

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」 研究概要
〔令和6年度事後評価用〕

令和6年6月30日現在

機関番号：82706
領域設定期間：令和元年度～令和5年度
領域番号：6102
研究領域名（和文） 変わりゆく気候系における中緯度大気海洋相互作用 hotspot
研究領域名（英文） Mid-latitude ocean-atmosphere interaction hotspots under the changing climate
領域代表者
野中 正見（NONAKA Masami）
国立研究開発法人海洋研究開発機構・付加価値情報創生部門（アプリケーションラボ）
・グループリーダー
研究者番号：90358771
交付決定額（領域設定期間全体）：（直接経費）1,138,000,000 円

研究成果の概要

本領域では、我々が確立した「中緯度海洋の気候学的能動性」という新パラダイムについて、中緯度大気海洋相互作用の理解を飛躍的に深化させ、それを基盤に、台風や豪雨・豪雪等の極端気象現象や持続的な大気循環異常などの大気・海洋現象の予測の可能性や、地球温暖化に伴う気候系の将来予測という格段に広範な分野での中緯度海洋の能動的役割を解明することを目指した。このような学術的波及効果とともに、防災・減災や気候の将来予測など高い社会的波及効果を持つ研究を展開し、これにより、先に確立した新パラダイムの、科学的・社会的な重要性・有用性を提示することが本領域の目指した「格段の発展・飛躍的な展開」である。

上の目標を達成するため、本領域では災害に直結する台風や豪雨・豪雪、熱波といった極端な大気・海洋現象に特に注目し、それらに対する日本周辺の強い海流や海水温分布の影響という本領域独自の視点から、それらのメカニズム理解を飛躍的に深化させることに成功した。

研究分野：海洋科学・大気科学・気候力学

キーワード：中緯度大気海洋相互作用、異常気象（数日規模の豪雨や豪雪等）、異常天候（冷夏や暖冬等の季節規模の大気の影響）

1. 研究開始当初の背景

近年、豪雨や豪雪が毎年のように日本列島を襲い、人々の生命・財産を脅かしている。従来、このような異常気象・異常天候は長期的な温暖化に加え、エルニーニョ現象等の熱帯域の海洋・大気変動が遠隔的に影響したものであり、中緯度域の海洋は大気変動にただ受動的に反応するだけと考えられてきた。今日でも気候の季節予測はこうした気候学的な「常識」の下で行われている。

ところが、近年の高分解能な海洋・大気データの解析により、中緯度域の海洋も大気の影響・変動に大きく影響することが明らかとなってきた。我々は中緯度域の海洋から大気への影響の鍵となる黒潮やメキシコ湾流等の強い暖流域とそれに伴い水温が水平方向に急に変わる海域（図1）を“気候系の hotspot”と捉え、そこで海洋と大気が相互に作用するメカニズムの多角的な研究から従来の「常識」を覆し、「中緯度海洋の気候学的能動性」という新パラダイムを確立した。

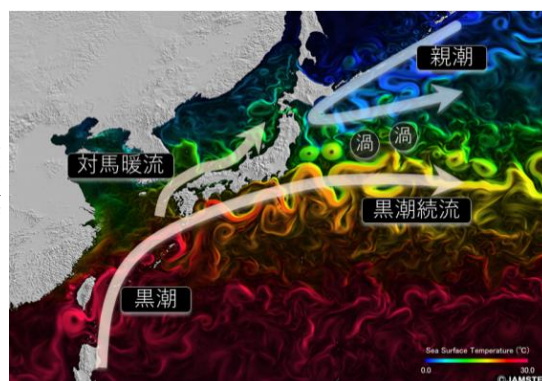


図1. 日本付近の海流と水温分布

2. 研究の目的

このような研究の進展から、その知見を豪雨・豪雪や気候変動の数値的「予測」にどう反映させるかという更に新しい重要課題が浮上した。そこで、(1) 先端的な観測技術と数値モデリングとの融合研究により、中緯度大気海洋相互作用に特有の多階層的な過程とその間の相互作用

一方、[A02]・[A03]と連携し、進行しつつある温暖化に対する中緯度海洋の影響にも注目した。東シナ海の黒潮近傍での長期的な海面水温の上昇が、積雲対流の活動と北向きの水蒸気輸送量を増加させることで、西日本における近年の梅雨末期の豪雨の増加に寄与していることを明らかにした。日本海においても近年の海面水温上昇が日本海側の豪雪の増加に影響していることが示された^{#9}。これらは、**将来の日本周辺の極端気象予測における中緯度海洋の重要性を示す**成果である。また、北海道周辺における冬季の長期的な気温上昇は、いわゆる西高東低の冬型の気圧配置の場合、地球温暖化によるオホーツク海の海水後退により、海からの冷却効果が弱화가より顕在化し、冬季平均の3倍以上のペースで進行していることが示された。この成果は、**地域スケールの気候に対する地球温暖化の影響の現れ方は、大気の総観場と同時に中緯度海洋の状況により大きく変わるという従来看過されてきた重要な知見であり、長期気候変化の影響評価手法への今後の活用が期待される。**さらに北海道・東北沖では親潮の弱化等の影響で海洋熱波と呼ばれる海面水温の局所的な異常高温が2010年以降多発し^{#15}、令和元年東日本台風の大雨^{#12}や近年のブリの漁獲量増加に影響を与えている^{#15}こと等、当初計画にはない成果も得られた。

[A02]では、観測データが限られ未解明であった強い暖流と豪雨や豪雪との関係や西部北太平洋の下層の雲と大気中の微粒子（エアロゾル）の関係、また、日本南東沖の海洋表層下に広がる「亜熱帯モード水」等の水塊の挙動と気候や生物地球化学的過程との関係等について、直接観測（図2）からその実態の理解を進めた。更に、数値モデリング実験や多様なデータ解析から、海流の予測の可能性や、中緯度の海洋が成層圏よりも上層も含む大気の大規模な循環に及ぼす影響を広く探求した。

冬季の日本海では対馬暖流による暖かい海水の上に大陸からの冷たい乾燥した空気が吹き出すことで雪雲が発達する。この相互作用の実態を大気と海洋の両面から捉えるため、冬季に日本海側に豪雪をもたらす JPCZ（日本海寒帯気団収束帯）と対馬暖流の同時観測を実施した。現場観測に基づく見積りから、JPCZに伴う水蒸気の収束量が梅雨期の豪雨時の値に相当することが示された。この強い水蒸気の収束は JPCZ 内に強い対流を生み、それが更にこの収束を強化するというフィードバック機構が提示された^{#11}（図4）。

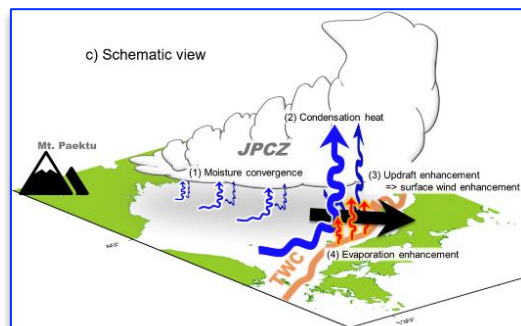


図4. JPCZ と日本海、対馬暖流の間のフィードバックの模式図

一方、東シナ海では、黒潮に伴う海面水温の強い前線と梅雨期の豪雨との関係に注目した観測を実施した。三隻の船舶が連動して高頻度観測を行うことで、水温前線を挟む水平的な分布を捉えることに成功し、水温前線が人工衛星で推定された構造よりも遙かに鋭い水平勾配を持つことが明らかとなった。そして、その鋭い水温前線構造が大気に影響を及ぼし、梅雨期の豪雨を強化することが観測データとそれに連動させた数値モデル研究により示された（論文投稿準備中）。また、最近約40年間で東シナ海の黒潮域では海面水温が大きく上昇し、これがその上の海面気圧の低下とそれに伴う大気下層での収束、対流圏上層に及ぶ対流を強化し、6月の梅雨前線の強化に寄与していることが示された^{#3}。

また、大気中の微粒子（エアロゾル）を通じた新たなタイプの大気海洋相互作用の実態把握も本領域の大きな目的であり、これまでほとんど直接観測がない西部北太平洋の下層雲とエアロゾルについて、航空機と船舶を同期させた統合的な観測を実施した。この観測から、海水中の微粒子および大気境界層中のエアロゾルの化学種とその粒径分布、また、海洋からの熱フラックスに対応した下層雲の鉛直構造の変化などが明らかとなった。一方、人工衛星データからの雲の水・氷相判別解析アルゴリズムの開発などにより、複数の人工衛星データの解析から、グローバルな雲の水・氷相の分布、それらの雲の鉛直構造の不均質性、降水と上層雲の日変化の様子などが明らかとなった。加えて、西部北太平洋を含むグローバルな下層雲について、本領域分担者が提案した下層の湿度の効果を考慮した下層雲量の新しい指標「ECTEI」を用いることにより、気候モデルの開発・改良を通じて、気候モデルでの下層雲量の再現性の向上、海面水温と短波放射との間のフィードバックの再現性向上、温暖化時の下層雲減少の説明などを実現した^{#10}。

更に、亜熱帯モード水を始めとする西部北太平洋の表・中層水塊と大気変動や生物地球化学過程との関係を明らかにするため、自動昇降型フロート観測の他、様々な手法で観測を進めた。フロート観測では品質管理も大きな研究のステップである。酸素データについては投入時の船舶観測データとフロートが海面浮上時に測定する大気中酸素濃度データを利用した手法により、また pH データについては水温・塩分・酸素から経験的に推定した値を用いた手法により品質管理を進め、品質管理済み水温・塩分・酸素データを2024年5月に公開開始した。得られたデータの解析から、「北海道南東沖における2022年の海洋熱波発生時の溶存酸素変化とその物理メカニズム」等のテーマについて論文投稿中である。

一方、気象庁による東経137度線の夏の長期船舶観測データから、分厚い水塊である亜熱帯モード水（STMW）の厚さが十年規模で変動し、厚い時期には STMW がそれよりも浅い等密度面を押し上げ、深さ約50mを中心とする亜表層に低温偏差が現れるという、STMWの「持ち上げ効果」を発見した（図5）。また、[A01]・[A03]と連携し、長期観測データから、STMWが厚い（薄い）時期には、海面水温が低下し熱帯低気圧の発達率が有意に低下（上昇）することを示した^{#8}。これまで、中緯度海洋の大気に対する能動的影響についてはもっぱら黒潮などの海流からの影響が注目されてきたが、数千 km 規模の広がりを持つ水塊も大気に能動的に影響する、全く新たな中緯度大気海洋相互作用のメカニズムを提示した。

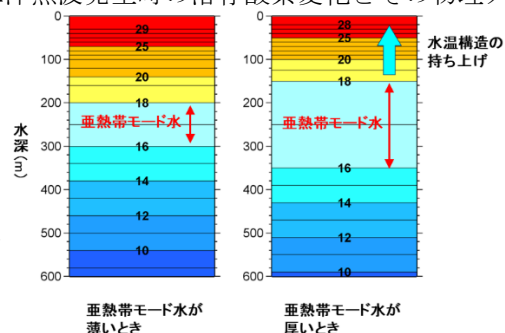


図5. 亜熱帯モード水の厚さが水温（色で表示）に及ぼす影響の模式図

台風に対する海洋の影響は、台風の強度予測の精度にも影響する。気象庁で台風の強度予測に用いられている「統計ガイダンス」では、海洋に関する説明変数として使用する海面水温と海洋貯熱量は予測開始時の値に固定されており、台風に対する海洋の応答が考慮されていない。そこで海洋モデルで予測した海面水温と海洋貯熱量を用いることで台風との結合過程を擬似的に考慮し、2020年の全台風を対象に予測実験を行った結果、3-5日予報が10%程度改善した^{#4}。気象庁で実際に用いるシステムを基盤にした実験で定量的な予測改善を示した意義は大変大きい。

一方、強い海流に伴う海洋前線帯や海洋中規模渦（100km 規模の渦）の変動について、大気変動が励起した海洋ロスビー波の伝播による数年先までの潜在的な予測の可能性を解明した上で、実際の予測の可能性を定量的に調べた。1994-2020 年の各年 1 月から 3 年先までの予測実験の結果、「気候系 hotspot 域」である黒潮続流とメキシコ湾流の流速とそれぞれの下流域の海洋渦の活動度の経年変動が 1-2 年先まで高い精度で予測可能であることが明らかとなった^{#7}。更に、より長期の変化として、黒潮続流が過去 29 年間で約 200km 北上していることを人工衛星観測データから解明し、黒潮続流の緯度帯以北の風系に見られる長期変化に励起されたことを示した。

このような強い海流に伴う海洋構造やその変動に対する大気の大規模な応答の理解にも格段の発展が得られている。黒潮やメキシコ湾流など強い暖流沿いには平均場として海上風の収束が生じるが、その理解には平均場や強い低気圧に注目した従来の解析では不十分であり、水温前線に沿って頻繁に発達する低気圧の背後の寒気吹出時に暖流からの水蒸気・熱放出が増大し、それによる中程度に強い海上風収束に伴って浅い対流性降水系が組織化されることが本質的に重要なことを見出した^{#20}。一方、想定以上の成果として、流れの曲率に着目することで大気の高・低気圧性の渦を分離し、各々の熱・水蒸気・運動量輸送への寄与を分離できる画期的手法を開発した^{#16}。これを適用し、メキシコ湾流域や黒潮続流域の水温前線への大気応答として生じる低気圧に伴う降水の増大を、主に高気圧に伴う暖流からの蒸発の増大と高気圧から低気圧への正味の水蒸気輸送の増大が補うことを初めて定量化した。

更に、上端の高い全球大気モデル実験から、**中緯度海洋前線への応答として移動性擾乱活動が増大すると大気重力波等の生成が活発化し、その上方伝播に伴う下向き運動量輸送により冬季南半球で中間圏下部の極夜ジェット気流（PNJ）を効果的に減速させることを初めて実証し（図 6）、海洋前線の現実的表現が気候モデルに共通する中層大気のバイアス軽減に貢献し得るという画期的な成果を得た^{#1}。**

加えて、中緯度海洋前線帯の季節内予測への影響を評価するため、気象庁/気象研究所季節予測システムを用いて、海洋モデル解像度の異なる予測実験の比較を行った。北大西洋域における冬季の季節内予測（3-4 週目予測）で広域平均した海面水温及び、海洋前線近傍の下層気温の予測精度は海洋高解像度化し**海洋前線帯を現実的に表現することで改善することが示された^{#5}**。気象庁で実際に用いている季節予測システムを用いて中緯度海洋前線帯の予測への影響を評価出来た意義は大変大きい。

[A03]では、大気海洋結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP)に対応する気候シミュレーションを活用することで、中緯度気候や大気海洋相互作用の理解をその長期的変動や変調にまで拡張した。温暖化が進行しつつある近年の変動に注目し、**東アジア域の顕著な降水の年々変動について、高解像度モデル大規模アンサンブルデータを用いて、その潜在的な予測の可能性を実証し^{#2}、局所的な顕著降水が大規模気候変動(エルニーニョ現象やインド洋海盆全体での海面水温変動)と深く関わることを示した^{#13}**。冬季の東アジア域に対しては、とりわけ中緯度大気海洋相互作用を通じて東アジアに影響する熱帯太平洋の気候変動について、亜熱帯域やインド洋、大西洋との関わりを多角的に指摘した。このように、極端気象や異常天候に対する気候変化の影響に関する理解の格段の深化に加え、気候システムに内在する気候変動が**亜熱帯高気圧の強弱に対応する下層雲量変化を通じて地球温暖化傾向に中長期変調を与えることも示した**。

また、A03-9 が主導し、ヨーロッパの高解像度気候モデル相互比較プロジェクトである PRIMAVERA と本領域の協力関係を構築し、PRIMAVERA データを用いた研究から、爆弾低気圧の分布がモデル解像度によって大きく異なること^{#18}、爆弾低気圧が地球温暖化でその分布を変え日本付近では減少すること（改訂中）、台風の最大勢力時の位置の長期変動は温暖化ではなく熱帯太平洋を中心とする自然な十年スケール変動によること（改訂中）、異常気象をもたらすブロッキングに密接に関係する大気の波活動の分布と変化が示された。一方で、温暖化によって「大気の川」が強大化するために豪雨が強まることを、[A01]と連携して明らかにした^{#14}。更に、想定外の成果として、**黒潮大蛇行にともなう関東上空への水蒸気供給が、温室効果を引き起こし、関東の熱波に影響することを見出した^{#17}（図 7）。**

5. 主な発表論文等（受賞等を含む）

【主な論文】全て査読有。*は corresponding author を示す。

1. *Kawatani, Y., H. Nakamura, S. Watanabe, and K. Sato

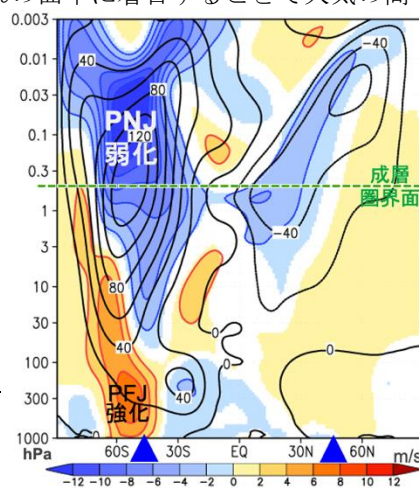


図 6. 海洋前線（青▲）の有無が大気モデルの東向き風に与える影響、青が西風弱体化

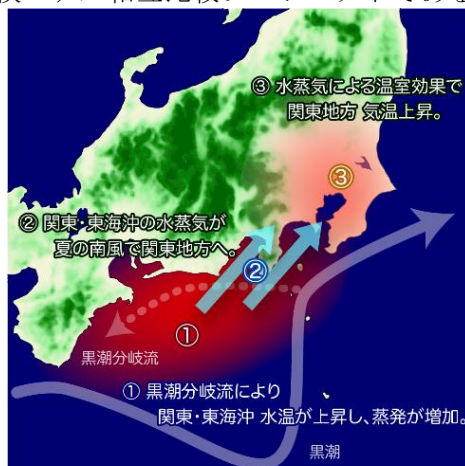


図 7. 黒潮大蛇行が関東地方の気温に及ぼす影響の概要図

- (2024): Effects of mid - latitude oceanic fronts on the middle atmosphere through upward propagating atmospheric waves. **Geophysical Research Letters**, 51, e2024GL108262
2. *Mochizuki, T. (2024): Multi-year potential predictability of the wintertime heavy precipitation potentials in East Asia. **Geophysical Research Letters**, 51, e2024GL108312.
 3. *Qiao, Y.-X., H.-H. Nakamura, T. Tomita (2024): Warming of the Kuroshio Current over the last four decades has intensified the Meiyu-Baiu rainband. **Geophysical Research Letters**, 51, e2023GL107021.
 4. *Yamaguchi, M., N. Usui, and N. Hirose (2024): Typhoon Intensity Forecasts using TIFS with Pseudo Ocean Coupling. **SOLA**, 20, 86–91
 5. *Adachi, Y., H. Naoe, and Y. Kubo (2023): Impact of the SST-front on subseasonal predictions of North Atlantic winter circulation using the JMA operational seasonal prediction system. **SOLA**, 19, 282–288.
 6. *Kanada, S., and A. Nishii (2023): Observed Concentric Eyewalls of Supertyphoon Hinnamnor (2022). **SOLA**, 19, 70–77.
 7. *Kido, S., M. Nonaka, and Y. Miyazawa (2023): Skillful multiyear prediction of the Kuroshio and Gulf Stream jets and eddies. **Geophysical Research Letters**, 50, e2023GL103705
 8. *Oka, E., S. Sugimoto, F. Kobashi, H. Nishikawa, S. Kanada, T. Nasuno, R. Kawamura, and M. Nonaka (2023): Subtropical Mode Water south of Japan impacts typhoon intensity. **Science Advances**, 9, eadi2793
 9. *Kawase, H., S. Watanabe and Y. Imada (2022): Impacts of historical atmospheric and ocean warming on heavy snowfall in December 2020 in Japan. **J. Geophysical Research-Atmosphere**, 127, 1–19
 10. *Koshiro, T., H. Kawai, and A.T. Noda (2022): Estimated cloud-top entrainment index explains positive low-cloud-cover feedback. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United State of America**, 119, e2200635119
 11. *Tachibana, Y., M. Honda, H. Nishikawa, H. Kawase, H. Yamanaka, D. Hata, and Y. Kashino (2022): High moisture confluence in Japan Sea polar air mass convergence zone captured by hourly radiosonde launches from a ship. **Scientific Reports**, 12, 21674
 12. *Iizuka, S., R. Kawamura, H. Nakamura, and T. Miyama (2021): Influence of Warm SST in the Oyashio Region on Rainfall Distribution of Typhoon Hagibis (2019). **SOLA**, 17A, 21–28
 13. *Imada Y., H. Kawase (2021): Potential Seasonal Predictability of the Risk of Local Rainfall Extremes Estimated Using High - Resolution Large Ensemble Simulations. **Geophysical Research Letters**, 48, e2021GL096236.
 14. *Kamae, Y., Y. Imada, H. Kawase, and W. Mei (2021): Atmospheric rivers bring more frequent and intense extreme rainfall events over East Asia under global warming. **Geophysical Research Letters**, 48, e2021GL096030, doi:10.1029/2021GL096030.
 15. *Miyama, T., S. Minobe, and H. Goto (2021): Marine Heatwave of Sea Surface Temperature of the Oyashio Region in Summer in 2010–2016. **Frontiers in Marine Science**, 7, 576240
 16. *Okajima, S., H. Nakamura, and Y. Kaspi (2021): Cyclonic and anticyclonic contributions to atmospheric energetics. **Scientific Reports**, 11, 13202.
 17. *Sugimoto, S., B. Qiu, and N. Schneider (2021): Local atmospheric response to the Kuroshio large meander path in summer and its remote influence on the climate of Japan. **J. Climate**, 34, 3751–3589.
 18. *Alsepan, G., and S. Minobe (2020): Relations between interannual variability of regional-scale Indonesian precipitation and large-scale climate modes during 1960–2007. **J. Climate**, 33, 5271–5291.
 19. *Fujiwara, K., R. Kawamura, and T. Kawano (2020): Remote Thermodynamic Impact of the Kuroshio Current on a Developing Tropical Cyclone Over the Western North Pacific in Boreal Fall. **J. Geophysical Research: Atmospheres**, 125, e2019JD031356.
 20. *Masunaga, R., H. Nakamura, B. Taguchi, and T. Miyasaka (2020): Processes shaping the frontal-scale time-mean surface wind convergence patterns around the Kuroshio Extension in winter. **J. Climate**, 33, 3–25.

【受賞等】

日本気象学会山本賞：岡島 悟（2022）
 日本気象学会正野賞：釜江 陽一（2023）、川瀬 宏明（2020）、今田 由紀子（2019）
 日本気象学会堀内賞：金谷 有剛（2019）
 日本気象学会賞：松井 仁志（2022）、茂木 信宏（2021）
 日本気象学会藤原賞：高薮 縁（2023）、中村 尚（2020）
 日本地球惑星科学連合 西田賞：今田 由紀子（2023）、茂木 信宏（2021）、小坂 優（2021）
 日本地球惑星科学連合 フェロー：中村 尚（2022）
 科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞(研究部門)：高薮 縁（2023）、中村 尚（2023）
 Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) Kamide Lecture：神山 翼（2022）、山本 絢子（2022）
 American Meteorological Society Fellow：高薮 縁（2021）
 The Joanne Simpson Tropical Meteorology Research Award：高薮 縁（2024）