

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。

2021 年度の主な活動

北極域の温暖化に伴う降水量増加がシベリア北方林の生育に及ぼす影響

北極域の温暖化は水循環を変調し、極端な降水量変動を引き起こす。1980年代から2010年代にかけて、東シベリアでは夏の降水量が年々変動を伴いながら徐々に増加し、2005年から2008年にかけては過去に例の無いほど多量の降水を観測した。降水量は気温とともに北方林の生育に大きく関わるため、我々は東シベリアのカラマツ林（2ヶ所）の正規化植生指数（normalized difference vegetation index: NDVI）の長期変化傾向と、生育期（5月から8月にかけての温暖な季節）における気温と降水量の長期変化傾向との関わりを調べた。使用したデータは Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) で観測された東シベリアのカラマツ林（2ヶ所）における2000年から2019年までのNDVIと、カラマツ林近傍の気象観測所で得られた同期間の降水量と気温データである。対象とした2ヶ所のカラマツ林のうち、Spasskaya Pad（スパスカヤパッド）では2005年から2008年にかけての異常な夏の降水量によってダメージを受け、上層木であるカラマツは部分的に枯死し、下層植生も大きく変化した。一方のElgeei（エルゲイ）では、上層木はダメージを受けず、下層植生も大きく変化しなかった。これらの現象を踏まえ、パス解析を行った結果、エルゲイでは生育期のNDVIが増加傾向を示し、気温と降水量

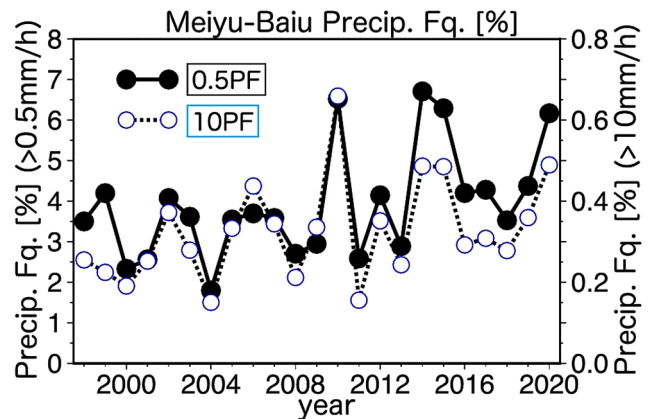
の増加傾向と一致した。しかし、スパスカヤパッドでは生育期の NDVI が統計的に有意な増減傾向を示さず、気温や降水量との有意な相関を見いだせなかった。NDVI の長期変化傾向や気温・降水量の長期変化傾向との関係が同じ領域（東シベリア）に生育する 2 ヶ所のカラマツ林で異なったという事実は、将来の北極域における温暖化が、単にシベリア北方林の生育にプラスに寄与すること（greening）のみならず、降水量増加によって部分的な枯死を引き起こし、北方林にダメージを与えること（browning）を示唆する。

（Reference: Nagano, H., A. Kotani, H. Mizuochi, K. Ichii, H. Kanamori, and T. Hiyama (2022): Contrasting 20-year trends in NDVI at two Siberian larch forests with and without multiyear waterlogging-induced disturbances. *Environmental Research Letters*, 17, 025003, doi:10.1088/1748-9326/ac4884）

最近 10 年間の梅雨前線帯の降水活発化

本研究は、23 年間（1998 年–2020 年）の人工衛星搭載降雨レーダ TRMM-PR と GPM-DPR および大気再解析データ JRA55 を用いて、東アジアモンスーン域における梅雨期の降水特性の期変化とそれに伴う大気循環場の変化について解析を行った。最近 11 年間（2010 年代: 2009–2019 年）の梅雨前線帯における降水強度の強い雨の降雨頻度は、その前の 11 年間（2000 年代: 1998–2008 年）よりも増加していることが分かった（図）。これは、近年の梅雨期の豪雨の増加傾向と一致している。2010 年代は 2000 年代と比較して、対流圏下層（850 hPa）の太平洋高気圧が強化されていた。それに伴い、日本の南西側の領域で、高気圧西縁に沿って梅雨前線に流入する水蒸気輸送量が増加した。また、対流圏上層（200 hPa）においては、梅雨前線の西側で気圧の谷が強化されていた。この上層の気圧の谷は、亜熱帯ジェット気流に沿った波列状の循環偏差の一部である。これらの対流圏の大気循環場の変化は、梅雨前線帯の降水量の増加と整合的である。このように、近年の梅雨前線の降水量の増加は、中緯度から亜熱帯に及ぶ大気循環場の変動が大きな要因であると考えられる。

（Reference: Takahashi, H. G., and H. Fujinami, (2021): Recent decadal enhancement of Meiyu-Baiu heavy rainfall over East Asia. *Scientific Reports*, 11, 13665, doi:10.1038/s41598-021-93006-0）



1998 年から 2020 年の梅雨期における降水頻度の変動。

東南極域の地上気温データに含まれる放射影響誤差の除去

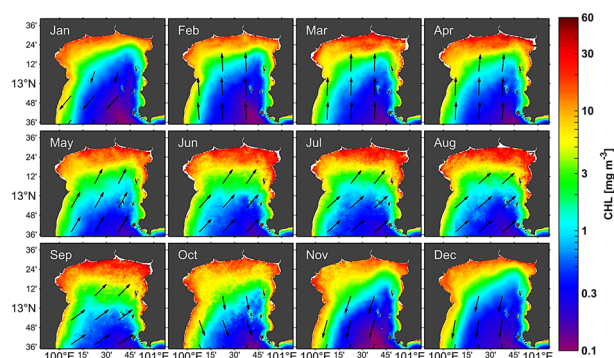
極氷床域における地上気温観測は、気候変動の監視や数値モデルの検証など多くの研究に活用されている。しかしながら、その観測は自動気象観測測器（AWS）に依存しており、高精度なデータを取得することが困難である。例えば、使用できる電力量が限られているために気温計が自然通風筒に格納されており、気象庁などで使われている機械式ファンを使った強制通風筒よりも大きな誤差が生じている。具体的には、太陽からの直射光に加えて雪面からの反射光によって通風筒が加熱されるため、自然風による換気が不十分である場合、実際の気温よりも高い気温が記録される。そこで本研究では、この放射影響誤差を軽減する補正手法の確立に取り組んだ。近年では省電力で駆動する強制通風筒が使用可能となり、南極内陸域の 2 地点（ドームふじ基地近傍にある NDF 地点および中継拠点）で強制通風筒を使った気温観測が行われている。そこで、同地点で行われている既存の自然通風筒を使った観測結果との比較検証を行い、放射影響による誤差を定量評価するとともに、その補正法を探索した。解析結果より、放射影響誤差は、反射光の強度の増加とともに線形に増加し、風速の増加とともに指数的に減少するという顕著な関係を示すことを見出し、過去に中緯度の積雪地域で行われた観測結果と一致していることを明らかにした。そこで、当該地域の観測から提唱された補正式を南極氷床域にも応用し、放射影響誤差を約 70%軽減することに成功した。南極氷床域では、風が弱い静穏日が卓越しているが、これまで弱風時の気温

データは欠測扱いとされてきた。本研究の成果は、使用可能なデータ数を飛躍的に増加させることにつながり、近年の温暖化に対する気候応答を解明に大きく貢献する。

(Reference: Morino, S., N. Kurita, N. Hirasawa, H. Motoyama, K. Sugiura, M. A. Lazzara, D. Mikolajczyk, L. Welhouse, L. Keller, and G. Weidner (2021): Comparison of ventilated and unventilated air temperature measurements in inland Dronning Maud Land on the East Antarctic Plateau. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 38, 2061–2070, doi:10.1175/JTECH-D-21-0107.1)

タイ湾奥部におけるクロロフィル a の季節・経年変動

2003 年から 2017 年のタイ湾奥部の植物プランクトン総量の季節的・経年的変動を、Aqua 搭載の中解像度画像分光放射計 (MODIS) のクロロフィル a (Chl-a) で調査した。まず Chl-a の精度を確認し、経験的アルゴリズムのローカルチューニングにより向上した。季節変動は、非モンスーン (NOM)、南西モンスーン (SWM)、北東モンスーン (NEM) の環境パラメータのモンスーン変動と関連していた。季節的な Chl-a の高低は、それぞれ SWM と NEM の時期の降水量と河川流量の高低に対応した。NOM 期間中の Chl-a は全般的に低く、これは降水量の少なさによってい



タイ湾奥部における月平均 MODIS Chl-a (2003–2017) と風の分布。

る。特に、Chao Phraya 川と Tha Chin 川からの流量が多い北部で、Chl-a が高かった。高 Chl-a 領域は風向と関連して東西に移動し、それぞれ SWM および NEM 時の淡水の分布に対応すると推測された。Chl-a の経年変動は、インド洋ダイポールモードよりもエルニーニョ-南方振動による降水量、河川流量、風のパターンの変動と関連していた。SWM の Chl-a の正と負の偏差はラニーニャ期とエルニーニョ期の降水量や河川流量の多寡に対応した。NEM の Chl-a 正負は、ラニーニャ期とエルニーニョ期の河川流量の多寡、風の強弱に対応した。NOM の Chl-a の正の偏差は、エルニーニョ時の風速と降水量の増加と関連しているようであった。

(References: Luang-on, J., J. Ishizaka, A. Buranapratheprat, J. Phaksopa, J. I. Goes, H. Kobayashi, M. Hayashi, E. R. Maúre, and S. Matsumura (2021): Seasonal and interannual variations of MODIS Aqua chlorophyll-a (2003–2017) in the Upper Gulf of Thailand influenced by Asian monsoons. *J. Oceanogr.*, 78, 209–228, doi:10.1007/s10872-021-00625-2)

東シナ海・対馬海峡における現場型多波長励起蛍光光度計による植物プランクトン群集の高分解能鉛直分布観測

沿岸の植物プランクトン群集の変動把握のために、多波長励起蛍光光度計を利用した研究は少ない。2011、2012、2014 年夏季に多波長励起蛍光光度計の現場校正を用いて、長江希釈水 (CDW)、黒潮水 (KW)、対馬水 (TW) が存在する東シナ海 (ECS) と対馬海峡 (TS) における植物プランクトン組成の高解像度鉛直分布の把握を行った。その結果、CDW、KW、TW において、植物プランクトン群の分布に明確な違いがあることが分かった。CDW では褐色藻類が全般的に優占した (約 60%) が、藍藻類 (40%以上) と緑色藻類とクリプト藻類 (40%以上) はそれぞれ垂表層クロロフィル極大の上方と下方に多く生息していた。また、TW の垂表層クロロフィル極大を含む水柱では褐藻類が 60%以上、表層水では藍藻類が優占していた。KW の表層では藍藻類が多く (40%以上)、40 m 以深では褐色藻類と緑色藻類が優占した (60%以上)。これらの結果は、これらの地域における栄養塩の分布と関連していると推測された。多波長励起蛍光光度計を現場 HPLC データで校正することにより、植物プランクトン群の高解像度鉛直分布が効率的に得られる。

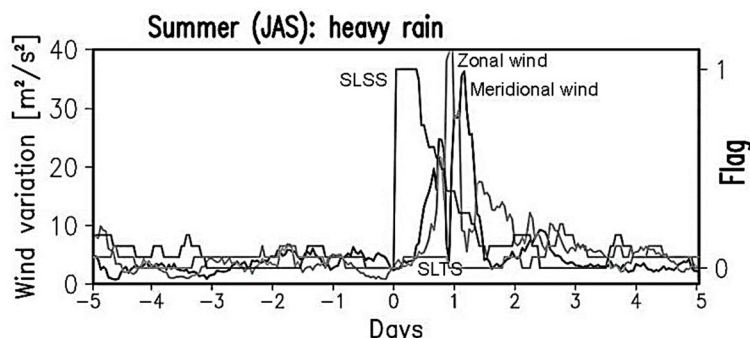
(References: Xu, Q., S. Wang, C. Sukigara, J. I. Goes, H. d. R. Gomes, T. Matsuno, Y. Zhu, Y. Xu, J. Luang-on, Y. Watanabe, S. Yoo, and J. Ishizaka (2022): High-Resolution Vertical Observations of Phytoplankton Groups Derived From an in-situ Fluorometer in the East China Sea and Tsushima Strait. *Front. Mar. Sci.*, 8, 756180, doi:10.3389/fmars.2021.756180)

台風のような強風降水イベントが海洋混合層に与える影響の統計解析

本研究では海洋混合層の動態を、実観測に基づく最新のデータの統計解析から明らかにした。本研究で着目したのは、米国海洋大気庁によって2004年から黒潮続流域に係留されている Kuroshio Extension Observatory (KEO) ブイのデータである。これは荒天時には測定や各種測器の管理が困難な洋上において1時間毎という高頻度で正味11年分蓄積された貴重な試料であり、特に短周期変動において従来の研究では未発見の現象が捉えられている可能性があった。本論文の前

半部分では、台風条件下における海洋混合層の発達過程を解析するなかで、数値モデルでは再現することができない海洋表層の散発的な低塩分シグナルをブイデータが有していることを見出した。これを Sporadic Low Salinity Signal (SLSS) と名付け、KEO ブイの正味11年分のデータを解析したところ、SLSS イベントは244回（月平均にすると2回程度）発生しており、それぞれのイベントについて発現直前3日間の積算降水量や日周期より短い時間スケールの海上風変動に対応関係があることが分かった(図)。1年を通じて各SLSS イベントの持続時間は1-2日程度であり、これは海洋の慣性振動の時間スケールと近く、海洋表層渦や表層流蛇行の不安定の時間スケールよりは短い。また、SLSS の降水および海上風変動への依存性は、1年を通して同じでないことが確認され、その季節特性を本論文で詳しくまとめた。このように本研究では、SLSS という新しい現象の発見、その定義方法の提案、および気候学特性の統計解析を行うことで、将来的には大気海洋相互作用における海面微細・短周期素過程の理解が進み、数値モデルで使われている乱流クロージャモデルおよびそれを実装した気候変動予測モデルの改善が進むことが期待される。

(References: Kameyama et al. (2022): Sporadic low salinity signals in the oceanic mixed layer observed by the Kuroshio Extension Observatory buoy. *Front. Clim.*, 4, 820490. doi:10.3389/fclim.2022.820490)



夏期に多雨を伴って発生した18個のSLSSイベントの合成時系列。SLSSフラッグおよび散発的な低温シグナルフラッグ、風速の変動強度。

夏季の三河湾における酸素消費の活性化に伴う底層貧酸素水塊の発生

20世紀後半から急増した沿岸の貧酸素水塊水域（デッドゾーン）は今もなお拡大し、生態系機能に深刻な影響を与えている。本研究では、2014年5-8月に三河湾で実施した集中的な備船観測と湾内2ヶ所に設置された自動観測ブイから得られたデータを解析し、湾内底層の貧酸素水塊の発生メカニズムを検討した。湾口から湾奥をカバーする6回の測線観測では、光酸素センサーを利用した新しい培養実験法で底層水中の酸素消費速度（OCR）を測定した。底層OCRは5.7-38.3 $\mu\text{M d}^{-1}$ の範囲を示し、栄養塩やChl-a濃度が高い湾奥測点で大きな速度が観測された。6月下旬以降の湾奥測点の底層には貧酸素水塊が出現し、この時期のOCRは潜在的に数日以内に溶存酸素を消費してしまう。このOCRの時空間変化は底層水中の粒子状有機炭素濃度と高い正の相関があった。粒子状有機物の比較的低い炭素：窒素比と高い炭素安定同位体比を考慮すると、微生物呼吸の主要基質は陸起源ではなく湾内で生成された有機物であり、その供給がOCRを左右していたと考えられる。一方、湾口および湾奥の自動観測ブイから得られた高時間分解能データは、台風イベントにตอบสนองしたChl-aの増加、その後の湾奥底層における貧酸素水塊の出現および湾口への拡大を捉えた。これは、鉛直混合に伴った表層への栄養塩供給によって有機物生産が促進されると、底層OCRが増加し、その結果、貧酸素水塊が発生するという我々の仮説を支持する。ブイデータを用いて算出した底層水中の見かけの酸素減少速度は、培養実験に基づくOCRと非常に整合的であった。したがって、貧酸素水塊の発生・挙動を数値シミュレーションで再現および予測するためには、OCRを適切にモデル化することが不可欠であり、本研究で明らかになったOCR変動特性は重要な意味を持つ。

(References: Sukigara, S., Y. Mino, A. Yasuda, A. Morimoto, A. Buranapratheprat, and J. Ishizaka (2021): Measurement of oxygen concentrations and oxygen consumption rates using an optical oxygen sensor, and its application in hypoxia-related research in highly eutrophic coastal regions. *Cont. Shelf Res.*, 229, 104551, doi:10.1016/j.csr.2021.104551)