

## 4. 気候系の Hotspot：中緯度の暖流や水温前線が及ぼす 気候系への影響

中村 尚<sup>\*1,\*2</sup>・磯辺 篤彦<sup>\*3</sup>・立花 義裕<sup>\*4</sup>  
 早坂 忠裕<sup>\*5</sup>・川村 隆一<sup>\*6</sup>・野中正見<sup>\*2</sup>  
 川合 義美<sup>\*7</sup>・見延 庄士郎<sup>\*8</sup>  
 三寺 史夫<sup>\*9</sup>・吉田 聡<sup>\*10</sup>

### 1. はじめに：気候力学の長年の「常識」

20世紀後期に花開いた気候力学研究の最大の成果の1つは、エルニーニョ・南方振動(ENSO: El Niño/Southern Oscillation)など、熱帯の大気海洋結合変動に伴う低緯度域の降水異常が対流圏循環偏差を励起し、それが中緯度に伝播して大気循環や海面水温場に影響を与えるという「遠隔影響 (teleconnection)」あるいは「大気の架け橋 (atmospheric bridge)」の概念の確立であり(例えば, Lau 1997; Alexander *et al.* 2002), これが今日の全球的な季節天候予報に最も重要な根拠を供している。例えば, エルニーニョに伴う赤道太平洋の暖水偏差とともに積乱雲の活動域が中部赤道太平洋にまで東方に拡がると, その遠隔影響で北太平洋上空の西風ジェット気流が強化される。海上では亜熱帯高圧帯の強化とともに, その北に停滞するアリューシャン低気圧が強化・東偏し, 両者の間を吹く海上偏西風も強まる。こうして海面蒸発や海洋

表層混合が強化される中緯度北太平洋には広く冷水偏差が形成される(Alexander *et al.* 2002)。一方, 赤道太平洋域に冷水偏差が広がるラニーニャ(La Niña)時には, 上記の大気循環や海面水温の偏差の符号は全て反転し, 中緯度北太平洋には暖水偏差が形成される。

加えて, 南北気温傾度の大きな中緯度海洋上には移動性高低気圧の活動が特に活発な「ストームトラック(stormtrack)」が形成されており, 擾乱に伴う上空での極向き渦度輸送と下層での極向き熱輸送によって, 強い海上偏西風を伴って圏界面まで達する深いジェット気流が形成されている(例えば, Nakamura *et al.* 2004)。この渦駆動のジェット気流は「極前線ジェット(PFJ: Polar-Front Jet)」, または「亜寒帯ジェット(subpolar jet)」と呼ばれる。熱帯の対流活動により駆動されてハドレー循環の下降流域に形成される「亜熱帯ジェット気流(STJ: Sub-Tropical Jet)」が下層の亜熱帯高圧帯上空に位置し, 下層風が弱い鉛直構造を有するのとは対照的に, PFJは海面まで達する深い構造を持つ(Nakamura *et al.* 2004)。熱帯からの遠隔影響の有無に拘わらず, 移動性高低気圧活動の変調とともにPFJの緯度や強度も変動することを反映し, 中緯度海洋上では大気循環の内部変動も特に大きい。海上風や海上気温・湿度の内部変動も, 海面蒸発や海洋表層混合の変動を通じて海面水温偏差を強制する(Alexander *et al.* 2002)。

こうして, 北太平洋など中緯度で観測される海面水温変動は基本的に大気循環変動によって強制されたものと認識されてきたのである。この際, 水温偏差はそ

\*1 東京大学先端科学技術研究センター。  
hisashi@atmos.rcast.u-tokyo.ac.jp

\*2 海洋研究開発機構アプリケーションラボ。

\*3 九州大学応用力学研究所。

\*4 三重大学生物資源研究所。

\*5 東北大学大学院理学研究科。

\*6 九州大学大学院理学研究院。

\*7 海洋研究開発機構地球環境観測研究開発センター。

\*8 北海道大学大学院理学研究院。

\*9 北海道大学低温科学研究所。

\*10 京都大学防災研究所。

© 2019 日本気象学会

れを強制した局所的な海面熱放出偏差とは逆符号を持つ (Tanimoto *et al.* 2003). 即ち, 偏西風の強化 (弱 化) に伴う熱放出の増大 (減少) が冷水 (暖水) 偏差を生むという局所的な過程である. ただし, 強制源としての大気循環偏差を反映し, 形成される水温偏差は 大洋規模となり, 大規模変動を抽出しがちな経験直交 関数 (EOF) 解析で卓越変動として認識されやすい. 実際, 中緯度・亜熱帯北太平洋域の海面水温変動の EOF 解析で卓越変動として抽出される“太平洋十年 規模振動 (PDO: Pacific Decadal Oscillation)”には, 熱帯起源の水温変動からの遠隔影響や北太平洋上 の大気内部変動によって強制された水温変動が強く反 映されている (Mantua *et al.* 1997; Kwon *et al.* 2010; Newman *et al.* 2016).

このように中緯度北太平洋は, ENSO に伴う水温 の経年変動やそれに重なる PDO など長期変動を含め, 上空の大気変動に受動的にตอบสนองするだけと考えられ, これが気候力学の長年の常識となっていたのである. その根拠の1つは中緯度海面水温の低さである. 表層水温の高い熱帯域では, そのわずかな変化も海上 の水蒸気量に影響し, 海洋変動が効果的に積雲対流活 動を変化させ, 大気循環変動を駆動し得るのに対し, たとえ海洋循環変動に伴って表層水温が変化しても, 水温の低い中緯度域では大気循環偏差を能動的に駆動 するのは困難と考えられてきたのである. 実際, 北太 平洋・北大西洋で観測される大洋規模の海面水温偏差 については, 上空に卓越する大気偏差からやや遅れて 両者の相関が最大となる傾向が明瞭であり (Alexander *et al.* 2002), 後者から前者への強制が強く示唆さ れた. また, 1980~90年代に実施された一連の大気大 循環モデル (AGCM) 実験では, 熱帯の海面水温偏差 を下方境界条件に与えた場合に, その符号に応じて 中緯度大気循環に「大気の架け橋」を介した現実的な 応答が再現されたのに対し (Lau 1997), 中緯度に現 実的な振幅の水温偏差を与えた実験では大気循環応答 は弱く (Lau 1997), 偏差の符号に応じた系統的な応 答が現れにくい傾向が顕著で (Kushnir *et al.* 2002), 中緯度海洋の受動性を強く印象づけた. 実際今日で も, 中緯度の季節予報はその最大の根拠を ENSO など の熱帯域の大気海洋結合変動に求めている.

## 2. 中緯度西岸境界流としての暖流と海洋前線

ただし中緯度域において, 「西岸強化」過程により 大洋の西縁で強化される狭い暖流に沿っては水温が高

く, その変動が大気偏差を能動的に駆動する潜在性を 有すると筆者らは考えた. 実際, 熱帯から中緯度域へ の平均的熱エネルギー輸送において海洋循環は重要な 役割を果たしており, 黒潮や (メキシコ) 湾流という 暖流が卓越する北半球では, その熱輸送の大半を海洋 亜熱帯循環系が担っている. こうして熱帯から輸送さ れた熱エネルギーは, 大洋の西縁の狭い暖流から集中 的に大気に放出される. これに最も寄与するのは, 寒 候期に大陸東岸からの冷乾な気流によって促される海 面蒸発に伴う膨大な潜熱放出である. 実際, 顕熱放出 も合わせると, 1月の気候平均として海面から大気へ の乱流熱フラックスは湾流域全体で約0.9 PW (PW=10<sup>12</sup>W), 黒潮やその続流域を含む北西太平洋 域では冬季季節風の影響で約2 PWにも達する (Na- kamura *et al.* 2015). このように海洋から大気へと熱 や水蒸気が集中的に供給される中緯度大洋西縁の強い 暖流域を筆者らは「気候系の hotspot」と名付け, 大 気に能動的に影響し得る中緯度海域として研究対象に 据えたのである.

なお, 暖流から大気に供給された熱エネルギーは, 移動性高低気圧など大気擾乱によりさらに高緯度へと 輸送される. ここで重要となるのが, 大洋西縁の強い 暖流が, 合流してくる強い寒流との境界に顕著な水温 南北勾配を有する「海洋前線」あるいは「水温前線」 を形成することである. 北西太平洋では, 黒潮続流を 伴う亜熱帯循環系と親潮を伴う亜寒帯循環系が日本東 方沖で近接し, 「亜寒帯前線帯」を形成する (Kida *et al.* 2015). 大気への熱・水蒸気供給が寒流からは強く 抑制されるため, 海洋前線を挟んで海上気温の南北勾 配, 即ち海上大気の傾圧性が効率的に維持される. こ うして温帯低気圧の頻繁な発達を促されることで, 大 洋西縁の海洋前線に沿ってストームトラックが形成さ れ易いのである (Nakamura *et al.* 2004).

さらに興味深いことは, 北西太平洋の亜寒帯前線帯 が十年規模で南北変位し, それに伴う水温偏差が北太 平洋域の海面水温十年規模変動において最も卓越し, かつ前線帯の水温偏差が熱帯太平洋の十年規模水温変 動とは有意な同時相関を持たない事実である (Na- kamura *et al.* 2004). これは, 前線帯の水温偏差が 「大気の架け橋」を介した大気偏差により局所的に強 制されたものではないことを示唆する. 実際, 他の多 くの 中緯度海域とは対照的に, 北偏 (南偏) した前線 帯で観測される暖水 (冷水) 偏差に伴っては海面での 熱・水蒸気放出偏差が正 (負) で, 前線帯の水温偏差

と海面熱放出偏差は同符号となる傾向が既存データの綿密な解析から見出された (Tanimoto *et al.* 2003; Nakamura *et al.* 2004). この関係は ENSO など熱帯域の大気海洋結合変動と同様で、中緯度海洋変動から大気への熱力学的強制を示唆するものである。

さらに重要なことは、今世紀になって新しい人工衛星の登場や地球シミュレータなど計算機資源の飛躍的拡充により、大洋西縁の狭い暖流に沿った大気海洋相互作用の実態を高い空間解像度で把握し、関連する高分解能の数値モデリングが可能になったことである。例えば、水温の高い黒潮や湾流に沿っては大気境界層内で成層不安定となって風運動量の乱流鉛直混合が特に活発化するため、周囲より海上風速が大きい傾向が衛星マイクロ波散乱計により明瞭に捉えられた (Nonaka and Xie 2003; Chelton *et al.* 2004). 一方、衛星マイクロ波・レーダーによる観測から降水帯が湾流に沿いに分布する様子も捉えられ、この再現を企図した高解像度数値実験からは、降水帯形成における暖流からの熱供給に伴う下層風収束の重要性が強く示唆された (Minobe *et al.* 2008; Small *et al.* 2008; Kelly *et al.* 2010; Kuwano-Yoshida *et al.* 2010).

上記一連の研究で見出された現象は、いずれも中緯度大洋西縁で強化された暖流とそれに付随する海洋前線帯という幅の狭い領域に限定されたものである。「大気の架け橋」で着目した中緯度大洋の中・東部で観測される海面水温偏差が、その熱力学強制としての大気循環偏差を反映した大規模な東西・南北スケールを持つ傾向 (Alexander *et al.* 2002) とは対照的である。そして、暖流・海洋前線に沿った水温偏差が海流自体の空間規模を反映する事実は、付随する大気偏差がその水温偏差への応答と解釈すべきことを意味する。そして、その応答が大気境界層のみならず、対流性降水帯の組織化やストームトラック活動の変調を介して自由対流圏にまで及び得ることも意味する。

### 3. 科研費新学術領域研究「中緯度海洋と気候」

第2節でご紹介した中緯度大気海洋相互作用の新しい研究の流れは、中緯度海洋の受動性を前提にした従来の気候力学の常識に挑戦するものであり、その創出において筆者ら日本人研究者からなされた重要な貢献は国際的にも認知されてきた。その流れをさらに深化・発展させ、日本からの貢献が国際的な研究の流れを引き続き主導できるよう、筆者らが中心となって文部科学省科学研究費補助金 (以下、科研費) 新学術領

域研究「気候系の hot spot: モンスーンアジアの大気海洋結合変動」(略称: 中緯度海洋と気候) を組織し、幸いにも2010年夏に採択された (領域代表: 中村尚). 新学術領域は現行の科研費制度の中で最大規模の種別で、「中緯度海洋と気候」には全国から気象学、海洋物理学、気候学の研究者約75名、大学院生約30名の計100余名が参加し、「中緯度の海洋は大気循環の変動に受動的に応答するだけ」という気象学・気候力学における長年の常識に5年にわたり挑戦した。筆者10名はこの全国規模の研究組織を主導した総括班メンバーであり、うち9名は研究領域の基盤を成す「計画研究班代表」を務めた (第1表)。また、後述のように、領域全体で実施する現場観測研究と数値モデリング研究の各支援チームを総括班に設け、川合と吉田がそれぞれのチームを率いた。研究領域の5年にわたる成果は、2019年に刊行予定の気象研究ノート「気候系の hot spot: 中緯度大気海洋相互作用の最前線」に詳細に報告される予定で、刊行準備が整い次第、会員諸氏にご案内申し上げたい。

そこでご紹介するように、研究領域の成果として、中緯度の強い暖流やそれに伴う顕著な水温前線が、局所的な風系や雲・降水系の形成から、低気圧の発達や移動経路、さらには大洋・半球規模の大気循環系の形成や変動に至るまで、実に多様な時空間規模で大気・気候系に影響し得ることが明らかにされた。時間の制約上、本講演でその全てをご紹介することはできないが、そのうちのハイライトを幾つかご紹介したい。なお、成果の一部は、2015年10月刊行の日本海洋学会専門誌 *Journal of Oceanography* 第71巻第5号の特別セクションに収録されている。さらに、米国気象学会の「仮想特集号」である2つの special collection, “US CLIVAR Western Boundary Currents”, 並びに “Climatic Implications of Frontal-Scale Air-Sea Interaction” にも多くの成果論文が収録されており、是非これらも参照して頂きたい。

### 4. 新学術領域研究の重要な成果の幾つか

#### 4.1 黒潮統流域での3隻同時集中観測

科研費新学術領域研究「中緯度海洋と気候」が領域を挙げて取り組んだ特色ある現場観測が幾つかある。その1つは、房総半島南東沖の黒潮統流の流軸やや南方 (33.8°N, 144.9°E) での2012年夏からの係留ブイ新規投入である。既存の黒潮統流再循環域の KEO ブイ (32.3°N, 144.6°E, 米国大気海洋庁 NOAA によ

第1表 科研費新学術領域研究「気候系の hot spot：モンスーンアジアの大気海洋結合変動」(略称：中緯度海洋と気候)の構成(計画班代表の所属は講演当時のもの)。総括班を除く9つの計画研究班は以下の3研究項目に大別される。A01：モンスーンアジア縁辺海における大気海洋相互作用；A02：北西太平洋における大気海洋相互作用とモンスーンシステム；A03：大規模気候系における大気海洋雪氷相互作用。この他に計15の公募研究(各2年間；第1期・第2期の総計)が採択され、計画研究班と連携して研究を推進した。

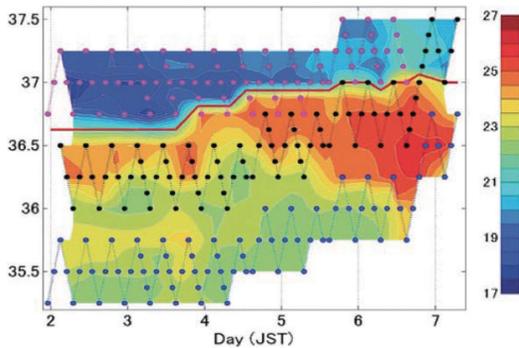
	計画研究班の名称	代表(所属)
総括班	中緯度大気海洋結合系研究の推進と統括	中村 尚(東京大学先端科学技術研究センター)
A01-1	縁辺海の海洋構造に励起される大気海洋相互作用と海洋生態系への影響	磯辺篤彦(九州大学応用力学研究所)
A01-2	縁辺海が大気の擾乱・雲形成・大規模循環に果たす役割	立花義裕(三重大学生物資源研究科)
A02-3	雲・放射エネルギーを介したモンスーンアジアの大気海洋相互作用	早坂忠裕(東北大学大学院理学研究科)
A02-4	東アジアモンスーン変動と黒潮・黒潮統流との双方向作用のメカニズム	川村隆一(九州大学大学院理学研究院)
A02-5	黒潮統流循環系の形成・変動メカニズムと大気・海洋生態系への影響	野中正見(海洋研究開発機構アプリケーションラボ)
A02-6	黒潮・親潮統流域における相互作用の現場観測	川合義美(海洋研究開発機構地球環境観測研究開発センター)
A03-7	大洋スケール大気海洋相互作用	見延庄士郎(北海道大学大学院理学研究院)
A03-8	モンスーン・アジアにおける大気海洋雪氷系の鉛直結合変動	中村 尚(東京大学先端科学技術研究センター)
A03-9	オホーツク海・北極域における大気海洋海水相互作用	三寺史夫(北海道大学低温科学研究所)

る運用)と北方の混合水域(38.0°N, 146.5°E)にて海洋研究開発機構が当時運用していた JKEO プイと合わせて係留プイ3基体制とし、黒潮統流から大気への熱・水蒸気供給の南北集中度や海洋内部の温度・塩分・流速場の南北分布の実態の連続観測を企図した。国際的にも斬新なこの試みも、プイ投入後約2ヶ月で漁具接触が原因で一部気象測器の電源系統に異常を来たし、その半年後には係留索破断で漂流したため、想定通りの連続観測が実施できなかった。それでも、新規プイで取得した海面水温データが人工衛星 GCOM-W 搭載の AMSR2 センサーの精度検証に活用され、追加搭載の GPS 波浪計と海中溶存酸素センサーを活かして外洋での高頻度(10分毎が基準)の定点連続観測に成功した。

新規プイ投入に合わせ、2012年7月2～6日、関東東方沖の黒潮統流とその北縁の海洋前線(黒潮統流前線)を3隻の観測船が互いの南北間隔を保持したまま往復横断するという世界的にも前例のない斬新な形態

の観測を成功させた(Kawai *et al.* 2015; 第1図)。横断観測は143.0°E線に沿って0.75°または0.5°の緯度間隔で、北から「勢水丸(三重大学)」、「若鷹丸(東北水産研究所)」、「淡青丸(海洋研究開発機構)」の順に並び、各々が基準緯度から0.25°の緯度幅で8時間かけて往復した。その際、若鷹丸が黒潮統流の流軸付近、淡青丸がその南方、勢水丸のみが統流前線北側の冷水側に常に位置するようにした。前線を挟んでの海面水温差は約5°Cであった。ただし、7月3日夜からわずか24時間で黒潮統流と前線が約0.5°北上したため、それに合わせて3隻の基準緯度を北上させた。横断観測では2時間毎(場合に依っては1時間毎)に3隻同時にラジオゾンデを放球しつつ、水温・塩分・

流速の観測測器を投入した。甲板では短波放射、気圧、気温、相対湿度、降水量、風向・風速の連続観測、及びシーロメータによる雲底高度観測も実施した。詳細は Kawai *et al.* (2015) に譲るが、統流前線の南北で大気境界層のメソ構造が大きく異なり、それが梅雨前線を東進する低気圧の通過に伴って揺らぐ様子が明瞭に捉えられた。特に、低気圧接近時の暖気移流時と通過後の寒気移流時で、統流前線を挟んで下層雲の雲底高度や特徴が明瞭に異なることが捉えられた。寒気移流時には冷水側に比べて暖水側で雲底高度が明瞭に高まるのが観測された。ここで強調すべきは、時間変化と南北構造の寄与との明確な分離が3隻同時観測によって初めて可能になったことである。1隻の観測ではこの分離は不可能である。この他にも本新学術領域が主導した観測船を用いた現場観測や関連の別研究プロジェクトとの連携として実施された現場観測も幾つかあるが、刊行予定の気象研究ノートに譲りたい。



第1図 2012年7月に実施された3隻同時観測期間中の143°Eにおける海面水温(°C:色)の緯度(左軸:°N)・時間(横軸:日)断面図。赤線は黒潮続流前線。赤・黒・青の細線はそれぞれ観測船「勢水丸」,「若鷹丸」,「淡青丸」の航路。●はラジオゾンデ放球緯度・時間, Kawai *et al.* (2015) より。

#### 4.2 黒潮とその続流域における雲・降水系の組織化

「中緯度海洋と気候」の重要な成果として、黒潮やその続流が夏季・冬季モンスーンの下で、大気境界層の構造や風系に及ぼす影響を介して、対流性の雲・降水系の組織化にも寄与することを見出したことが挙げられる。梅雨期には沖縄西方を北流する黒潮流軸付近で対流性降水が最大となる傾向が TRMM 衛星から確認され (Sasaki *et al.* 2012), 東シナ海に停滞しがちな梅雨前線に伴う対流性降水の極大から明瞭に南偏している。実際、5月下旬から6月にかけて、東シナ海中部に停滞する梅雨前線へと熱帯域からの暖湿な南寄りの季節風が吹く状況では、周囲より海面水温が高い黒潮流軸沿いに対流性降水帯が半日以上も持続する事例が幾度か観測されている (Miyama *et al.* 2012)。

その後、梅雨末期にかけて、冬季季節風で強く冷却された東シナ海の西部から北部の浅い陸棚部は急速に水温が上昇する。九州西部では弱い降水も含めた年平均雨量が梅雨最盛期の6月下旬に最大になるものの、災害をもたらす豪雨は7月中・下旬の梅雨末期に集中する傾向が確認された (Manda *et al.* 2014)。2012年の「九州北部豪雨」は典型例であり、その予測再現実験から東シナ海北部の季節的な水温上昇が対流性降水の増大に為した重要な寄与が示された (Manda *et al.* 2014)。

一方、冬季には関東南東沖の東方海上で、暖かい黒

潮続流に沿って形成される海面気圧の谷に沿って対流性の雲・降水系が組織化される傾向が衛星観測からも捉えられる。しかも、黒潮続流が強く蛇行せずに東流する「安定期」と、黒潮続流が顕著に蛇行して、その北側の混合水域に暖水渦を盛んに切離する「不安定期」という異なる力学的レジーム間を揺らいでいる。最新の衛星観測は海上風収束や降水分布が安定期と不安定期とで変動する可能性を捉えているが、衛星観測に基づく高分解能の海面水温データを与えて作成した最新の大気再解析データのみが、安定期・不安定期の海上風収束や対流性降水の差異を、海洋変動への大気応答として明確に表現できることが分かった (Masunaga *et al.* 2016)。現在、気象庁気象研究所では「中緯度海洋と気候」との連携の下、最新の全球大気再解析データ JRA-55の追加プロダクトとして、衛星観測に基づく高分解能海面水温データ (MGD-SST) を与えた JRA-55CHS を作成中である (Masunaga *et al.* 2018)。このデータは1982年以降に限られるものの、現場観測に基づく比較的低解像度の水温データを与えて作成した他の JRA-55プロダクトとの比較から、中緯度海洋が大気に能動的に与える影響を調査するのに有用であり、近い将来国内外に公開予定である。

#### 4.3 中緯度海洋前線からの大規模大気循環への影響

「中緯度海洋と気候」のもう1つの重要な成果は、中緯度の海洋前線が低気圧の発達や移動経路を介して、大洋・半球規模の大気循環系の形成や変動に影響し得る傾向を見出したことである。例えば、北西太平洋亜寒帯前線帯の十年規模変動は、ストームトラック活動の変調を介してアリューシャン低気圧の持続的変動をもたらすことが見出された (Taguchi *et al.* 2012)。さらに、南半球の環状モード変動 (SAM: Southern Annular Mode) に及ぼす中緯度海洋前線帯の影響を意識した理想化された AGCM 実験と全球大気再解析データの解析から、冬季 SAM は大気内部力学の影響が支配的となる準定常状態を反映した負位相と、下方境界条件である中緯度海洋前線帯からの熱力学的影響を強く受ける別の準定常状態を反映した正位相との間の遷移過程の現れであるという作業仮説が得られ、これに基づけば冬季 SAM 変動に観測される各大洋間の振る舞いの違いが矛盾無く説明される (Ogawa *et al.* 2016)。さらに、中緯度海洋前線帯が無い場合に比べると、季節を問わずストームトラック

活動が高緯度側で活発化し、渦駆動 PFJ が強化される。すると、その卓越変動である環状モード変動も亜寒帯域で顕著となる結果、成層圏の極渦変動と対流圏の環状モード変動との結合が強化されるという斬新な作業仮説も得られた (Ogawa *et al.* 2015)。逆に現実とは異なり、中緯度海洋前線帯が存在しない状況では SAM の空間構造が歪んで振幅も低下し、成層圏の極渦変動とは結合できなくなることも数値実験から示された。このように、中緯度海洋が大気に能動的に与える影響を考慮することで、中高緯度域の気候系で観測される様々な現象に関して従来とは異なる解釈が可能ともなろう。気候の将来予測の不確実性低減のためにも有用な視点となり得る可能性を秘めている。

### 参 考 文 献

- Alexander, M. A., T. Bladé, M. Newman, J. R. Lanzante, N.-C. Lau and J. D. Scott, 2002: The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *J. Climate*, **15**, 2205-2231.
- Chelton, D. B., M. G. Schlax, M. H. Freilich and R. F. Milliff, 2004: Satellite measurements reveal persistent small-scale features in ocean winds. *Science*, **303**, 978-983.
- Kawai, Y., T. Miyama, S. Iizuka, A. Manda, M. Yoshioka, S. Katagiri, Y. Tachibana and H. Nakamura, 2015: Marine atmospheric boundary layer and low-level cloud responses to the Kuroshio Extension front in early summer of 2012: three-vessel simultaneous observations and numerical simulations. *J. Oceanogr.*, **71**, 511-526.
- Kelly, K. A., R. J. Small, R. M. Samelson, B. Qiu, T. M. Joyce, Y.-O. Kwon and M. F. Cronin, 2010: Western boundary currents and frontal air-sea interaction: Gulf Stream and Kuroshio Extension. *J. Climate*, **23**, 5644-5667.
- Kida, S., H. Mitsudera, S. Aoki, X. Guo, S. Ito, F. Kobashi, N. Komori, A. Kubokawa, T. Miyama, R. Morie, H. Nakamura, T. Nakamura, H. Nakano, H. Nishigaki, M. Nonaka, H. Sasaki, Y. N. Sasaki, T. Suga, S. Sugimoto, B. Taguchi, K. Takaya, T. Tozuka, H. Tsujino and N. Usui, 2015: Oceanic fronts and jets around Japan - a review. *J. Oceanogr.*, **71**, 469-498.
- Kushnir, Y., W. A. Robinson, I. Bladé, N. M. J. Hall, S. Peng and R. Sutton, 2002: Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation. *J. Climate*, **15**, 2233-2256.
- Kuwano-Yoshida, A., S. Minobe and S.-P. Xie, 2010: Precipitation response to the Gulf Stream in an atmospheric GCM. *J. Climate*, **23**, 3249-3281.
- Kwon, Y.-O., M. A. Alexander, N. A. Bond, C. Frankignoul, H. Nakamura, B. Qiu and L. Thompson, 2010: Role of Gulf Stream and Kuroshio-Oyashio systems in large-scale atmosphere-ocean interaction: A review. *J. Climate*, **23**, 3249-3281.
- Lau, N.-C., 1997: Interactions between global SST anomalies and the midlatitude atmospheric circulation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 21-33.
- Manda, A., H. Nakamura, N. Asano, S. Iizuka, T. Miyama, Q. Moteki, M. K. Yoshioka, K. Nishii and T. Miyasaka, 2014: Impacts of a warming marginal sea on torrential rainfall organized under the Asian summer monsoon. *Sci. Rep.*, **4**, 5741.
- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace and R. C. Francis, 1997: A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1069-1079.
- Masunaga, R., H. Nakamura, T. Miyasaka, K. Nishii and B. Qiu, 2016: Interannual modulations of oceanic imprints on the wintertime atmospheric boundary layer under the changing dynamical regimes of the Kuroshio Extension. *J. Climate*, **29**, 3273-3296.
- Masunaga, R., H. Nakamura, H. Kamatori, K. Onogi and S. Okajima, 2018: JRA-55CHS: An atmospheric reanalysis produced with high-resolution SST. *SOLA*, **14**, 6-13.
- Minobe, S., A. Kuwano-Yoshida, N. Komori, S.-P. Xie and R. J. Small, 2008: Influence of the Gulf Stream on the troposphere. *Nature*, **452**, 206-209.
- Miyama, T., M. Nonaka, H. Nakamura and A. Kuwano-Yoshida, 2012: A striking early-summer event of a convective rainband persistent along the warm Kuroshio in the East China Sea. *Tellus*, **A64**, 18962.
- Nakamura, H., T. Sampe, Y. Tanimoto and A. Shimpo, 2004: Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts. *Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction* (C. Wang *et al.*, ed.), *Geophys. Monogr.*, **147**, Amer. Geophys. Union, 329-346.
- Nakamura, H., A. Isobe, S. Minobe, H. Mitsudera, M. Nonaka and T. Suga, 2015: "Hot spots" in the climate system - new developments in the extratropical ocean-atmosphere interaction research - : a short review and introduction. *J.*

- Oceanogr., 71, 463-468.
- Newman, M., M. A. Alexander, T. R. Ault, K. M. Cobb, C. Deser, E. Di Lorenzo, N. J. Mantua, A. J. Miller, S. Minobe, H. Nakamura, N. Schneider, D. J. Vimont, A. S. Phillips, J. D. Scott and C. A. Smith, 2016: The Pacific Decadal Oscillation, revisited. *J. Climate*, 29, 4399-4427.
- Nonaka, M. and S.-P. Xie, 2003: Covariations of sea surface temperature and wind over the Kuroshio and its extension: Evidence for ocean-to-atmosphere feedback. *J. Climate*, 16, 1404-1413.
- Ogawa, F., N.-E. Omrani, K. Nishii, H. Nakamura and N. Keenlyside, 2015: Ozone-induced climate change propped up by the Southern Hemisphere oceanic front. *Geophys. Res. Lett.*, 42, 10056-10063.
- Ogawa, F., H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka and A. Kuwano-Yoshida, 2016: Importance of mid-latitude oceanic frontal zones for the annular-mode variability: Inter-basin basin differences in the southern annular-mode signature. *J. Climate*, 29, 6179-6199.
- Small, R. J., S. P. deSzoeke, S.-P. Xie, L. O'Neill, H. Seo, Q. Song, P. Cornillon, M. Spall and S. Minobe, 2008: Air-sea interaction over ocean fronts and eddies. *Dyn. Atmos. Ocean*, 45, 274-319.
- Sasaki, Y. N., S. Minobe, T. Asai and M. Inatsu, 2012: Influence of the Kuroshio in the East China Sea on the early summer (Baiu) rain. *J. Climate*, 25, 6627-6645.
- Taguchi, B., H. Nakamura, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, K. Takaya and A. Goto, 2012: Seasonal evolutions of atmospheric response to decadal SST anomalies in the North Pacific Subarctic Frontal Zone: Observations and a coupled model simulation. *J. Climate*, 25, 111-139.
- Tanimoto, Y., H. Nakamura, T. Kagimoto and S. Yamane, 2003: An active role of extratropical sea surface temperature anomalies in determining anomalous turbulent heat flux. *J. Geophys. Res. Oceans*, 108, 3304, doi:10.1029/2002JC001750.
-