの水蒸気輸送の増加も東シベリアの水蒸気輸送量の増加に寄与したことが示唆された。

（Reference: Kanamori, H., M. Abe, H. Fujinami, and T. Hiyama (2023): Impacts of global warming on summer precipitation trend over northeastern Eurasia during 1990-2010 using large-ensemble experiments. *International Journal of Climatology*, 43, 615-631, doi:10.1002/joc.7798）

人工衛星によるタイランド湾奥部での緑夜光虫赤潮の検出アルゴリズム開発と赤潮の季節変動

熱帯域の沿岸域では、様々な種類による赤潮が起こっており、ここ数十年は特に緑色の夜光虫 *Noctiluca scintillans*（以下、緑夜光虫）の赤潮が頻繁にみられる。この研究ではタイランド湾奥部（uGoT）において、衛星海色センサーを用いた赤潮分類アルゴリズムを開発し、赤潮の季節変動を研究した。高濃度の緑夜光虫は、現場でのリモートセンシング反射率観測で青から緑、および赤から近赤外の波長で、明確なスペクトル特性を示した。特徴的な赤潮のスペクトル特性に従って、565 nm で規格化した 488、531、667 nm のリモートセンシング反射率を使った分類アルゴリズムを開発し、三段階の濃度レベルの緑夜光虫赤潮と、他の藻類赤潮（渦鞭毛藻類、珪藻、藍藻、混合種）、ならびに非赤潮状態の沖合水と沿岸水を識別し（図）、現場の報告書で検証した。2003 年から 2021 年までの衛星 MODIS の月合成データによって、南西（5-9 月）と北東（10-1 月）モンスーン期の、緑夜光虫や他の赤潮の表面分布と発生頻度の季節変動を明らかになった。緑夜光虫は、他の赤潮（渦鞭毛藻や藍藻）よりも岸や河口から離れた場所で発生し、モンスーン以外の時期（2-4 月）に、タチン川とチャオプラヤ川の河口の間で他の赤潮よりも頻繁に発生した。緑夜光虫や他の赤潮の頻度と分布は、モンスーンの季節によって変化した。衛星によって判別した赤潮分布を、モンスーンによって起こされる要因（海上風、降水量、河川流量）と比較することで、アジアモンスーン条件下での、uGoT 全体の赤潮の時空間分布を初めて明らかにすることができた。この研究は、気候変動が植物プランクトン動態に与える影響を理解するのに役立つ。



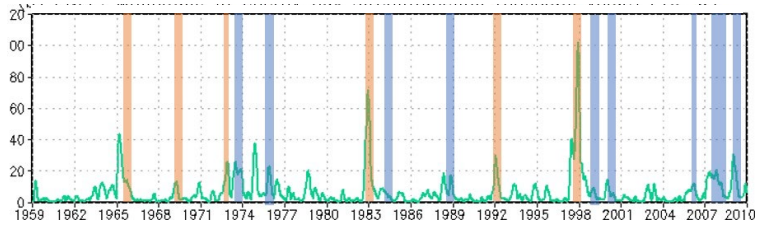
タイランド湾奥部における赤潮判別アルゴリズム。

性に従って、565 nm で規格化した 488、531、667 nm のリモートセンシング反射率を使った分類アルゴリズムを開発し、三段階の濃度レベルの緑夜光虫赤潮と、他の藻類赤潮（渦鞭毛藻類、珪藻、藍藻、混合種）、ならびに非赤潮状態の沖合水と沿岸水を識別し（図）、現場の報告書で検証した。2003 年から 2021 年までの衛星 MODIS の月合成データによって、南西（5-9 月）と北東（10-1 月）モンスーン期の、緑夜光虫や他の赤潮の表面分布と発生頻度の季節変動を明らかになった。緑夜光虫は、他の赤潮（渦鞭毛藻や藍藻）よりも岸や河口から離れた場所で発生し、モンスーン以外の時期（2-4 月）に、タチン川とチャオプラヤ川の河口の間で他の赤潮よりも頻繁に発生した。緑夜光虫や他の赤潮の頻度と分布は、モンスーンの季節によって変化した。衛星によって判別した赤潮分布を、モンスーンによって起こされる要因（海上風、降水量、河川流量）と比較することで、アジアモンスーン条件下での、uGoT 全体の赤潮の時空間分布を初めて明らかにすることができた。この研究は、気候変動が植物プランクトン動態に与える影響を理解するのに役立つ。

（References: Luang-on, J., J. Ishizaka, A. Buranapratheprat, J. Phaksopa, J. I. Goes, E. R. Maure, E. Siswanto, Y. Zhu, Q. Xu, P. Nakornsantiphap, H. Kobayashi, and S. Matsumura (2023): MODIS-derived green *Noctiluca* blooms in the upper Gulf of Thailand: Algorithm development and seasonal variation mapping. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1031901, doi: 10.3389/fmars.2023.1031901）

熱帯太平洋の経年スケール海洋波動が担う東西相互作用の解明

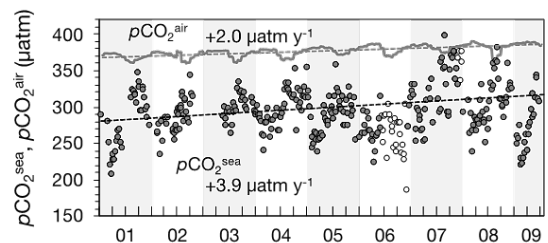
本研究ではエルニーニョ現象およびラニーニャ現象に伴う海洋表層波動が、海盆の西部、中央部、東部の相互作用をどのように担うのかについて、エネルギー循環の立場から考察を行った。近年の研究において波動エネルギーの循環経路を、群速度ベクトルをトレースしたように、且つ、赤道域と中緯度の力学の垣根なく描くことが可能になった。ところが、このエネルギーフラックスベクトルの分布を地図上に表示するだけでは、擾乱の発生・伝達・消散を連鎖的に追跡したり定量化したりすることが自明ではなかった。この問題を解決するために本研究では、エネルギーフラックスの分布に対してヘルムホルツ分解を適用し、その流線関数成分とポテンシャル成分それぞれの極値の時系列を解析する手法を提案した。この時系列は、エネルギーフラックスをその経路を横断するように積算した意味を持ち、かつその時間変動を Nino 3 と呼ばれる気候学における一般的な指数時系列と比較することができる。この比較をする中で、本研究ではエネルギーフラックスがエルニーニョ現象の時でもラニーニャ現象のときでも、ともに東向きの伝達イベントを示し、深いケルビン波と浅いケルビン波の区別ができないことに着目した。一方で、Nino 3 指数は東太平洋赤道上の水温の気候偏差を表すものであり、深いケルビン波と浅いケルビン波を区別することができるが、その定量的な意味が位置エネルギーに関する物理要素のみを反映するものとなっており、運動エネルギーに関する物理要素が加味されていない。本研究では、これらの問題を解決するための一案を示し、51 年分の数値シミュレーション結果を用いて有益な検証を行った。



太平洋熱帯東部におけるエネルギーフラックス流線関数の極値の時系列。

2001-2009 年の相模湾表層水 CO₂ 分圧の急速な上昇

多様な環境によって地域差が大きいものの、総じて沿岸域は外洋よりも効率的な CO₂ 吸収源として機能している。各沿岸域の表層水 CO₂ 分圧 ($p\text{CO}_2$) の長期トレンドを決定することは、気候変動の下で海洋による CO₂ 吸収量がどのように推移するかを理解する上で重要である。本研究では、2001 年から 2009 年にかけての相模湾中央部における週平均海水 $p\text{CO}_2$ の時系列変化を検討した。海水 $p\text{CO}_2$ データは、海中係留式セジメントトラップによって採取された水深 150 m における沈降粒子中の有機物の炭素安定同位体比 (POC- $\delta^{13}\text{C}$) の時系列データを用いて復元した。この海水 $p\text{CO}_2$ 推定には 2007-2008 年の船舶観測から導かれた相模湾表層の懸濁粒子 POC- $\delta^{13}\text{C}$ と海水 $p\text{CO}_2$ の間の経験的関係を用いた。推定された湾内 $p\text{CO}_2$ は約 190 μatm (平均 294 μatm) の季節変動を示したが、そのほとんどが大気 $p\text{CO}_2$ を下回っていた (図)。大気-海洋間の平均 CO₂ フラックスは $-30.0 \text{ g m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ (全球平均の 6.1 倍) と算出され、相模湾は大気 CO₂ を効率的に吸収していることが明らかになった。一方、粒子状炭素の沈降による 150 m 以深への炭素隔離は、表層での CO₂ 吸収量の 60-75%しか説明できず、残りは表層水の水平的交換により湾外に排出されたと考えられる。8.5 年の観測期間で湾内 $p\text{CO}_2$ は大気 $p\text{CO}_2$ の約 2 倍の速度 ($+3.9 \mu\text{atm y}^{-1}$) で上昇し、両者の差は小さくなっていた。同時に POC 沈降フラックスには減少トレンド、沈降粒子の窒素安定同位体比には上昇トレンドが存在した。特に夏季の湾内 $p\text{CO}_2$ の上昇速度 ($+4.9 \mu\text{atm y}^{-1}$) が大きく、CO₂ 吸収量も経時的に減少することが明らかになった。この結果は、長期的な夏季の表層栄養塩の枯渇とそれによる有機物生産の減少が、湾内海水 $p\text{CO}_2$ を急速に上昇させたことを示唆している。



2001-2009 年の相模湾中央部の表層水 CO₂ 分圧 ($p\text{CO}_2^{\text{sea}}$) と大気 CO₂ 分圧 ($p\text{CO}_2^{\text{air}}$) の時系列変化。

(References: Mino, Y., C. Sukigara, A. Watanabe, A. Morimoto, K. Uchiyama-Matsumoto, M. Wakita, and T. Ishimaru (2023): Rapid increase of surface water $p\text{CO}_2$ revealed by settling particulate organic matter carbon isotope time series during 2001-2009 in Sagami Bay, Japan. *Journal of Oceanography*, doi:10.1007/s10872-023-00688-3)