

— 2016年度日本海洋学会岡田賞受賞記念論文 —

西部北太平洋亜熱帯域における 海洋表層変動の解析的研究*

杉本 周作[†]

要 旨

海洋表層には黒潮のような大規模循環があり、海域に固有の水温や塩分などで特徴付けられる水塊が分布する。筆者は、西部北太平洋亜熱帯域を対象に、海洋表層変動およびその気候変動における役割についての理解を深めるために解析的研究に取り組んできた。一連の研究を通して、(1) 冬季海面水温偏差再出現現象の三次元構造の理解、(2) 北太平洋中央部に存在するアリューシャン低気圧の南北位置変化に起因した傾圧海洋ロスビー波が北太平洋亜熱帯モード水の形成量や日本南方での黒潮流量・北太平洋中層水分布に及ぼす影響の評価、(3) 黒潮統流の流路形態変動の解釈、(4) 黒潮・親潮混合水域での大気海洋間熱交換関係における海洋表層の役割の解明などを行ってきた。本稿では、これらの研究内容について概説する。

キーワード：北太平洋亜熱帯モード水、黒潮統流流路形態、十年規模変動、大気海洋相互作用、大気海洋間熱交換関係

1. はじめに

海洋と大気は、熱や水、運動量などの交換を通じて互いに影響し合う大気海洋相互作用系を構成している。なかでも、亜熱帯域の海洋表層水温は、大気の熱的強制を受けて大きく変動する。そして、海洋が受けた熱的応答の情報は、海洋表層を通して海洋内部へと伝達される。

ただ、その情報は広大な海洋に一樣に伝わるわけではなく、海域ごとの特徴をもった成層構造の特性として「記憶」される。言い換えれば、大気からの強制に対する海洋の応答は水塊の変動として記録されている。すなわち、海洋表層の水塊は、大気海洋結合系やそれを包含する気候システム全体の変動を理解する上で極めて重要な要素である。

北太平洋亜熱帯循環系の表層には、海域に固有の水温や塩分などで特徴付けられる水塊が存在する。例えば、水温の鉛直勾配の極小層として特徴付けられる北太平洋亜熱帯モード水があり、亜熱帯循環系上層の広範囲に分布する (Masuzawa, 1969; Masuzawa, 1972 など)。他にも北太平洋亜熱帯循環域の北縁で形成される北太平洋中央モード水 (Nakamura, 1996; Suga *et al.*, 1997) や、北

* 2016年11月14日受理; 2017年1月12日受理
著作権: 日本海洋学会, 2017

[†] 東北大学 学際科学フロンティア研究所
〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3
TEL: 022-795-6529 FAX: 022-795-6530
e-mail: sugimoto@pol.gp.tohoku.ac.jp

太平洋亜熱帯域の深度 200 m から 800 m に広く分布する鉛直的な塩分極小で特徴付けられる北太平洋中層水 (Yasuda *et al.* 1996 など) がある。これらの水塊は体積が大きいために、表層の水温・塩分・密度の分布を決定づけるものである。それゆえに、水塊の形成・分布・散逸過程やその変動過程の実態把握は、様々な時空間スケールで存在する海洋表層変動の理解の深化やそのメカニズムの解明に不可欠なものである。

日本南岸を流れる黒潮は、風によって駆動される亜熱帯循環西岸境界流であり、海水とともに大量の熱を低緯度から中・高緯度へ運んでいる。そして、黒潮は千葉県房総半島沖で離岸した後に、東に向かって流れている。この東向きの流れは黒潮統流と呼ばれており、黒潮統流もまた高温な海水を運ぶ役割を担っている。この黒潮と黒潮統流は、冬季に周囲に比べて膨大な熱を大気に向けて放出し、気候形成に重要な役割を果たしている。そして、黒潮に代表される表層循環は、北太平洋亜熱帯モード水などの水塊の形成や分布に強く結びつくことが知られている (Hanawa, 1987; Hanawa and Hoshino, 1988; Suga and Hanawa, 1990; Bingham, 1992)。その一方で、亜熱帯モード水などは、渦位の輸送を通して海洋表層の成層構造や循環の力学に積極的に影響を及ぼすことが理論研究 (Kubokawa, 1997; Kubokawa, 1999) と資料解析研究 (Aoki *et al.*, 2001; Kobashi *et al.*, 2006; Yamanaka *et al.*, 2008) の双方から報告されており、水塊の力学的役割の解明が表層循環の構造やその変動の理解に有用であると考えられている (Kobashi and Kubokawa 2012)。

北太平洋亜熱帯モード水形成の支配要因は、冬の海洋から大気への熱放出であるとされている (Suga and Hanawa, 1990; Suga and Hanawa, 1995a; Yasuda and Hanawa, 1999)。それゆえに、北太平洋亜熱帯モード水は、冬季の大気強制に伴う海洋冷却の結果を貯熱量の形で表層内に「記憶する」と考えられている。仮に、この「記憶」が海面水温に作用することがあるならば、変化した海面水温がその上空の大気場に影響を及ぼす可能性がある。そこで、筆者は、北太平洋亜熱帯域の水塊を基軸にして大規模大気海洋相互作用系の存在を念頭に置きつつ、大気の強制を受けた海洋表層変動および変化した海洋からのフィードバックによる大気応答の解明を目指して解析的研究に取り組んできた。本稿では、その一

連の研究の概要を紹介する。

2. 冬季海面水温偏差の再出現現象研究

1990 年代に海洋観測資料の整備および蓄積が進められる中で、海洋表層の水温などが長周期で振動することが相次いで発見された。例えば、北太平洋の主要な海面水温変動である太平洋十年規模振動 (Pacific Decadal Oscillation: Mantua *et al.*, 1997; Minobe, 1997; Minobe, 2000; Zhang *et al.*, 1997 など) が有名である。この太平洋十年規模振動については多くの研究が行われており、長周期変動の物理機構として様々な仮説が提案されている。なかでも、赤道域と中・高緯度域の大気海洋相互作用による「沈み込み (subduction) 振動説」(花輪, 1996; Gu and Philander, 1997) や、中・高緯度域の大気海洋相互作用による「海洋循環説」(Latif and Barnett, 1994; Latif and Barnett, 1996; Deser *et al.*, 1999; Hanawa and Kamada, 2001 など) が有力な仮説として注目を集めた。しかしながら、いずれの仮説も十分に検証されておらず、依然として定説は得られていない。

筆者が東北大学の海洋物理学研究室に配属された当時 (2001 年 10 月)、国内外で海洋表層の長周期変動の研究が活発に行われていた。気候変動における海洋の役割の解明に憧れを抱いて海洋物理学の世界に飛び込んできた筆者は、自然に、海洋表層の長周期変動の研究に取り組むことになった。2003 年に大学院に進学した筆者は、海洋の長周期変動に迫る一つの突破口は「冬季海面水温偏差の再出現現象 (reemergence phenomenon)」であろうと考えるようになった。この再出現現象とは、冬季の深い混合層に形成された水温偏差が、夏季の薄い混合層下で持続し、再び翌冬の混合層に取り込まれることで冬季混合層内に同符号の偏差を出現させる現象である (Fig. 1)。すなわち、再出現現象は、記憶した過去の気候情報を未来に伝える「記憶装置」としての役割を果たすことが期待されていた。この現象の存在は、Namias and Born (1970, 1974) により先駆的に提唱されていたが、解析データセットの不十分性により研究が進展していなかった。

そこで、筆書は、まず、入手可能な複数の海面水温データセットを用いることで、再出現域の同定を試みた。

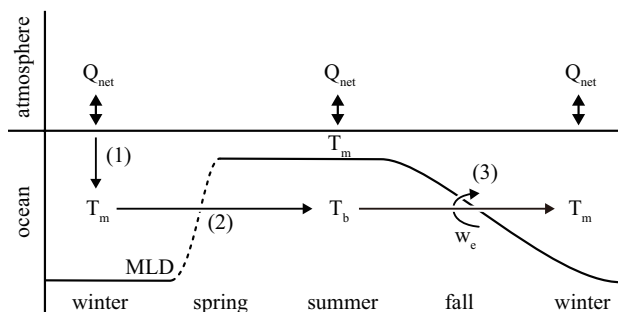


Fig. 1. Schematic diagram of the Namias and Born hypothesis: (1) Anomalous atmospheric forcing (Q_{net}) in winter forms a temperature anomaly (T_m) in a deep winter mixed layer (ML); (2) the temperature anomaly persists under the ML (T_b) when the ML shallows in spring; (3) the temperature anomaly is entrained into the ML in the following fall/winter, influencing surface temperature.

ここで、異なる考え方・手法で作成された複数のデータセットについて同じ解析を行ったのは、データの不十分性に起因する解析結果への信頼性および客観性にかかわる疑念を低減するためである。冬季海面水温偏差の形成域と翌年の再出現域が「同じ海域（定在型）」で起こるといふ仮定のもとで統計解析を実施した結果、世界の海洋に7つの再出現域があることを見出すことに成功した（Fig. 2）。また、この7つの海域は、いずれも深い冬季混合層で作られる「モード水（Mode Water）」の形成域

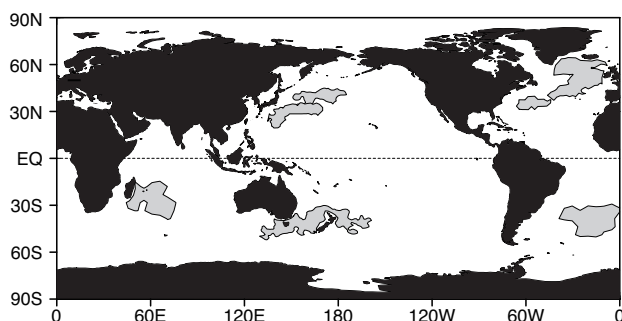


Fig. 2. Reemergence areas detected based on five sea surface temperature (SST) datasets (OISST, ERSST, SAGE SST, GISST, Yasunaka/Hanawa SST). Modified from Hanawa and Sugimoto (2004).

であることが分かった（Hanawa and Sugimoto, 2004）。当時の先行研究では再出現現象は海盆規模で起こるとされていた（Alexander *et al.*, 1999; Alexander and Scott, 2001; Timlin *et al.*, 2002; Deser *et al.*, 2003; Newman *et al.*, 2003）。しかしながら、本研究により、再出現現象は限定された海域で起きていることが見出された。なお、再出現現象が発生するのは、冬季混合層が発達するなかで混合層下部からの下層水の取り込み（entrainment）があるからに他ならない。そこで、Sugimoto and Kako (2016) は、北太平洋亜熱帯モード水形成域での冬季混合層水温偏差の形成過程を解明するために、Argo フロートなどの水温観測資料を用いて混合層熱収支解析を実施した。その結果、冬季混合層水温偏差の形成には下層水の取り込み過程こそが重要な要素であることが示された。これは上記仮説を支持するものであった。

1990年代から2000年代にかけて再出現現象について多くの研究が行われていたが、そのいずれもが海流系の影響を考慮しない定在型再出現の記述に留まっていた（Alexander and Deser, 1995; Alexander *et al.*, 1999; Watanabe and Kimoto, 2000; Timlin *et al.*, 2002; Deser *et al.*, 2003; Hanawa and Sugimoto, 2004 など）。そこで、Sugimoto and Hanawa (2005a) は、移流の効果を加味して、モード水形成域とは異なる海域で起こる再出現現象をも同定できる手法を開発し、再出現現象の三次元構造の理解を目指した。解析の結果、北太平洋亜熱帯モード水形成域の冬季混合層に形成された水温偏差は、大規模な流れの影響により亜表層を東に移動し、1年後の冬に北太平洋中央部で再出現することが分かった（Sugimoto and Hanawa, 2005a; Sugimoto and Hanawa, 2007a）。筆者らは、これを「遠隔型（remote）」再出現現象と名づけた。この遠隔型再出現は離れた海域の海面水温変動をつなぐ「海洋の架け橋」であり、海洋の長周期変動に作用することが期待される。現時点で遠隔型再出現現象が発見されているのは北太平洋のみである。しかし、遠隔型再出現の発現に関連付けられる亜熱帯モード水は北大西洋などの各大洋に分布する（Hanawa and Talley, 2001）。それゆえに、この遠隔型再出現現象は、北大西洋などの他の海域でも生じていると推定される。

筆者らは、再出現現象発生域はモード水の形成域に一致することを報告した（Hanawa and Sugimoto, 2004;

Sugimoto and Hanawa, 2005a)。しかしながら、全てのモード水形成域が再出現域として同定されるわけではない。例えば、北太平洋の東部に位置する北太平洋東部亜熱帯モード水の形成域では、定在・遠隔型再出現現象のいずれもが発生しない。そこで、Sugimoto and Hanawa (2005b, 2007b) は、鉛直分解能が高い WOCE (World Ocean Circulation Experiment) 定線データや時間分解能が高い Argo フロートデータを用い、北太平洋東部亜熱帯モード水の形成域が非再出現域になる要因を詳細に調べた。その結果、北太平洋東部亜熱帯モード水下層部では強い salt-finger 型二重拡散混合がモード水の特性を速やかに消失させることが分かった。さらに、北太平洋東部亜熱帯モード水は上層部でも変質も著しく、これは暖候期の海面加熱が極端に小さく、表層で密度成層が十分に発達しないためであることが分かった。最終的に、非再出現の種々の要因を検討・確認することを通して、再出現発現の必要条件を次のように提案した (Sugimoto and Hanawa, 2007b): (1) 冬季に深い混合層が形成され、層厚の厚いモード水が形成されること。(2) 暖候期に強い海面加熱により浅い混合層が速やかに形成され、亜表層のモード水が大気強制から隔離される「場」が構築されること。(3) 暖候期に亜表層のモード水が強い混合を受けないこと。

筆者は、長周期変動を駆動する物理機構として冬季海面水温偏差の再出現現象に着目して研究を行ってきた。次の課題は、太平洋十年規模振動などの海洋長周期変動に再出現現象が果たす役割や寄与を定量的に評価することである。今後も、蓄積された観測資料を用いた解析や数値モデルを用いた再現実験を通して太平洋十年規模振動の実態およびその変動メカニズムの解明を目指していきたい。

3. 大気強制場の十年規模変動研究

海洋表層の長周期変動機構を解明するためには、海洋を強制する大気場の理解が必要不可欠である。言い換えれば、大気強制に対する海洋の応答過程を解明することで、海洋表層のシステムをより良く理解できるようになる。そこで、筆者は、北太平洋の代表的な冬季大気大循環であるアリューシャン低気圧に着目し (Fig. 3 の (a)),

その変動の実態把握を試みた。

アリューシャン低気圧は冬に発達し、その強度は約 20 年周期で変わることが報告されている (Minobe, 1999; Overland *et al.*, 1999)。このアリューシャン低気圧の強弱は、北太平洋の海面水温 (Latif and Barnett, 1996) や海洋生態系 (Ebbesmeyer *et al.*, 1991; Polovina *et al.*, 1995; Mantua *et al.*, 1997)、亜熱帯・亜寒帯循環系の強度 (Ishi and Hanawa, 2005; Yasuda and Sakurai, 2006) などに大きく影響する。これまでに、アリューシャン低気圧の強度変動を表すものとして 2 つの指標が提案されている。1 つは領域平均海面気圧 [30°N-65°N, 160°E-140°W] で定義される North Pacific Index (NPI: Trenberth and Hurrell, 1994) であり、もう 1 つは海面気圧が 1005 hPa 以下になる領域の面積で定義される Aleutian Low Pressure Index (ALPI: Beamish *et al.*, 1997) である。いずれの指標も多くの大気・海洋研究で使用されている。

ただ、海洋表層においては、アリューシャン低気圧の強度だけでなくその位置も重要な情報である。しかしながら、既存の研究のほとんどがアリューシャン低気圧の強度のみに着目していた。そこで、Sugimoto and Hanawa (2009) は、1950 年から 2006 年までの 57 年間の大気再解析データを用いてアリューシャン低気圧中心位置の変動性を調べた。その結果、アリューシャン低気圧の位置は、大気テレコネクションパターンの 1 つである Pacific/North American (PNA) パターンに関連した約 20 年周期の東西位置変化と West Pacific (WP) パターンに関係した約 10 年周期の南北位置変化に分類されることが分かった (Fig. 3)。そして、アリューシャン低気圧の東西位置変化は亜熱帯・亜寒帯循環の強度に影響し、南北位置変化は両循環境界の南北移動を引き起こすことを見出した。

約 10 年周期でのアリューシャン低気圧南北位置変動の発見は、後述する西部北太平洋亜熱帯域での冬季混合層深度 (Sugimoto and Hanawa, 2010a; Sugimoto and Kako, 2016) や中層水分布 (Sugimoto and Hanawa, 2011a)、黒潮の正味流量 (Sugimoto *et al.*, 2010) などの約 10 年周期変動の理解の進展に大きく貢献した。また、現在、筆者は北大西洋の海洋表層循環にも興味を抱いており、その前準備として風応力の時空間変動性を調べた

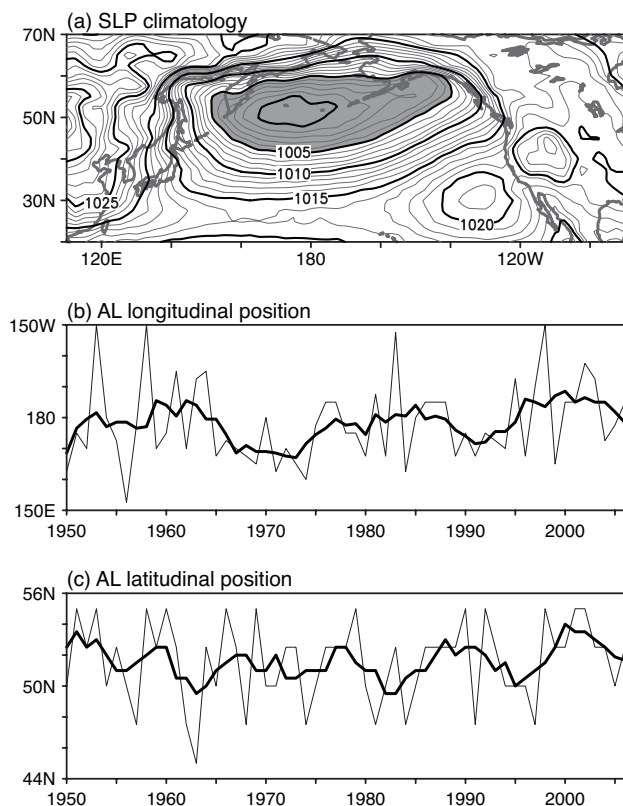


Fig. 3. (a) Sea level pressure climatology in winter (December–February). Time series of (b) longitudinal and (c) latitudinal position of Aleutian Low (AL) in winter. Thick line denotes 5-yr running mean values. Modified from Sugimoto and Hanawa (2009).

(Sugimoto and Hanawa 2010b)。近い将来、北太平洋と北大西洋を包含する大きな枠組みの中で気候変動研究を展開したいと考えている。

4. 北太平洋亜熱帯モード水研究

大学院生時代に取り組んだ冬季海面水温偏差の再出現現象研究 (Sugimoto and Hanawa, 2005a; Sugimoto and Hanawa, 2005b; Sugimoto and Hanawa, 2007a; Sugimoto and Hanawa, 2007b) により、北太平洋亜熱帯モード水 (以下、亜熱帯モード水) こそが大気海洋系の長周期変動機構を解明する鍵となるに違いないと確信を抱くようになった。

亜熱帯モード水とは北太平洋亜熱帯循環系の上層に広範囲にわたり分布する、水温の鉛直勾配の極小層として特徴付けられる水塊である (Masuzawa, 1969; Masuzawa, 1972 など)。海水特性の鉛直一様性は亜熱帯モード水が鉛直対流によって形成されることを表し、また、広範囲にわたる分布は亜熱帯モード水が形成域を離れて移流されることを反映している。この亜熱帯モード水は、主に黒潮統流南方の深い冬季混合層で形成される (Fig. 4 の (a)) (Hanawa and Hoshino, 1988 など)。そこで、筆者らは、亜熱帯モード水の形成量の変動特性を把握するために、黒潮統流南方域での冬季混合層深度を調べることにした。Sugimoto and Kako (2016) は、表層水温観測資料を用いることで、1968 年から 2014 年までの冬季混合層深度の長期時系列を作成することに成功した (Fig. 4 の (b))。そして、この時系列から、亜熱帯モード水形成域の冬季混合層深度は、1990 年頃を境に変動の様子が大きく変化したことを見出した。すなわち、1990 年以前では経年変動が著しいのに対し、1990 年以降では 10 年規模変動が卓越するようになっていた。そこで、この変動周期の変調要因を同定するために、観測資料解析と鉛直一次元乱流クロージャーモデル (Noh and Kim, 1999; Kako and Kubota, 2007) を用いた数値実験を実施した。解析の結果、1990 年以前の冬季混合層深度は、従来の研究 (Suga and Hanawa, 1990; Yasuda and Hanawa, 1999) で指摘されていたように北冬季節風に伴う海面冷却の影響が主因である一方、1990 年以降の混合層深度の決定に対する冬季冷却に伴う浮力損失の影響は小さく、代わりに海洋亜表層の成層強度が重要な要素になっていることを明らかにした (Sugimoto and Kako, 2016)。なお、この黒潮統流南方域での亜表層成層強度は、アリューシャン低気圧の南北位置変化に起因した傾圧海洋ロスビー波に伴う主水温躍層の鉛直変位 (Sugimoto and Hanawa, 2010a; Seo *et al.*, 2014; Sugimoto and Kako, 2016) や北方の黒潮・親潮混合水域からの高渦位水の流入 (Qiu and Chen, 2006; Qiu *et al.*, 2007; Oka *et al.*, 2012; Oka *et al.*, 2014) により決定される。

冬季に黒潮統流の南方で形成された亜熱帯モード水は、春以降に亜表層へ沈み込み (subduction)、移流することで亜熱帯循環系の広範囲に分布する (Masuzawa, 1969; Hanawa, 1987; Bingham, 1992; Suga and Hanawa,

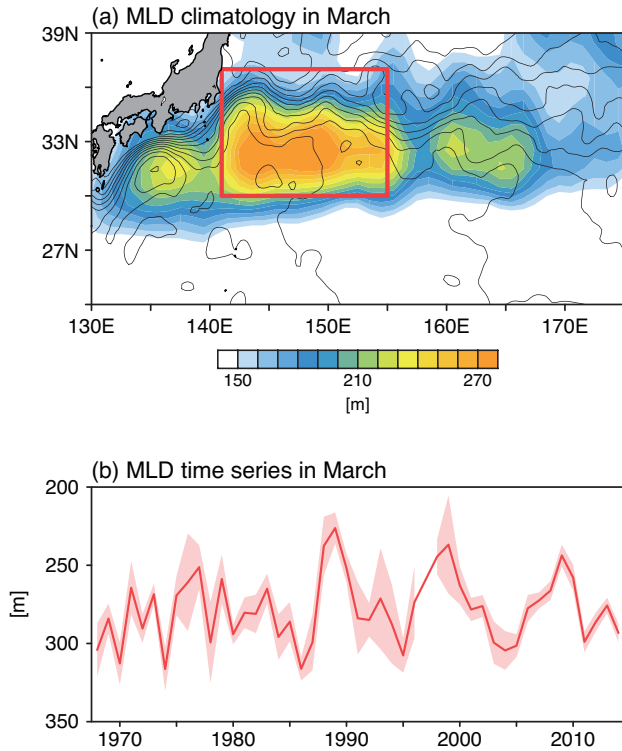


Fig. 4. (a) Climatological map of ML depth (MLD) in March (color). Contours represent sea surface height (SSH) climatology. (b) Time series of MLD in March, for the red rectangle region south of the KE in (a), using temperature profiles. Shading denotes one standard error estimated for months with at least five profiles; March 1997 was the only month with less than five profiles. Modified from Sugimoto and Kako (2016).

1995a; Oka and Qiu, 2012)。そこで、筆者らは、気象庁の東経137度線の観測資料を用いることで、日本南方に広がる亜熱帯モード水の鉛直分布を詳細に調べることとした。その結果、亜熱帯モード水が鉛直2層にわたり分布する時期があることが分かった (Fig. 5)。例えば、2005年に (Fig. 5の (b))、下層に分布する亜熱帯モード水の水温は16°C~18°Cであり、これは既存の研究で記述されてきた亜熱帯モード水の特徴に整合する (Hanawa and Talley, 2001; Oka and Qiu, 2012)。しかしながら、上層の亜熱帯モード水の水温は19°Cを超えており、従来の記述より1°C以上も高温であった。そこで、Sugimoto and Hanawa (2014) は、この高温型亜熱帯モード水

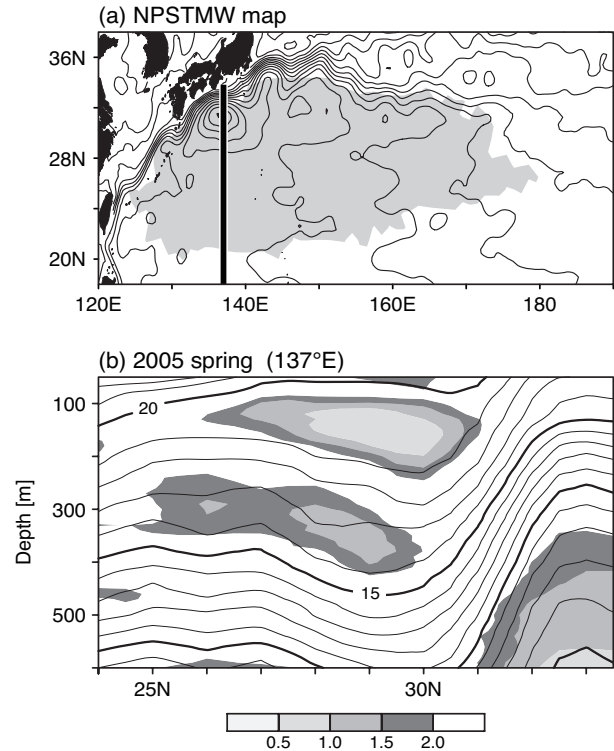


Fig. 5. (a) North Pacific Subtropical Mode Water (NPSTMW) distribution in July (gray shading). Black contours indicate SSH climatology. Thick black line denotes repeat hydrographic observations along 137° E conducted by the Japan Meteorological Agency. Modified from Sugimoto and Hanawa (2014). (b) Cross section of potential temperature at 137° E in 2005 spring. Shading denotes a potential vorticity ($10^{-10} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$).

の分布や形成の要因を明らかにするために、人工衛星観測データやArgoフロートデータなどを解析した。その結果、高温型亜熱帯モード水は、日本南方での黒潮の蛇行に伴う四国沖再循環内で形成されることが分かった (Fig. 6)、その高温化には再循環に伴う水平熱輸送の効果が重要な要素であることを示した。

この他、筆者らは、Argoフロートの展開により著しく増加した塩分データを解析し、亜熱帯モード水の塩分は前年暖候期の低気圧に伴う降水を反映していることを示した (Sugimoto *et al.*, 2013; Kitamura *et al.*, 2016)。また、亜熱帯循環系の海洋構造についての理解を深めるために、北太平洋亜熱帯循環域の北縁で形成される中央

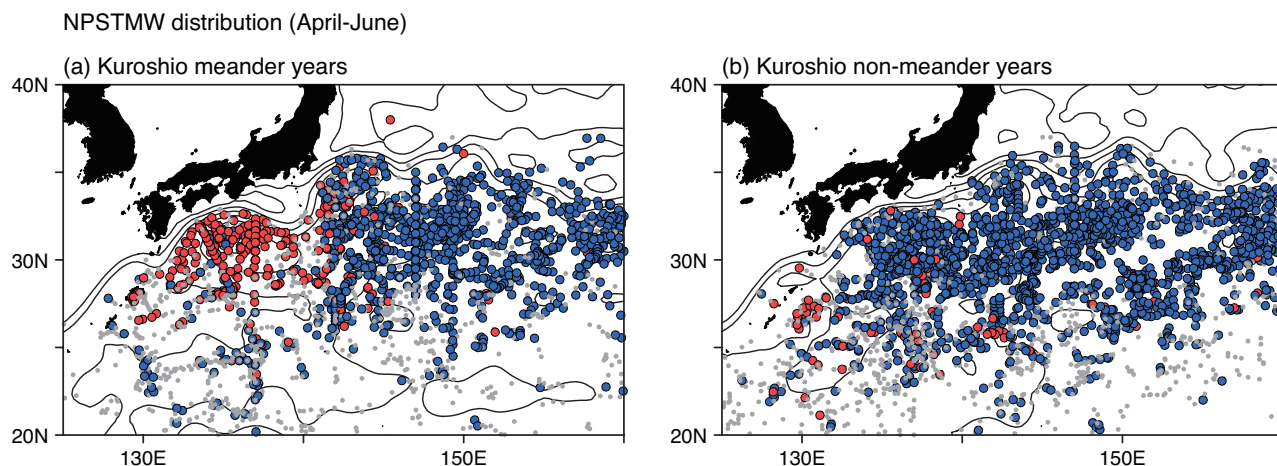


Fig. 6. Distribution of NPSTMW for (a) Kuroshio meander years and (b) non-meander years, based on temperature-salinity profiles. Red and blue circles indicate warm core ($\theta > 19^\circ\text{C}$) and cold core ($\theta < 19^\circ\text{C}$) NPSTMW, respectively. Contours indicate SSH climatology. Modified from Sugimoto and Hanawa (2014).

モード水にも着目して研究に取り組んできた。そのなかで、観測資料解析により、アリューシャン低気圧に起因した海洋表層冷却が、中央モード水形成域である北太平洋中央部の冬季混合層深度変動の主因であることを示している (Kawakami *et al.*, 2016)。また、Sugimoto *et al.* (2012) は、気象庁気象研究所共用海洋モデルの長期歴史実験結果を解析することで、亜表層に沈み込んだ中央モード水が亜熱帯循環系の三次元構造を変え、これが東部亜熱帯前線の強度に影響することを報告している。

5. 黒潮・黒潮続流の時間変動性研究

黒潮は低緯度から中緯度へ大量の熱を輸送しており、これにより日本南方及び東方海域は比較的高温である。冬には、この温暖な海上を大陸からの乾いた寒気が吹き込むため、黒潮および黒潮続流周辺域では地球上のどの海域よりも多くの熱が大気に向けて放出され、その結果、黒潮・黒潮続流は広範囲の気候に影響を及ぼしていると考えられている (Qiu, 2002)。この気候変動における黒潮の役割に迫るために、多くの研究で黒潮の流量が見積もられてきた (佐伯, 1987; Qiu and Joyce, 1992; Imawaki *et al.*, 2001; 石川ほか, 2003; 荻原ほか, 2005)。しかしながら、これらの黒潮流量には、黒潮再循環に伴う成分や黒潮と日本の間に分布する冷水渦の影響が十分に除

去されていないものもあった。そこで、Sugimoto *et al.* (2010) は、気象庁の東経 137 度線の観測資料を用いて、海面力学高度を基準に黒潮と黒潮反流の位置を同定し、黒潮反流の南限から観測データの北限までを対象に海面から 1000 dbar までの東西流速を積分することで黒潮再循環と冷水渦による影響を可能な限り低減し、1972 年から 2007 年までの 36 年間の黒潮流量時系列を作成した。得られた黒潮流量は約 10 年規模で増減していた。黒潮は風によって駆動される亜熱帯循環西岸境界流であるため、その流量も大規模大気循環の影響を受けている (Deser *et al.*, 1999; Yasuda and Kitamura, 2003)。この大気大循環は北太平洋中央部に位置するアリューシャン低気圧変動に代表され、これは強度変化を伴う東西位置変動と南北位置変動の 2 種類に分けられることが知られている (Sugimoto and Hanawa, 2009)。そこで、Sugimoto *et al.* (2010) は、長波近似の海洋 1.5 層モデル実験によって、2 種類のアリューシャン低気圧変動が黒潮流量に及ぼす影響を評価した。その結果、黒潮の正味流量の 10 年規模変動は、アリューシャン低気圧の南北位置変化に伴い励起された傾圧海洋ロスビー波が主因であることが明らかになった。

黒潮の流量変動に加えて、その流路の変動も海洋表層に大きな影響を及ぼす。例えば、黒潮の流路が変わることによって、北太平洋亜熱帯モード水の分布 (Bingham, 1992;

Suga and Hanawa, 1995b; Sugimoto and Hanawa, 2014) や北太平洋中層水の分布 (Sugimoto and Hanawa, 2011a) が変わることが報告されている。さらに、黒潮の流路は、海上風分布 (Nonaka and Xie, 2003) や温帯低気圧経路 (Nakamura *et al.*, 2012; Hayasaki *et al.*, 2013) などの大気場にも影響することが報告されている。黒潮の流路は、日本南岸で大きく3つに分類される (Kawabe 1995) (Fig. 7の(a)): (1) 四国・本州の南沿いの非大蛇行接岸流路, (2) 紀伊半島・遠州灘沖で大きく南下する大蛇行流路, (3) 伊豆諸島近海で南に小さく蛇行して八丈島の南を通過する非大蛇行離岸流路。また、黒潮の下流の黒潮続流は、安定した状態 (安定流路) と蛇行を繰り返す不安定な状態 (不安定流路) を交互にとることが知られている (Qiu and Chen, 2005; Qiu and Chen, 2010

など)。そこで、黒潮と黒潮続流の流路間関係を明らかにするために、Sugimoto and Hanawa (2012) では人工衛星海面高度計データを用いて研究に取り組んだ。解析の結果、黒潮が大蛇行および非大蛇行接岸流路をとる時期には黒潮続流の流路は安定流路をとり、その一方で非大蛇行離岸流路のときには黒潮続流の流路は不安定流路をとることが分かった (Fig. 7)。そして、この黒潮と黒潮続流の流路関係は、伊豆海嶺への黒潮の流入位置により説明できる可能性を示唆した。すなわち、大蛇行流路・非大蛇行接岸流路時に黒潮は八丈島北側の水深2000 mを超える深い海嶺の切れ目を通過するため下流の黒潮続流の振幅は大きくならず安定状態になり、一方で非大蛇行離岸流路時に黒潮は水深が500 mより浅い伊豆海嶺上を通過するため下流の黒潮続流は大きく蛇行し不安定状

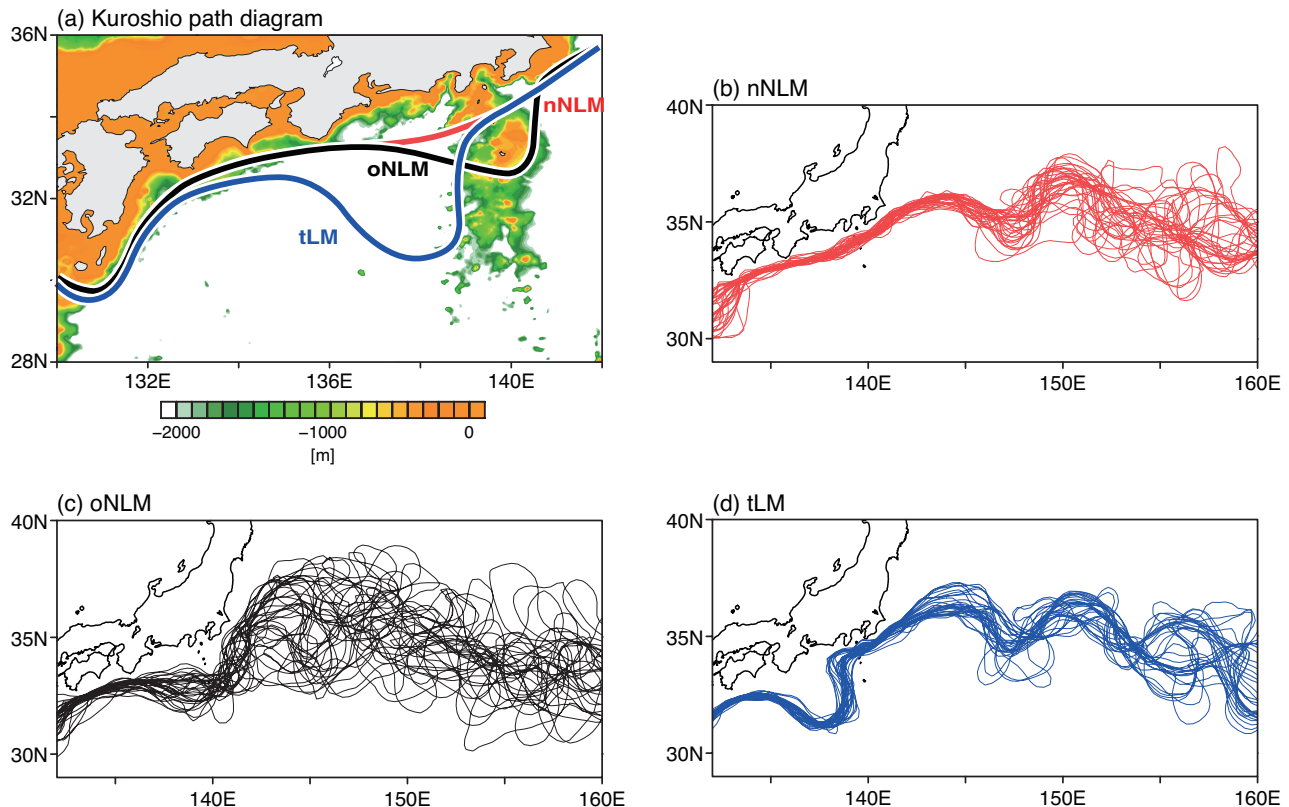


Fig. 7. (a) Three typical paths of the Kuroshio south of Japan: the typical large meander path (tLM), offshore non-large meander path (oNLM), and nearshore non-large meander path (nNLM). Shading denotes bathymetry feature. Lines indicate 35 paths randomly extracted from the Kuroshio/KE paths in (b) nNLM, (c) oNLM, and (d) tLM. Modified from Sugimoto and Hanawa (2012).

態になると考えられる。また、この仮説を支持する解釈を流路方程式 (Masuda, 1982; Masuda, 1989) の観点からも得ている (Sugimoto and Hanawa, 2012)。現在、同化データ解析からも同様の黒潮と黒潮統流の流路関係が抽出されており (Usui *et al.*, 2013)、近い将来に、黒潮と黒潮統流の流路関係の力学機構が解明されることが期待される。

黒潮統流の流路形態は安定流路と不安定流路に大別され、その形態変化は経年以上の周期で起こることが報告されている (Qiu and Chen, 2005; Qiu and Chen 2010 など)。しかしながら、既存の黒潮統流の流路変動特性に関する研究で用いられてきた人工衛星海面高度計データは 1992 年 10 月以降しか利用できないという解析期間の制約のため、その卓越変動周期を同定するまでに至っていない。そこで、筆者らは海面水温データを利用することでデータ期間の制約の克服を試みた。なぜなら黒潮統流は流路の北側に強い海面水温勾配を伴うため (Fig. 8 の (a))、高空間分解能の海面水温データを用いることで黒潮統流流路の推定が可能になると考えたためである。そこで、人工衛星海面水温データに基づいた黒潮統流の流路推定手法の開発に着手し、途中で多くの困難があったけれども大学院生 (瀬尾康晴さん) の忍耐と地道な努力が結実し、従来の時系列よりも 10 年以上も過去に遡った長期時系列の作成に成功した (Fig. 8 の (b)) (Seo *et al.*, 2014)。そして、この時系列により、黒潮統流流路形態の卓越変動周期が約 10 年であることが明らかになった (Fig. 8 の (c))。筆者らが作成した黒潮統流流路の長期時系列は、日本周辺での大気・海洋変動の理解の進展に貢献するに違いないと確信している。

6. 黒潮・親潮混合水域での大気海洋変動研究

大気海洋系の気候変動シナリオを構築するためには、大気の強制を受けた海洋の応答過程の把握に加えて、変化した海洋からのフィードバックによる大気の応答過程を把握することが必要不可欠である。一般に、中緯度域での大気強制に対する海洋表層の応答は観測資料からでも検出しやすく、現在までに多くの知見が得られている (Davis, 1976; Frankignoul, 1985; Wallace and Jiang, 1987; Iwasaka, *et al.* 1987; Nakamura, *et al.* 1997; Franki-

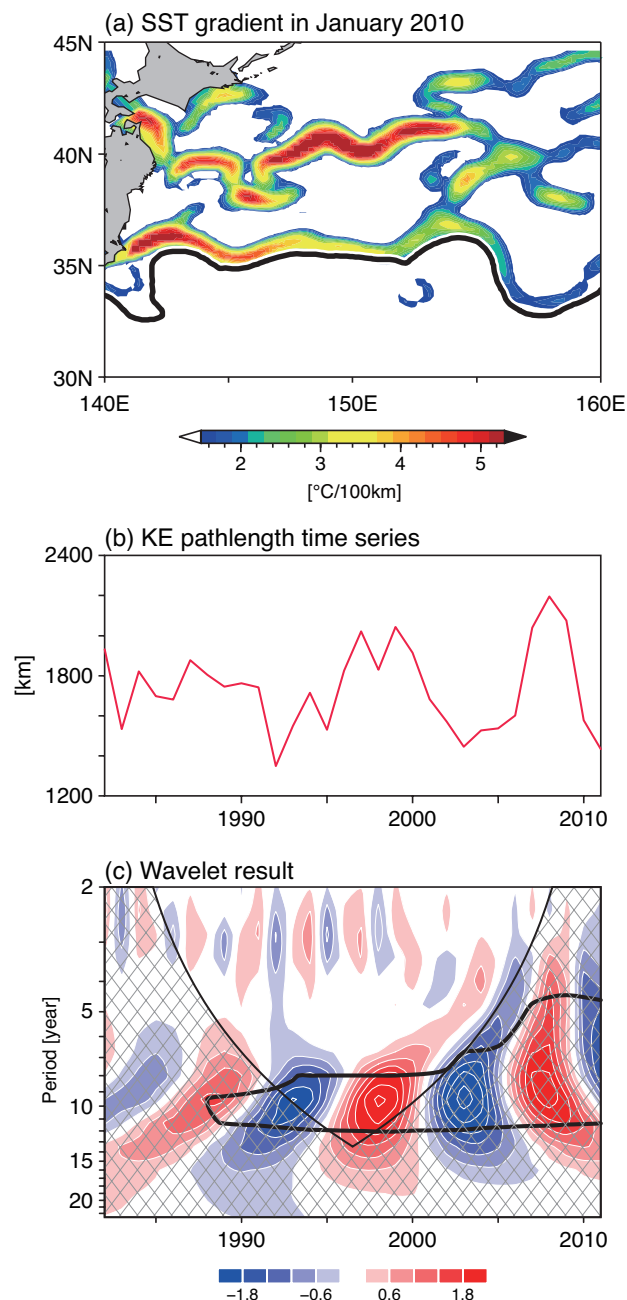


Fig. 8. (a) Horizontal SST gradient in January 2010. Thick black line denotes the KE axis. (b) Winter pathlength (km) of the KE northern boundary, of 142°E–155°E. (c) The Morlet wavelet transform coefficient for normalized time series of pathlength. Shading indicates the amplitude of the real part of the wavelet coefficient. Black line denotes that the local wavelet spectra are significant at the 1% significance level. Modified from Seo *et al.* (2014).

gnoul and Kestenare, 2002)。一方で、中緯度域での海洋から大気へのフィードバックは弱く、この信号の抽出は困難であるとされていた。そのような状況の中、1999年に打ち上げられた Quik Scatterometer (QuikSCAT) により高解像度の海上風データが利用可能になったことで、海洋が大気に与える影響が可視化され (Xie *et al.*, 2001; Nonaka and Xie, 2003; Tokinaga *et al.*, 2005; Shimada and Minobe, 2011)、海面近傍での大気海洋関係の理解が大きく進展した。そこで、筆者は、次なる挑戦課題は大気と海洋を結ぶ過程、すなわち大気海洋間の熱交換関係の解明だと考えるようになった。

日本東方の黒潮・親潮混合水域 (以下、混合水域) では、冬に膨大な熱が放出されており、その量と時間変動は非常に大きく、世界最大規模である (Fig. 9)。この混合水域から放出された熱は、上空を通過する温帯低気圧を始め多くの大気場に影響することが報告されている (Joyce *et al.*, 2009; Iwao *et al.*, 2015)。従来の研究では、中・高緯度海洋からの熱放出量は海上風などの大気強制により決まるとされていた (Davis, 1976; Frankignoul, 1985 など)。その一方で、混合水域に限っては海面水温が熱放出量決定の要因であるとも報告されていた (Hanawa *et al.*, 1995; Tanimoto *et al.*, 2003)。このように相反する主張が展開されていたのは、当時の研究で使用されていたデータセットの格子間隔が 200 km 程度であり、混合水域を十分に解像できないデータをもとに議論が行われていたためである。そのような状況の中、2000年代後半になり時空間分解能が高い海面乱流熱フラックスデータが相次いで開発された：(1) The second version of the Japanese Ocean Flux Data Sets with Use of Remote Sensing Observations (J-OFURO2: Tomita *et al.*, 2010; Kubota *et al.*, 2002), (2) Objectively Analyzed air-sea Heat Fluxes (OAFlux: Yu *et al.*, 2008), (3) SeaFlux (Clayson *et al.*, 2016; Curry *et al.*, 2004)。そこで、筆者は、これらの新たに開発された海面乱流熱フラックスデータを用いることで、混合水域における大気海洋間熱交換関係の実態把握を試みた。まず、Sugimoto (2014) は混合水域での熱放出の東西一様性について調べた。Fig. 9 の (c) に、混合水域の西部および東部での冬季乱流熱フラックスの時系列を示す。この図から、西部混合水域の乱流熱フラックスは 10 年規模で変動して

いることが分かる。例えば、2000年頃には冬季平均で 400 Wm^{-2} を超える多くの熱が放出されているが、その数年後の 2004 年頃には 300 Wm^{-2} 以下にまで減少して

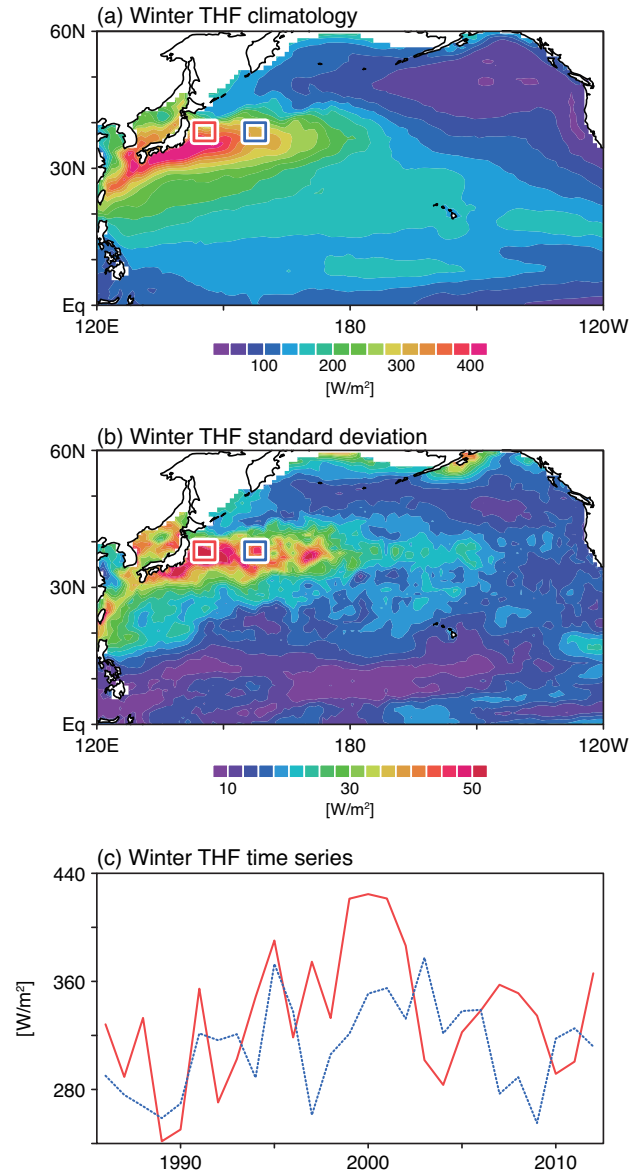


Fig. 9. (a) Climatological and (b) standard deviation map of winter upward turbulent heat flux (THF). (c) Red (solid) and blue (broken) lines denote winter THF time series in the western (red rectangle in (a)) and eastern Kuroshio-Oyashio Confluence region (blue rectangle in (a)), respectively. Modified from Sugimoto (2014).

いる。また、東部混合水域の乱流熱フラックスも長周期で変動しているが、その周期や極大・極小となる時期は西部混合水域とは明らかに異なっている。事実、両時系列の間に有意な相関関係は得られなかった。また、詳細は示さないが、回転経験的直交関数解析 (Rotated Empirical Orthogonal Function analysis) から混合水域の熱放出量変動の東西非一様性を支持する結論が得られた。そこで、東部・西部混合水域での熱放出量変動要因を同定するために、パルク公式に基づいた数値実験を実施した。実験の結果、西部・東部混合水域における乱流熱フラックス変動の主因は、海面水温であることが明らかになった (Sugimoto and Hanawa, 2011b; Sugimoto, 2014)。

では、西部・東部混合水域の海面水温変動の要因は何であろうか？ これを解き明かすために、Sugimoto and Hanawa (2011b) は人工衛星観測データなどを用いて解析的研究を実施した。西部混合水域の海面水温高温期・低温期における海面高度分布を Fig. 10 に示す。Fig. 10 の (a) は、高温期には、西部混合水域に直径 300 km 程度の高気圧性渦が複数個分布することを明瞭に示している。解析の結果、これら渦のいずれもが、混合水域の南縁を流れる黒潮続流から切離したものであり、この渦内の水温は渦外に比べて非常に高く、 3°C 以上も高温になる場合があることが判明した。一方で、低温期には、西部混合水域に暖水渦は分布していない (Fig. 10 の (b))。本稿では事例的な証拠しか提示していないが、他の時期でも同様の関係が得られている。以上の解析より、黒潮続流起源の暖水渦が西部混合水域での海面水温変動の主因であると結論づけた。なお、この暖水渦と海面水温の関係は、Argo フロートデータ (Kouketsu *et al.*, 2012) や船舶観測データ (Seo *et al.*, 2014) を駆使した解析からも支持されている。この黒潮続流起源の暖水渦は、黒潮続流が蛇行を繰り返す不安定な流路状態のときほど多く形成される (Sugimoto and Hanawa, 2011b; Sasaki and Minobe, 2015)。さらに、Sugimoto *et al.* (2014) は、暖水渦に起因した混合水域の高温化が、その北縁 (北緯 40 度近辺) に位置する亜寒帯海面水温前線 (Kida *et al.*, 2015) の強化を引き起こすことを指摘している。また、最近の研究では、西部混合水域の暖水渦に伴う表層成層の弱体化が冬季混合層の発達を可能にし、中央モード水の

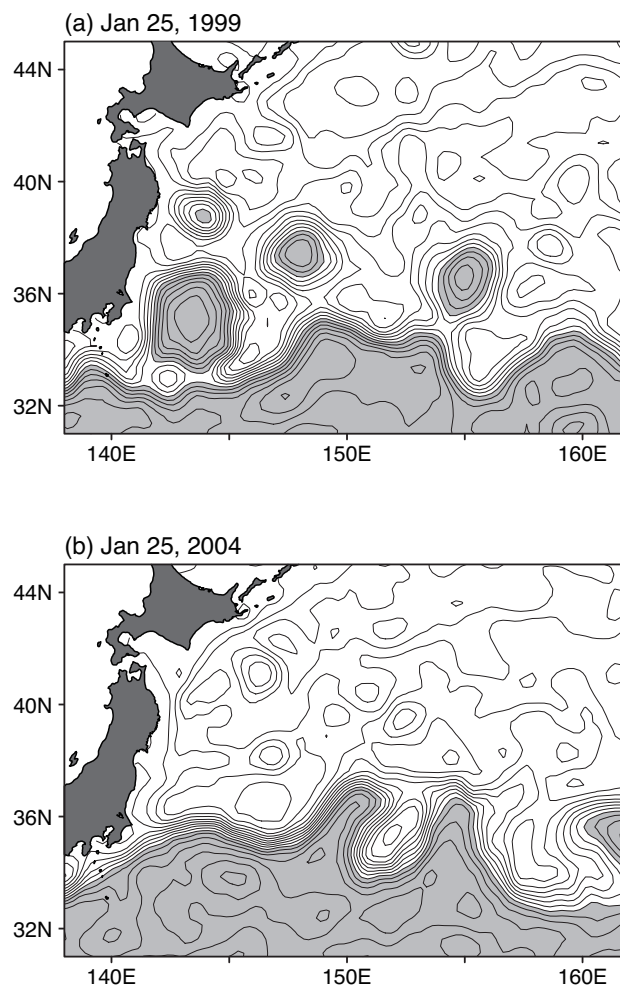


Fig. 10. Snap shots of satellite-derived SSH, at (a) 25 January 1999 and (b) 25 January 2004. Contour interval is 10 cm. Region where SSH exceeds 100 cm, is shaded.

形成量が増加すると報告されている (Kouketsu *et al.*, 2012; Oka *et al.*, 2012; Kawakami *et al.*, 2016 など)。一方で、東部混合水域には、黒潮続流起源の暖水渦はほとんど分布しない (Sugimoto and Hanawa, 2011b; Oka *et al.*, 2012)。そこで、Sugimoto (2014) は、海面流に着目して解析を行った。その結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11 の (a) に示す東部混合水域の海面水温が高温になる時期には、東経 150 度近辺で黒潮続流から北方に分岐した海流 (黒潮分岐流) が東部混合水域を横切る様子が観察される。一方、Fig. 11 の (b) に示す低温期には分岐流の

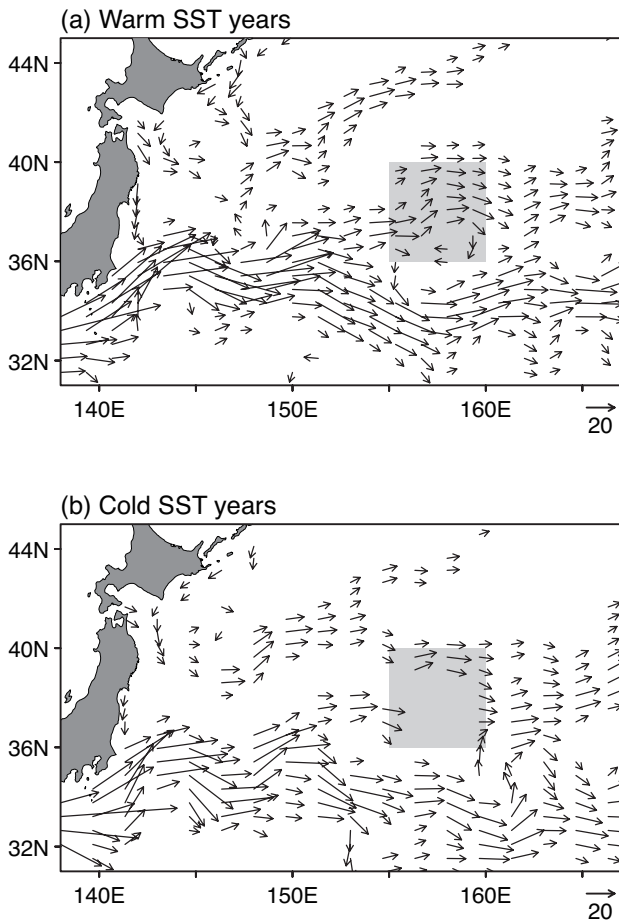


Fig. 11. Composite map of winter sea surface velocity vectors ($> 7 \text{ cm s}^{-1}$) in (a) warm and (b) cold SST years in the eastern Kuroshio-Oyashio Confluence region.

存在が不明瞭である。このことより、Sugimoto (2014) は、東部混合水域の海面水温変動には、黒潮分岐流の出現に伴う亜熱帯系水（高温・高塩水）の輸送の寄与が大きいことを指摘した。加えて、Argoフロートなどの海洋観測資料解析からも、黒潮分岐流が東部混合水域の海水特性に影響を及ぼすことを報告した。なお、このことはHosoda *et al.* (2015) でも報告されている。一連の研究により大気海洋系における黒潮分岐流の役割に注目が集まりつつあるが、その出現機構や流動構造については未解明の部分が多く、今後の研究の進捗が期待される。

筆者は、混合水域で実施した大気海洋間熱交換関係の

研究を日本海 (Sugimoto and Hirose, 2014) や南半球 (笠井, 2010) にも応用展開し、熱交換における海洋の役割の解明に取り組んできた。また、近年、日本やアメリカの研究グループが推定精度や時空間解像度を向上させた新しい海面熱フラックスデータの開発を進めており、その公開が予定されている。例えば、日本の研究グループが開発している J-OFURO は、version 3 の完成が間近に迫っている (富田ほか, 2016)。これら新世代海面熱フラックスデータの登場により、大気海洋関係の新たな描像が得られることを確信している。

7. おわりに

北太平洋亜熱帯域は、北太平洋亜熱帯モード水などの多くの水塊が分布し、その縁を黒潮や黒潮続流が流れており、非常に変動が大きくエネルギーに満ちた海域である。筆者は、この海域を対象に、北太平洋亜熱帯モード水を基軸として、大気の強制を受けた海洋表層変動の解明および変化した海洋からのフィードバックによる大気応答を把握するために解析的研究に取り組み、各過程の理解の進展に貢献してきたと考えている。しかしながら、依然、多くの課題が残されており、なかでも大気場への海洋の影響については定性的な理解にとどまっているのが現状である。現在、筆者は、混合水域に分布する暖水渦こそが、大気変動および気候変動における海洋の役割の解明への突破口になると考えており、領域大気モデルを用いた数値実験を開始したところである。新たに始めた数値実験と、これまで取り組んできた観測資料解析の併用による相補的・相乗的な研究を実践することで、大気海洋関係の理解の進展を加速させたいと考えている。

筆者が海洋学の世界に入ってから約15年の月日が経過した。この間に登場した人工衛星やArgoフロートのような自動観測プラットフォームにより海洋データは爆発的に増加した。また、1967年に始まった気象庁の東経137度線観測は今年(2016年)で50年を迎えている (中野, 2016)。このように膨大な海洋データに囲まれた環境、すなわち「宝の山」があったからこそ、筆者は今日まで興味の赴くままに研究を行うことができた。そして、いま、衛星観測・レーダー観測の高精度化が実現し、海洋大循環モデルの高解像度化・海洋データ同化システム

の高精度化が果たされ、さらには水中グライダーが縦横無尽に海を駆ける時代がすぐそこにまで来ているように感じる。データや計算資源に恵まれたなかで研究を行える幸運に感謝し、今後も日々の研究活動に邁進し、海洋学の発展に貢献できるよう精進することをここに誓う。

謝 辞

このたび日本海洋学会岡田賞の栄誉を賜り、まことに光栄に存じます。ご推薦を頂きました先生方、選考の任に当たられました方々に厚く御礼申し上げます。そして、様々な機会を通じてご助言・ご激励をいただいた学会員の皆様に深く御礼申し上げます。

全ての始まりは、恩師 花輪公雄先生との出会いにありました。私がこのような賞をいただけたのは、研究者としての私を形作ってくださった花輪先生のご指導のおかげに他なりません。そして、花輪先生の研究や教育への姿勢、情熱、考え方のいずれもが私の礎になっております。今日まで私を導いてくださったことに厚く感謝申し上げます。

そして、東北大学海洋物理学グループの歴代のそして現在の教員である須賀利雄先生、川村宏先生、木津昭一先生、境田太樹先生、川合義美博士、細田皇太郎博士、島田照久先生には様々な機会を通じて示唆に富むご助言をいただきました。なかでも、須賀利雄先生からは、水塊に関する膨大な知識に基づいた海洋観を常日頃の会話を通してご教授いただけたことで多くの研究の着想を得ることができました。深く感謝申し上げます。

私は、学生時代に本当に素晴らしい先輩方に恵まれました。上原裕樹博士、額額佳奈子博士、長谷川拓也博士、前野さやか博士、堀井孝憲博士、稲津大祐先生を始めとした諸先輩方からは研究者としての姿勢はもちろんですが、研究生活・人生の楽しみ方を教えていただきました。そして、優秀な同輩・後輩の存在が、私にとって大きな活力になりました。皆様に感謝申し上げます。

共同研究者の方々のご指導とご助力により、多くの研究を実施することができました。深く感謝申し上げます。私が参加させていただいた研究プロジェクトや研究集会を通じてなされた研鑽の日々がこのたびの受賞につながっています。ここに全ての方のお名前をあげて御礼を

申し上げます。皆様方にはこの場を借りて心より感謝申し上げます。

本稿を通じて、データがあることの有り難さを改めて感じております。データの採取・管理でご尽力されている研究者・技術者などの多くの方々に深い尊敬を表させていただきます。

あらためて申し上げます。このたび、日本海洋学会岡田賞を受賞できたことは身に余る光栄に存じますとともに、深く謙虚に受け止めております。海洋学会には素晴らしい優秀な研究者が多くいる中で、私が受賞できたことは望外の喜びであるとともに身に余る幸運であると存じます。

稿を閉じるにあたり私生活の面でいつも笑顔で支えてくれた妻幸代、娘彩佳、そして両親・家族にこの場を借りて感謝の意を表したいと思います。

References

- Alexander, M. A., and C. Deser (1995): A mechanism for the recurrence of wintertime midlatitude SST anomalies. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 122–137.
- Alexander, M. A., C. Deser, and M. S. Timlin (1999): The reemergence of SST anomalies in the North Pacific Ocean. *J. Climate*, **12**, 2419–2433.
- Alexander, M. A., M. S. Timlin, and J. D. Scott (2001): Winter-to-winter recurrence of sea surface temperature, salinity and mixed layer depth anomalies. *Progress in Oceanography*, **49**, 41–61.
- Aoki, Y., T. Suga, and K. Hanawa (2002): Subsurface subtropical fronts of the North Pacific as inherent boundaries in the ventilated thermocline. *J. Phys. Oceanogr.*, **32**, 2299–2311.
- Beamish, R. J., C. E. Neville, and A. J. Cass (1997): Production of Fraser River sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to decadal-scale changes in the climate and the ocean. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **54**, 543–554.
- Bingham, F. M. (1992): Formation and spreading of subtropical mode water in the North Pacific. *J. Geophys. Res.*, **97**, 11177–11189.
- Clayson, C. A., J. B. Roberts, and A. Bogdanoff (2016): SeaFlux Version 1: a new satellite-based ocean-atmosphere turbulent flux dataset. *Int. J. Climatol.*, in revision.
- Curry, J. A., A. Bentamy, M. A. Bourassa, D. Bourras, E. F. Bradley, M. Brunke, S. Castro, S. H. Chou, C. A. Clayson, W. J. Emery, L. Eymard, C. W. Cairall, M. Kubota, B. Lin, W. Perrie, R. A. Reeder, I. A. Renfrew, W. B. Rossow, J. Schulz, S. R. Smith, P. J. Webster, G. A. Wick, and X. Zeng (2004): SeaFlux. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **85**, 409–424.
- Davis, R. E. (1976): Predictability of sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, **6**, 249–266.
- Deser, C., M. A. Alexander, and M. S. Timlin (1999): Evidence for a

- wind-driven intensification of the Kuroshio Current Extension from the 1970s to the 1980s. *J. Climate*, **12**, 1697–1706.
- Deser, C., M. A. Alexander, and M. S. Timlin (2003): Understanding the persistence of sea surface temperature anomalies in midlatitudes. *J. Climate*, **16**, 57–72.
- Ebbesmeyer, C. C., and Coauthors (1991): 1976 step in the Pacific climate: Forty environmental changes between 1968–75 and 1977–84. *Proc. Seventh Annual Pacific Climate Workshop*, Pacific Grove, CA, California Dept. of Water Resources, Interagency Ecology Studies Program Rep, **26**, 115–126.
- Frankignoul, C. (1985): Sea surface temperature anomalies, planetary waves and air-sea feedback in the middle latitudes. *Rev. Geophys.*, **23**, 357–390.
- Frankignoul, C., and E. Kestenare (2002): The surface heat flux feedback. Part I: Estimates from observations in the Atlantic and the North Pacific. *Clim. Dyn.*, **19**, 633–647.
- Gu, D. F., and S. G. H. Philander (1997): Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics. *Science*, **275**, 805–807.
- Hanawa, K. (1987): Interannual variations of the wintertime outcrop area of Subtropical Mode Water in the western North Pacific Ocean. *Atmos.–Ocean*, **25**, 358–374.
- 花輪公雄 (1996): 新用語解説. 約10五～数十年 (decadal-interdecadal) スケール変動. 天気, **43**, 43–45.
- Hanawa, K., and I. Hoshino (1988): Temperature structure and mixed layer in the Kuroshio region over the Izu Ridge. *J. Mar. Res.*, **46**, 683–700.
- Hanawa, K., and J. Kamada (2001): Variability of core layer temperature (CLT) of the North Pacific subtropical mode water. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 2229–2232.
- Hanawa, K., R. Sannomiya, and Y. Tanimoto (1995): Static relationship between anomalies of SSTs and air-sea heat fluxes in the North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 757–763.
- Hanawa, K., and S. Sugimoto (2004): ‘Reemergence’ areas of winter sea surface temperature anomalies in the world’s oceans. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L10303, doi:10.1029/2004GL019904.
- Hanawa, K., and L. D. Talley (2001): Mode waters. *Ocean Circulation and Climate*, G. Siedler, J. Church, and W. J. Gould, Eds., Academic Press, 373–386.
- Hayasaki, M., R. Kawamura, M. Mori, and M. Watanabe (2013): Response of extratropical cyclone activity to the Kuroshio large meander in northern winter. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2851–2855.
- Hosoda, S., M. Nonaka, Y. Sasaï, and H. Sasaki (2015): Early summertime interannual variability in surface and subsurface temperature in the North Pacific. *J. Oceanogr.*, **71**, 557–573.
- Imawaki, S., H. Uchida, H. Ichikawa, M. Fukasawa, S. Umatani, and the ASUKA Group (2001): Satellite altimeter monitoring the Kuroshio transport south of Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 17–20.
- Ishi, Y., and K. Hanawa (2005): Large-scale variabilities of wintertime wind stress curl field in the North Pacific and their relation to atmospheric teleconnection patterns. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L10607, doi:10.1029/2004GL022330.
- 石川孝一, 高槻靖, 白石昇司, 椿修二, 中舘明, 宮尾孝, 北野昌幸, 井上博敏, 久保直, 西澤純一 (2003): 気象庁の定線に見られる海洋変動とその要因. 測候時報, **70**, 1–34.
- Iwao, K., M. Inatsu, and M. Kimoto (2015): Recent changes in explosively developing extratropical cyclones over the winter Northwestern Pacific. *J. Climate*, **25**, 7282–7296.
- Iwasaka, N., K. Hanawa, and Y. Toba (1987): Analysis of SST anomalies in the North Pacific and their relation to 500-mb height anomalies over the Northern Hemisphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 103–114.
- Joyce, T. M., Y.-O. Kwon, and L. Yu (2009): On the relationship between synoptic wintertime atmospheric variability and path shifts in the Gulf Stream and the Kuroshio Extension. *J. Climate*, **22**, 3177–3192.
- Kako, S. I., and M. Kubota (2007): Variability of mixed layer depth in Kuroshio/Oyashio Extension region: 2005–2006. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L11612, doi:10.1029/2007GL030362.
- 笠井千愛 (2010): 南半球における冬季海面水温変動と大気テレコネクションパターンおよび乱流熱フラックス変動との関係解明. 東北大学大学院理学研究科修士論文, 92pp.
- Kawabe, M. (1995): Variations of current path, velocity, and volume transport of the Kuroshio in relation with the large meander. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 3103–3117.
- Kawakami, Y., S. Sugimoto, and T. Suga (2016): Inter-annual zonal shift of the formation region of the lighter variety of the North Pacific Central Mode Water. *J. Oceanogr.*, **72**, 225–234.
- Kida, S., H. Mitsudera, S. Aoki, X. Guo, S.-I. 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**, 469–497.
- Kitamura, T., T. Nakano, and S. Sugimoto (2016): Decadal variations in mixed layer salinity in the Kuroshio Extension recirculation gyre region: Influence of precipitation during the warm season. *J. Oceanogr.*, **72**, 167–175.
- Kobashi, F., and A. Kubokawa (2012): Review on North Pacific Subtropical Countercurrents and Subtropical Fronts: role of mode waters in ocean circulation and climate. *J. Oceanogr.*, **68**, 21–43.
- Kobashi, F., H. Mitsudera, and S.-P. Xie (2006): Three subtropical fronts in the North Pacific: observational evidence for mode water-induced subsurface frontogenesis. *J. Geophys. Res.*, **111**, C09033, doi:10.1029/2006JC003479.
- Kouketsu, S., H. Tomita, E. Oka, S. Hosoda, T. Kobayashi, and K. Sato (2012): The role of meso-scale eddies in mixed layer deepening and mode water formation in the western North Pacific. *J. Oceanogr.*, **68**, 63–77.
- Kubokawa, A. (1997): A two-level model of subtropical gyre and subtropical countercurrent. *J. Oceanogr.*, **53**, 231–244.
- Kubokawa, A. (1999): Ventilated thermocline strongly affected by a deep mixed layer: a theory for subtropical countercurrent. *J. Phys. Oceanogr.*, **29**, 1314–1333.
- Kubota, M., N. Iwasaka, S. Kizu, M. Konda, and K. Kutsuwada (2002): Japanese ocean flux data sets with use of remote sensing observations (J-OFURO). *J. Oceanogr.*, **58**, 213–225.
- Latif, M., and T. P. Barnett (1994): Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, **266**, 634–637.
- Latif, M., and T. P. Barnett (1996): Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability. *J. Climate*, **9**, 2407–2423.

- Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace, and R. Francis (1997): A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1069–1079.
- Masuda, A. (1982): An interpretation of the bimodal character of the stable Kuroshio path. *Deep-Sea Res.*, **29**, 471–484.
- Masuda, A. (1989): A laboratory experiment on the Kuroshio meander. *Deep-Sea Res.*, **36**, 1067–1081.
- Masuzawa, J. (1969): Subtropical mode water. *Deep-Sea Res.*, **16**, 463–472.
- Masuzawa, J. (1972): Water characteristics of the North Pacific Central region. In: *Kuroshio – Its physical aspects* –, eds., H. Stommel and K. Yoshida, Univ. Tokyo Press, Tokyo, 95–127.
- Minobe, S. (1997): A 50-70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 683–686.
- Minobe, S. (1999): Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climate regime shift. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 855–858.
- Minobe, S. (2000): Spatio-temporal structure of the pentadecadal variability over the North Pacific. *Progress in Oceanography*, **47**, 381–408.
- Nakamura, H. (1996): A pycnostad on the bottom of the ventilated portion in the central subtropical North Pacific: Its distribution and formation. *J. Oceanogr.*, **52**, 171–188.
- Nakamura, H., A. Nishina, and S. Minobe (2012): Response of storm tracks to bimodal Kuroshio path states south of Japan. *J. Climate*, **25**, 7772–7779.
- Nakamura, H., G. Lin, and T. Yamagata (1997): Decadal climate variability in the North Pacific during the recent decades. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2215–2225.
- 中野俊也 (2016): 50年を迎えた気象庁東経137度線の観測. *JOS newsletter*, **5**, 1–2.
- Namias, J., and R. M. Born (1970): Temporal coherence in North Pacific sea-surface temperature patterns. *J. Geophys. Res.*, **75**, 5952–5955.
- Namias, J., and R. M. Born (1974): Further studies of temporal coherence in North Pacific sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, **79**, 797–798.
- Newman, M., G. P. Compo, and M. A. Alexander (2003): ENSO-forced variability of the Pacific Decadal Oscillation. *J. Climate*, **16**, 3853–3877.
- Noh, Y., and H. J. Kim (1999): Simulation of temperature and turbulence structure of the oceanic boundary layer with the improved near-surface process. *J. Geophys. Res.*, **104**, 15621–15634.
- 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.
- 荻原裕之, 曾我大三, 高槻靖 (2005): 東経137度線での亜熱帯循環の長期変動. *測候時報*, **72**, 27–33.
- Oka, E., and B. Qiu (2012): Progress of North Pacific Mode Water research in the past decade. *J. Oceanogr.*, **68**, 5–20.
- Oka, E., B. Qiu, S. Kouketsu, K. Uehara, and T. Suga (2012): Decadal seesaw of the central and subtropical mode water formation associated with the Kuroshio Extension variability. *J. Oceanogr.*, **68**, 355–360.
- Oka, E., K. Uehara, T. Nakano, T. Suga, D. Yanagimoto, S. Kouketsu, S. Itoh, S. Katsura, and L. D. Talley (2014): Synoptic observation of Central Mode Water in its formation region in spring 2003. *J. Oceanogr.*, **70**, 521–534.
- Overland, J. E., J. M. Adams, and N. A. Bond (1999): Decadal variability of the Aleutian Low and its relation to high-latitude circulation. *J. Climate*, **12**, 1542–1548.
- Polovina, J. J., G. T. Mitchum, and G. T. Evans (1995): Decadal and basin-scale variation in mixed layer depth and the impact on biological production in the Central and North Pacific, 1960–1988. *Deep-Sea Res.*, **42**, 1701–1716.
- Qiu, B. (2002): The Kuroshio Extension system: Its large-scale variability and role in the midlatitude ocean-atmosphere interaction. *J. Oceanogr.*, **58**, 57–75.
- Qiu, B., and S. Chen (2005): Variability of the Kuroshio Extension jet, recirculation gyre, and mesoscale eddies on decadal timescales. *J. Phys. Oceanogr.*, **35**, 2090–2103.
- Qiu, B., and S. Chen (2006): Decadal variability in the formation of the North Pacific Subtropical Mode Water: Oceanic versus atmospheric control. *J. Phys. Oceanogr.*, **36**, 1365–1380.
- Qiu, B., and S. Chen (2010): Eddy-mean flow interaction in the decadal modulating Kuroshio Extension system. *Deep-Sea Res.*, **57**, 1098–1110.
- Qiu, B., S. Chen, and P. Hacker (2007): Effect of mesoscale eddies on subtropical mode water variability from the Kuroshio Extension System Study (KESS). *J. Phys. Oceanogr.*, **37**, 982–1000.
- Qiu, B., and T. M. Joyce (1992): Interannual variability in the mid- and low-latitude western North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **22**, 1062–1079.
- 佐伯理朗 (1987): 北西太平洋の亜熱帯循環の経年変動. *海と空*, **63**, 113–125.
- Sasaki, Y. N., and S. Minobe (2015): Climatological mean features and interannual to decadal variability of ring formations in the Kuroshio Extension region. *J. Oceanogr.*, **71**, 499–509.
- Seo, Y., S. Sugimoto, and K. Hanawa (2014): Long-term variations of the Kuroshio Extension path in winter: Meridional movement and path state change. *J. Climate*, **27**, 5929–5940.
- Shimada, T., and S. Minobe (2011): Global analysis of the pressure adjustment mechanism over sea surface temperature fronts using AIRS/Aqua data. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L06704, doi:10.1029/2010GL046625.
- Suga, T., and K. Hanawa (1990): The mixed-layer climatology in the northwestern part of the North Pacific Subtropical Gyre and the formation area of subtropical mode water. *J. Mar. Res.*, **48**, 543–566.
- Suga, T., and K. Hanawa (1995a): The subtropical mode water circulation in the North Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 958–970.
- Suga, T., and K. Hanawa (1995b): Interannual variations of North Pacific subtropical mode water in the 137°E section. *J. Phys. Oceanogr.*, **25**, 1012–1017.
- Suga, T., Y. Takei, and K. Hanawa (1997): Thermostat distribution in the North Pacific subtropical gyre: the central mode water and the subtropical mode water. *J. Phys. Oceanogr.*, **27**, 140–152.
- Sugimoto, S. (2014): Influence of SST anomalies on winter turbulent heat fluxes in the eastern Kuroshio-Oyashio Confluence region. *J. Climate*, **27**, 9349–9358.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2005a): Remote reemergence areas of winter sea surface temperature anomalies in the North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L01606, doi:10.1029/2004GL021410.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2005b): Why does reemergence of winter sea surface temperature anomalies not occur in eastern mode water areas? *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L15608, doi:10.1029/2005GL022968.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2007a): Impact of remote reemergence of the subtropical mode water on winter SST variation in the central

- North Pacific. *J. Climate*, **20**, 173–186.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2007b): Further evidence for non-reemergence of winter SST anomalies in the North Pacific eastern subtropical mode water area. *J. Oceanogr.*, **63**, 625–635.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2009): Decadal and interdecadal variations of the Aleutian Low activity and their relation to upper oceanic variations over the North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 601–614.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2010a): Impact of Aleutian Low activity on the STMW formation in the Kuroshio recirculation gyre region. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L03606, doi:10.1029/2009GL041795.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2010b): The wintertime wind stress curl field in the North Atlantic and their relation to atmospheric teleconnection patterns. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1687–1694.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2011a): Quasi-decadal modulations of NPIW area in the cross section along the 137° E meridian: Impact of the Aleutian Low activity. *J. Oceanogr.*, **67**, 519–531.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2011b): Roles of SST anomalies on the wintertime turbulent heat fluxes in the Kuroshio-Oyashio confluence region: Influences of warm eddies detached from the Kuroshio Extension. *J. Climate*, **24**, 6551–6561.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2012): Relationship between the path of the Kuroshio in the south of Japan and the path of the Kuroshio Extension in the east. *J. Oceanogr.*, **68**, 219–225.
- Sugimoto, S., and K. Hanawa (2014): Influence of Kuroshio path variation south of Japan on formation of subtropical mode water. *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 1065–1077.
- Sugimoto, S., K. Hanawa, K. Narikiyo, M. Fujimori, and T. Suga (2010): Temporal variations of the net Kuroshio transport and its relation to atmospheric variations. *J. Oceanogr.*, **66**, 611–619.
- Sugimoto, S., K. Hanawa, T. Yasuda, and G. Yamanaka (2012): Low-frequency variations of the Eastern Subtropical Front in the North Pacific in an eddy-resolving ocean general circulation model: Roles of central mode water in the formation and maintenance. *J. Oceanogr.*, **68**, 521–531.
- Sugimoto, S., and N. Hirose (2014): Variations in latent heat flux over the eastern Japan Sea in December. *SOLA*, **10**, 1–4.
- Sugimoto, S., and S.-I. Kako (2016): Decadal variations in wintertime mixed layer depth south of the Kuroshio Extension and its influence on winter mixed layer temperature. *J. Climate*, **29**, 1237–1252.
- Sugimoto, S., N. Kobayashi, and K. Hanawa (2014): Quasi-decadal variation in intensity of the western part of the winter subarctic SST front in the western North Pacific: The influence of Kuroshio Extension path state. *J. Phys. Oceanogr.*, **44**, 2751–2760.
- Sugimoto, S., N. Takahashi, and K. Hanawa (2013): Marked freshening of North Pacific subtropical mode water in 2009 and 2010: Influence of freshwater supply in the 2008 warm season. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 3102–3105.
- 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.*, **108**, 3304, doi:10.1029/2002JC001750.
- Timlin, M. S., M. A. Alexander, and C. Deser (2002): On the reemergence of North Atlantic SST anomalies. *J. Climate*, **15**, 2707–2712.
- Tokinaga, H., Y. Tanimoto, and S.-P. Xie (2005): SST-induced surface wind variations over the Brazil–Malvinas confluence: Satellite and in situ observations. *J. Climate*, **18**, 3470–3482.
- Tomita, H., M. Kubota, M. F. Cronin, S. Iwasaki, M. Konda, and H. Ichikawa (2010): An assessment of surface heat fluxes from J-OFURO2 at the KEO and JKEO sites. *J. Geophys. Res.*, **115**, C03018, doi:10.1029/2009JC005545.
- 富田裕之, 久保田雅久, 轡田邦夫, 加古真一郎, 日原勉, 亀田傑 (2016): 新たな海洋観測時代の衛星海面フラックスデータセット: J-OFURO3, 日本海洋学会 2016 年度春季大会.
- Trenberth, K. E., and J. W. Hurrell (1994): Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Clim. Dyn.*, **9**, 303–319.
- Usui, N., H. Tsujino, H. Nakano, and S. Matsumoto (2013): Long-term variability of the Kuroshio path south of Japan. *J. Oceanogr.*, **69**, 647–670.
- Wallace, J. M., and Q.-R. Jiang (1987): On the observed structure of the interannual variability of the atmosphere/ocean climate system. *Atmospheric and Oceanic Variability*, H. Cattle, Ed., Royal Meteorological Society, 17–43.
- Watanabe, M., and M. Kimoto (2000): On the persistence of decadal SST anomalies in the North Atlantic. *J. Climate*, **13**, 3017–3028.
- Xie, S.-P., W. T. Liu, Q. Y. Liu, and M. Nonaka (2001): Far-reaching effects of the Hawaiian islands on the Pacific Ocean-atmosphere system. *Science*, **292**, 2057–2060.
- Yamanaka, G., H. Ishizaki, M. Hirabara, and I. Ishikawa (2008): Decadal variability of the subtropical front of the western North Pacific in an eddy-resolving ocean general circulation model. *J. Geophys. Res.*, **113**, C12027, doi:10.1029/2008JC005002.
- Yasuda, I., K. Okuda, and Y. Shimizu (1996): Distribution and modification of the North Pacific Intermediate Water in the Kuroshio-Oyashio Interfrontal zone. *J. Phys. Oceanogr.*, **26**, 448–465.
- Yasuda, T., and K. Hanawa (1999): Composite analysis of North Pacific subtropical mode water properties with respect to the strength of the wintertime East Asian monsoon. *J. Oceanogr.*, **55**, 531–541.
- Yasuda, T., and Y. Kitamura (2003): Long-term variability of North Pacific subtropical mode water in response to spin-up of the subtropical gyre. *J. Oceanogr.*, **59**, 279–290.
- Yasuda, T., and K. Sakurai (2006): Interdecadal variability of the sea surface height around Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L01605, doi:10.1029/2005GL024920.
- Yu, L., X. Jin, and R. A. Weller (2008): Multidecadal global flux datasets from the objectively analyzed air-sea fluxes (OAFlux) project: Latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables. Woods Hole Oceanographic Institution OAFlux Project Tech. Rep. OA-2008-01, 64 pp.
- Zhang, R.-H., and S. Levitus (1997): Structure and cycle of decadal variability of upper ocean temperature in the North Pacific. *J. Climate*, **10**, 710–727.

Analytical studies on variabilities in the surface ocean in the western part of the North Pacific subtropics

Shusaku Sugimoto*

Abstract

Large-scale circulations such as the Kuroshio flows and water masses characterized by specific temperatures and salinities, exist in the surface ocean. The author focuses his study on surface ocean variability in the western part of the North Pacific subtropics and its role in climate, using observational datasets, model outputs, and simple experiments. It revealed (1) the spatial structure of the reemergence mechanism of sea surface temperature anomalies; (2) the influence of the oceanic Rossby waves formed as a result of the decadal-scale meridional movement of the Aleutian Low in the central North Pacific on the formation of the North Pacific Subtropical Mode Water, Kuroshio transport south of Japan, and North Pacific Intermediate Water distribution south of Japan; (3) the temporal variability in the path state of the Kuroshio Extension; and (4) the roles of the surface ocean in the heat exchange between the ocean and atmosphere in the Kuroshio-Oyashio confluence region. In this article, the author reviews and discusses these results.

Key words : North Pacific Subtropical Mode Water, Kuroshio Extension path state, Decadal variability, Air-sea interaction, Air-sea heat exchange

(Corresponding author's e-mail address : sugimoto@pol.gp.tohoku.ac.jp)

(Received 14 November 2016 ; accepted 12 January 2017)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2017)

* Frontier Research Institute for Interdisciplinary Sciences, Tohoku University
6-3 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8578, Japan
TEL: +81227956529 FAX: +81227956530
e-mail: sugimoto@pol.gp.tohoku.ac.jp