

— 2017年度日本海洋学会岡田賞受賞記念論文 —

熱帯と沿岸域の湧昇現象の変動とその予測の研究*

土井 威志†

要 旨

熱帯と沿岸域における湧昇現象の変動は、海洋物理の重要な研究対象であるだけでなく、水産や気候の変動にも強く影響するため、豊かな応用可能性のある大変魅力的な研究対象である。特に、湧昇と気候変動モードの相互関係の理解を深め、その変動の予測に成功すれば、我々の日々の生活の安全・安心に直接的に貢献できる。本稿では、このような湧昇現象の研究の中で、今回の受賞の対象となった著者らの研究、1) 熱帯大西洋の気候変動現象と湧昇ドーム現象、2) 沿岸ニーニョ現象の予測研究、3) インド洋ダイポールモード現象の予測研究、について解説する。

キーワード：湧昇ドーム、大西洋ニーニョ、大西洋南北モード、ニンガルーニーニョ、インド洋ダイポールモード

1. はじめに

「風が吹いたら桶屋が儲かる」と言った諺がある。風が吹いたら土埃が立ち、それが目に入って盲人が増えて、それから…、などと連想を重ねていって、最後には「桶屋が儲かる」という結論につなげる江戸時代に流行した連想ゲームのようなものである。今回の受賞の対象となった「海洋の湧昇現象」の研究についても同じような魅力があるように思える。海洋の湧昇現象の研究は、海洋物理の根底でありながらも、その研究成果が、水産や

気候の変動、更には我々の生活に深く関わる漁業、農業、感染症問題に至るまで、豊かな応用可能性がある。

海上に風が吹くと、海の深いところから浅いところに水が湧く。その研究のパイオニアは、Ekman 博士である (Ekman, 1905)。すなわち、風が吹くと、地球の自転の効果で、北半球だと直角右向きに水が輸送される。これは Ekman Drift と呼ばれる。この Ekman Drift の発散場では、その補償流として亜表層から水が湧くことになる。この現象を日本語では「湧昇」、英語では「upwelling」と呼ぶ。この理論を発展させ、沿岸湧昇や赤道湧昇の理論を確立したのが、吉田博士である (Yoshida, 1955, 1959)。すなわち、岸に沿って風が吹き、Ekman Drift によって水が沖合に輸送されると、その水平発散を補償する形で沿岸湧昇が起きる。また、赤道域で貿易風が吹くと、北半球では北に、南半球では南に水が輸送され、その水平発散を補償する形で赤道湧昇が起きる。同様に、北半球では低気圧性、すなわち反時計回りの風が吹くと、

* 2017年11月29日受領；2018年1月22日受理

著作権：日本海洋学会，2018

† 国立研究開発法人海洋研究開発機構 アプリケーションラボ
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173-25
TEL：045-778-5517 FAX：045-778-5707
e-mail：takeshi.doi@jamstec.go.jp

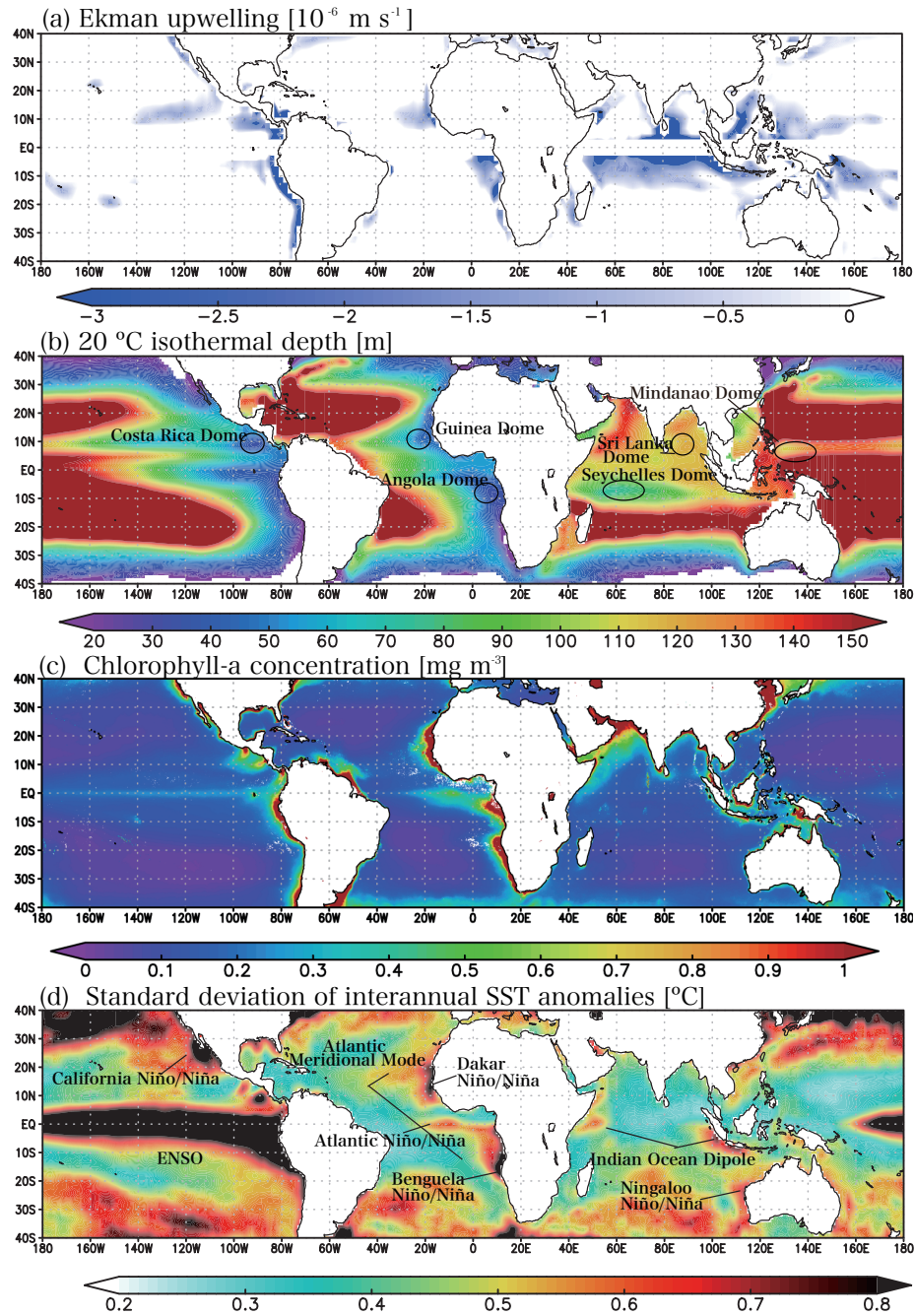


Fig. 1. (a): Annual mean of Ekman upwelling (10^{-6} m s^{-1}) calculated by wind stress of the NCEP/NCAR reanalysis data (Kalnay *et al.*, 1996). The negative values show upwelling. The average period is 1997–2010. The values in the 2° N – 2° S band are masked out. (b): Same as (a) except for 20 °C isothermal depth (m) from the EN4 gridded observational data (Good *et al.*, 2013). Some of oceanic thermal upwelling domes are also shown. (c): Same as (a) except for chlorophyll concentration (mg m^{-3}) from the SeaWiFS satellite data (Hu *et al.*, 2012). (d): Same as (a) except for the standard deviation of the sea surface temperature (SST) anomalies ($^{\circ}\text{C}$) from the NOAA/OISST observational data (Reynolds *et al.*, 2002). Some of the large value regions are associated with the year-to-year climate variations.

Ekman Drift により表層の水は渦の外に輸送され、渦の中央付近で亜表層から表層に水が湧き上がることになる。水温の鉛直構造を見ると、等温線がドームのように押し上がって見えるので、湧昇ドーム、あるいは単にドーム現象とも呼ばれる。

再解析データの海上風から計算した Ekman Drift の発散場（つまり湧昇域）と、温度躍層の良い指標である 20°C の等温深度の分布を見てみると (Fig. 1 の (a) と (b)), 湧昇域と温度躍層が浅い領域が、比較的良好に対応しているのがわかる。特に熱帯域で発見されている湧昇ドーム現象は、それぞれの地域にちなんだ名前がついており、北太平洋東部のコスタリカドーム、北大西洋東部のギニアドーム（あるいはダカールドーム）、南大西洋東部のアンゴラドーム、インド洋スリランカ東沖合のスリランカドーム、北大西洋西部のミンダナオドーム、南インド洋西部のセーシェルドームなどが知られている (Umatani and Yamagata, 1991; Yamagata and Iizuka, 1995; Vinayachandran and Yamagata, 1998; Tozuka *et al.*, 2002; Yokoi *et al.*, 2008)。これらの湧昇ドームは海洋の低気圧性循環を伴うことがわかっている。更に、これらの湧昇ドーム現象はクロロフィル a の濃度が高い領域とも比較的良好に対応している (Fig. 1 の (c))。つまり湧昇域では、植物プランクトンが多く、豊かな漁場になっている。加えて、海表面水温 (SST) の経年変動の標準偏差の分布図 (Fig. 1 の (d)) を見ると、湧昇ドーム現象は、経年的な気候変動現象が発現する海域とも位置的に良好に対応している。海洋亜表層の湧昇ドーム現象と SST の変動を引き起こす気候変動現象との間に相互作用がある場合には、大気よりも遥かにゆっくりと変動する湧昇ドーム現象が、気候変動現象の予測において、潜在的に重要な役割を果たしていると考えられる。

このように、湧昇の変動とその予測に関する研究は、海流、水産資源、気候の予測精度の向上に大きく貢献し、我々の生活に深く関わっている。まさに、風が吹けば、海の湧昇を介して、様々なことが起こるわけである。このように魅力溢れる湧昇現象の研究の中で、今回の受賞の対象となった 3 つの研究成果、1) 熱帯大西洋の気候変動現象と湧昇ドーム現象、2) 沿岸ニーニョ現象の予測研究、3) インド洋ダイポールモード現象の予測研究について、それぞれの節で解説する。

2. 熱帯大西洋の気候変動現象と湧昇ドーム現象

熱帯大西洋における SST の変動は、大西洋ハリケーンの活動度や周辺地域（特にブラジル北部、サハラ砂漠、アフリカ南部など）の降水量の変動に大きく寄与するため、周辺国の社会・経済・産業に多大な影響を与える (Xie and Carton, 2004)。また最近の研究では、熱帯大西洋の変動が、熱帯太平洋やインド洋の気候の変動とも深く関わっていることが示唆されている (Wang *et al.*, 2009; Keenlyside *et al.*, 2013)。したがって、熱帯大西洋の変動メカニズムを理解し、気候モデルによる再現・予測の精度を向上させることは、大西洋周辺国のみならず、世界の気候研究にとって非常に重要な課題である。

現在までの研究で、熱帯大西洋には経年的に 2 つの主要な気候変動モードが現れ、それぞれ異なる大気海洋相互作用によって発達することが知られている (Kushnir *et al.*, 2006)。1 つは、大西洋南北モードと呼ばれ、北半球の春に現れる、大西洋の赤道を股がる SST 偏差の南北勾配で特徴づけられる (Servain, 1991)。その発達の主要なメカニズムとしては、風 (Wind) と蒸発 (Evaporation) と SST が関わる WES フィードバックと呼ばれる正のフィードバック機構が考えられている (Xie, 1999)。すなわち、北半球の正の SST 偏差によって、熱帯収束帯 (ITCZ) が平年より北方に移動し、ITCZ の北側で貿易風が弱まる。そのため蒸発が抑制され、それに伴い海洋からの潜熱冷却も抑制される。その結果、正の SST 偏差は強化され、更に ITCZ の北上を促す。2 つ目のモードは、大西洋東西モードとも呼ばれる、北半球の夏に熱帯大西洋東部の冷舌が異常に暖くなる Atlantic Niño である (Zebiak, 1993)。これは、太平洋のエルニーニョ現象と同様に、赤道に沿って吹く東風と海洋亜表層に存在する温度躍層が関わる Bjerknes フィードバックと呼ばれる大気海洋結合過程によって発達すると言われてきた。すなわち、赤道に沿った SST 東西傾度が平年より弱体化することで、西風偏差が生まれ、赤道東 (西) 部の温度躍層が深 (浅) くなる。その結果、赤道東 (西) 部の SST は更に暖まる (冷える)。

このように、熱帯大西洋の気候研究は、最近の 30 年間で大きく発展してきた。しかし、未だ深刻な問題を抱

えている。それは、先進各国が凌ぎを削って開発した世界最先端の気候モデルに於いても、前述した熱帯大西洋の気候変動モードの特徴を再現できず、気候モデルを使った数理的な予測の成功例もほぼ無いことである (Stockdale *et al.*, 2006)。その根本的な理由は、それらの最先端の気候モデルが、そもそも熱帯大西洋の基本場を再現できていないことに起因すると考えられる。例えば、「気候変化に関する政府間パネル」の第4次レポート (IPCC-AR4) で報告された先進各国の気候モデル (CMIP3 モデル) のほぼ全てにおいて、大西洋赤道域東部の SST が観測データに比べて異常に暖かく、SST の東西傾度が逆向きに現れる (Richter and Xie, 2008)。この問題は世界でも注目され、多くの気候学者がその理由や改善方法について、様々な説を唱えている。例えば、前述した WES フィードバックや Bjerknes フィードバックの相対的な強さに加えて、雲と太陽放射の関係、積雲対流スキーム、アマゾン域やサヘル域の陸面過程の重要性、海盆間相互作用などが指摘されている。しかし、IPCC-AR5 の CMIP5 モデルにおいても、依然として深刻なモデルバイアスの1つとして報告されている (Richter *et al.*, 2014)。

著者らは、それら熱帯大西洋の気候変動研究の多くが、大気と海表面の相互作用に注目したものであり、海洋亜表層との関連を十分に考慮していなかったことにも問題があると考えた。熱帯大西洋の海洋亜表層には、2つの湧昇ドームが存在する。南大西洋熱帯域のアンゴラドームと北大西洋熱帯域のギニアドーム (またはダカールドームとも呼ばれる) である (Fig. 1 の (b))。そこで、観測データ、渦解像度海洋大循環モデル OFES (Sasaki *et al.*, 2008) や大気海洋結合モデル UTCM (Tozuka *et al.*, 2006) のアウトプットの解析を詳細に行い、この2つの湧昇ドームと大西洋の気候変動モードとの関係を明らかにした。

アンゴラドームの経年変動は、Atlantic Niño と密接に関係する (Fig. 2)。すなわち、南半球の秋に Atlantic Niño の発達に伴い弱化した東風貿易風によって、赤道付近で鉛直第2モードの沈降赤道ケルビン波が励起される (Doi *et al.*, 2010a)。この波が、赤道上を東方に伝播してアフリカ西岸に到達後、沿岸ケルビン波として極向きに伝播し、アンゴラ沿岸域からロスビー波として西方伝播

する。その結果、アンゴラドーム域の湧昇は、季節的に最も発達する南半球の晩春になっても抑制され、ドームはあまり発達しない (Doi *et al.*, 2007)。

一方、ギニアドームの経年変動は、熱帯収束帯 (ITCZ) の南北シフトを伴う大西洋南北モードと相互作用する (Fig. 3)。北半球の晩春から夏にかけて、北半球の正の SST 偏差に伴い、ITCZ が異常に北方にシフトする。Doi *et al.* (2010b) によって、この ITCZ の北方シフトは WES フィードバックによって維持されていることが示唆された。これは先行研究とも整合的であった。更に、これら海表面の変動に対し、海洋亜表層では、ITCZ の異常な北上に伴い、ギニアドーム域のエクマン湧昇が強化され、ドームが異常に発達することが発見された。その結果、亜表層水の取り込みによる冷却効果が強化され、北半球の正の SST 偏差は夏季に急激に衰退する (Doi *et al.*, 2009, 2010b)。これは、春から夏にかけて大西洋南北モードが急激に衰退するメカニズムにおいて、海洋亜表層のギニアドームによる negative feedback が主要な役割を果たしていることを示したことになる。

以上のような大西洋の気候変動モードと海洋の湧昇ドームとの相互関係は、それまで無視されてきたメカニズムであり、著者らの研究によって初めて発見された。これは非常に画期的な発見で、熱帯大西洋の気候研究の新たな視点として、海洋亜表層が関わる大気海洋結合過程を研究する必要性を示唆するものであった。著者らは、この発見を応用すれば、気候モデルにおける大西洋の気候変動の再現性や、その変動予測の精度向上に大きく貢献できると考えた。そこで、ITCZ の北上に伴う低気圧性循環の風で駆動される海洋亜表層のギニアドームと SST の相互作用を適切に表現することで、気候モデルにおける熱帯大西洋 ITCZ の南北シフトのバイアスを改善することを試みた。世界でも最高水準の実績を誇る GFDL の高解像度気候モデルの数々のバージョンを詳しく調べた結果、ギニアドームが関わる大気海洋相互作用を比較的良好に再現できているモデルでは、大西洋の ITCZ の南北シフトもよく再現できていることがわかった (Doi *et al.*, 2012)。さらに、その二酸化炭素倍増実験の結果を調べると、大西洋南北モードが変調し、本来ならばその衰退時に当たる北半球の夏まで偏差が持続することで、北米大陸に甚大な被害を及ぼすハリケーンの活動

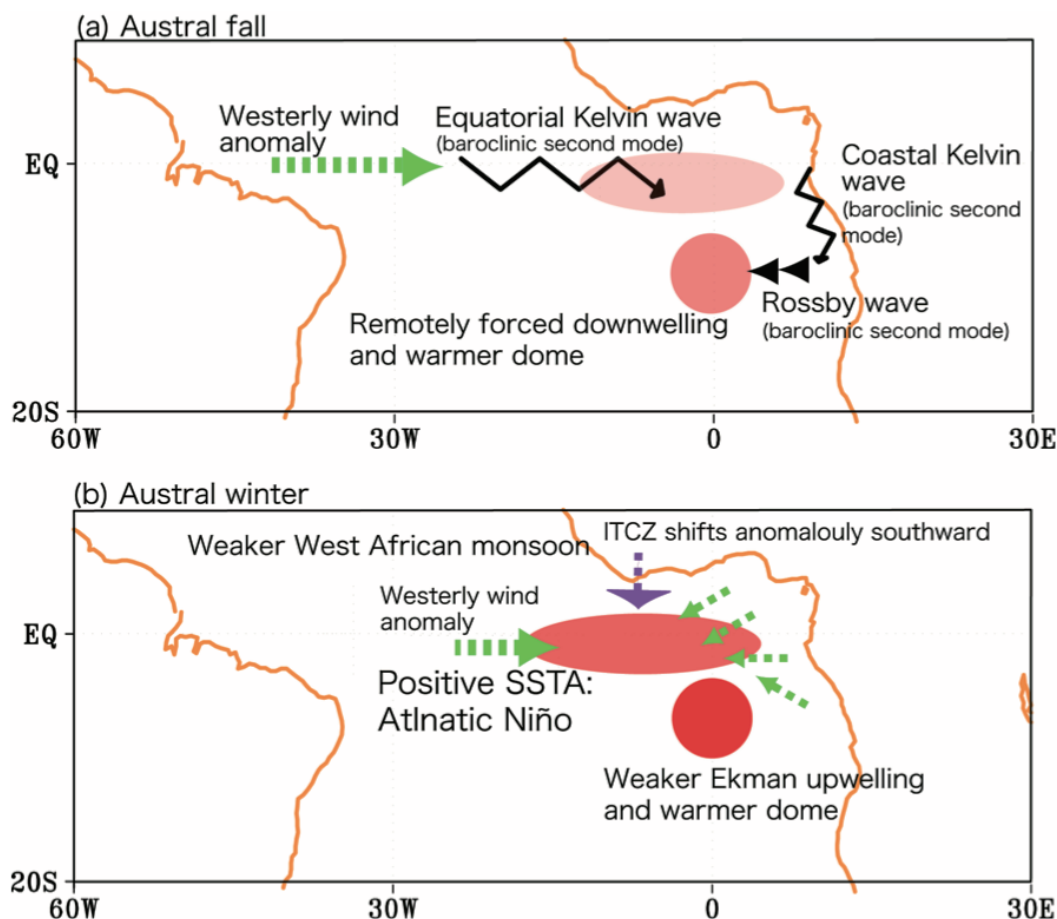


Fig. 2. Schematic diagram of the link between the Atlantic Niño and the anomalously warm Angola Dome. (a): In Austral fall, an unusual relaxation of easterly wind stress in the western equatorial Atlantic associated with the Atlantic Niño triggers second baroclinic downwelling equatorial Kelvin waves, which propagate eastward along the equator and poleward along the coast after reaching the African coast as coastal Kelvin waves. Then, downwelling Rossby waves radiate away from the coast and cause significant warming in the Angola Dome region. (b): In Austral winter, the weaker West African monsoon associated with the matured Atlantic Niño leads to weaker Ekman upwelling and thus the warmer Angola Dome.

度にも影響することが示唆された (Doi *et al.*, 2013b)。

しかし、熱帯大西洋のモデルバイアスの具体的な改善方法については、未だに明らかではない。単に水平に高解像度化しても、本質的なバイアス改善には至らなかった例が、いくつか報告されている (Doi *et al.*, 2012; Patricola *et al.*, 2012; Small *et al.*, 2014)。一方、大気モデルを水平だけでなく鉛直にも高解像度化することで、熱帯大西洋のモデルバイアスの軽減に成功した報告もあ

る (Harlaß *et al.*, 2017)。このような気候モデルの高度化と共に、そのバイアスの起源や増幅メカニズム等を究明し、その具体的な改善方法を明らかにする地道な努力を今後も続けていく必要がある。更に、そのような気候モデルで季節予測実験を行い、熱帯大西洋の気候変動モードの高精度予測を実現させることが今後の課題である。

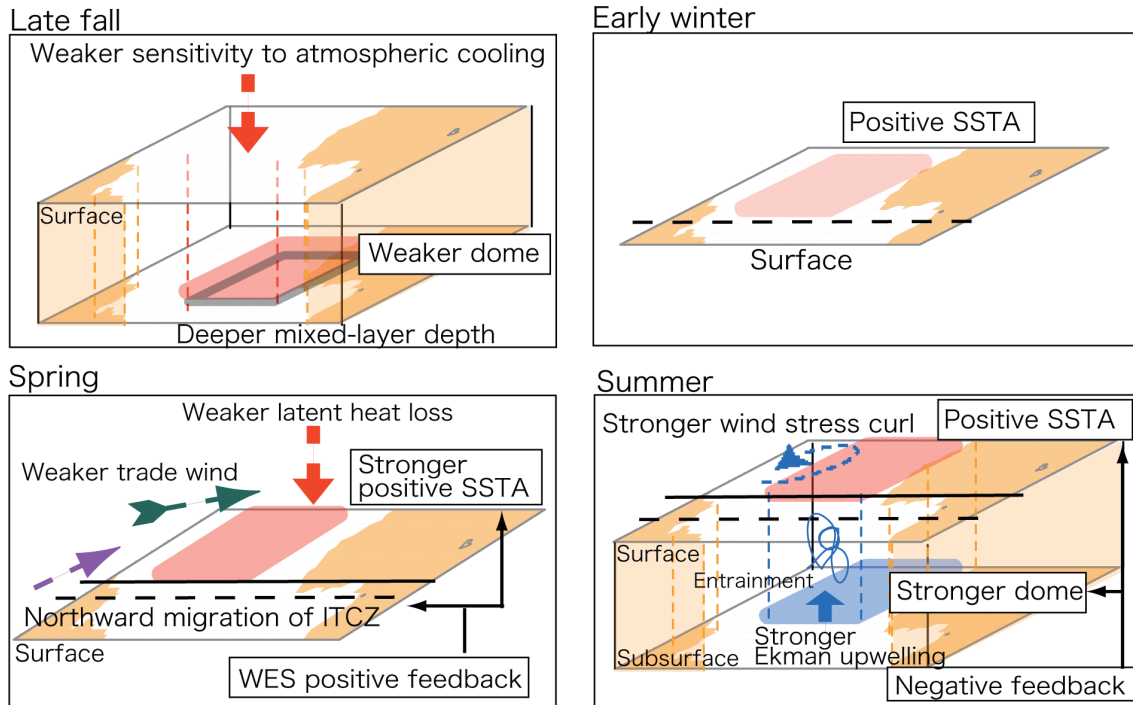


Fig. 3. Schematic diagram of the positive Atlantic Meridional Mode (AMM) and its link with the Guinea Dome (GD). Late fall in the preconditioning phase of the AMM: the GD is anomalously weak and the mixed-layer is anomalously deep in the GD region. This condition reduces the sensitivity of the mixed-layer temperature to the atmospheric cooling, and as a result leading to the positive sea surface temperature anomalies (SSTA) in early winter. Spring: this situation is sustained by the Wind-Evaporation-SST (WES) positive feedback through the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) migration; anomalously northward migration of the ITCZ causes the southwesterly wind anomaly in the Northern Hemisphere and weaker trade wind. This results in weaker evaporation and thus suppressed latent heat loss, leading to warmer SSTA. The outcome is further northward migration of the ITCZ. Summer: the GD becomes unusually cold as a result of stronger Ekman upwelling associated with the positive wind stress curl anomaly owing to anomalously northward migration of the ITCZ. It plays an important role on the decay of the warm SSTA through entrainment. Adopted from Doi *et al.* (2010b).

3. 季節予測研究の新展開としての沿岸ニーニョ現象

季節の年々の「揺らぎ」を数ヶ月前から予測することを季節予測と呼ぶ。季節予測の成功の鍵となるのは、大気よりもゆっくりと変動し、熱容量の大きい海の変動である。季節予測可能性を支配する潜在的な源（ポテンシャルソース）として重要な現象は、主に熱帯の海で発

見されてきた。その代表的なものが、海盆スケールで海洋と大気が結合して発達する気候変動現象である、エルニーニョ現象 (Philander, 1989) やインド洋のダイポールモード現象 (Saji *et al.*, 1999) である。これらは熱帯域で発生する現象であるが、大気を介して遠隔影響（テレコネクションと呼ばれる）し、日本を含む全世界の異常気象の母胎となりうる (Wang *et al.*, 2000; Saji and Yamagata, 2003) 現象である。そのため、a) 熱帯域の気候変動現象の発生予測と、b) その中緯度域への遠隔影

響予測、の2点が季節予測研究の主たる課題である。このような研究のパイオニアであった Bjerknes 博士の研究 (Bjerknes, 1966, 1969) から半世紀ほど経た今でも、中緯度域の季節予測はチャレンジングな段階にあると言える。中緯度域では、一般的に大気の内変動が大きく、大気海洋相互作用が弱いことが知られている。すなわち、海洋起源ではなく、大気起源の変動が支配的であり、カオティック (ノイズに対してシグナルが小さいとも表現できる) であるため、季節予測が潜在的に難しい地域である。

しかし、近年、中緯度域の季節予測可能性の新たなポテンシャルソースになりうる現象が発見された。それが、沿岸ニーニョ現象と呼ばれる現象である。沿岸ニーニョ現象とは、大陸の西岸沖合で、東西 100 km スケールで発生する気候変動現象である。沿岸での湧昇の変動だけでなく、大気海洋相互作用を伴い発達するため、近隣国

の気候や海洋生態系に多大な影響を与える。例えば、2011 年南半球の夏、オーストラリア西岸域の海水温が過去に先例の無いほど異常に上昇した (Fig. 4)。2011 年 2 月には、SST の平年よりも約 3°C の上昇を記録した。これは、過去 30 年間で起きた年々変動の平均的な振幅の約 4 倍であった (Feng *et al.*, 2013)。この異常な現象により、オーストラリア西岸の海洋生態系は甚大な被害を被った。この現象は、この海域を岸に沿って南向きに流れるルーウィン海流の変動が引き起こした海洋のみの現象ではなく、大気海洋相互作用を伴って発生・増幅した新しい気候変動現象であったことが報告されている (Kataoka *et al.*, 2014)。この現象は、太平洋で発生するエルニーニョ現象と、大陸西岸域で 12 月～2 月頃にかけて海水温が異常上昇する点で類似していることから、この地域の地名 Ningaloo (アボリジニの言葉で「海に突き出した岬」の意) にちなんで、山形博士、Behera 博士、

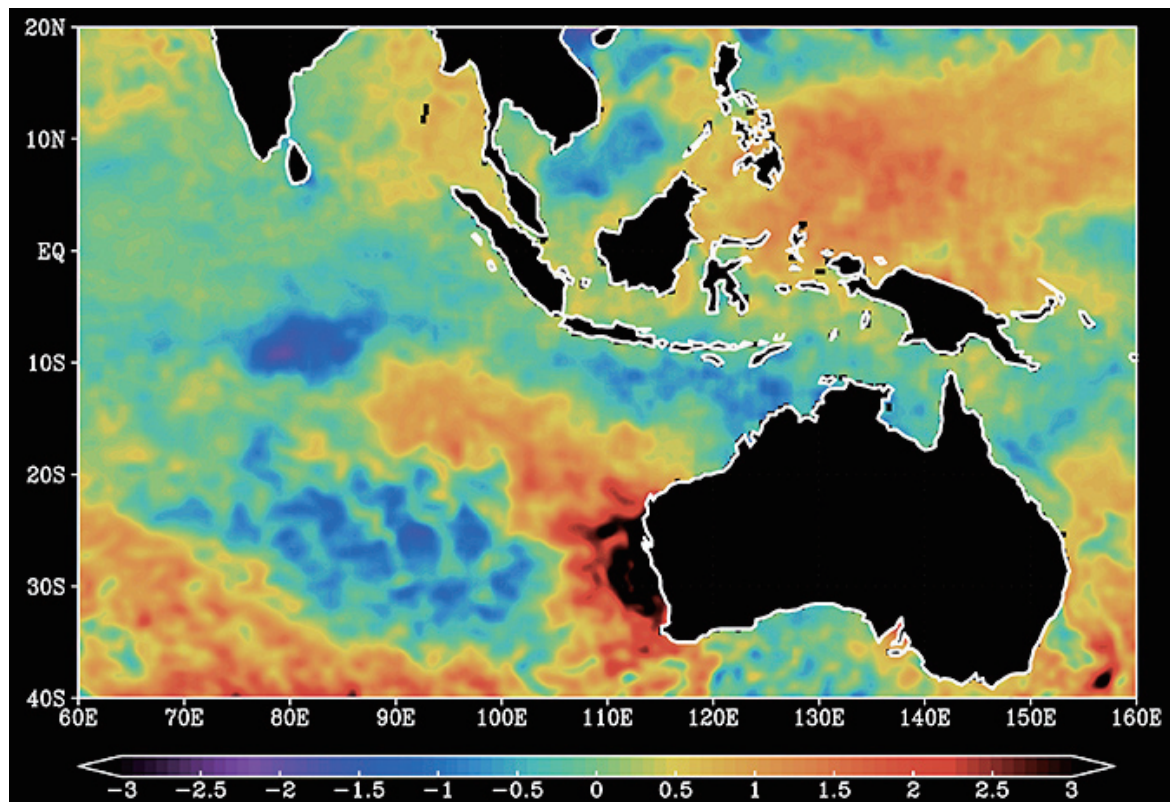


Fig. 4. Sea surface temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) in Feb. 2011 from the observational data of the NOAA OISST (Reynolds *et al.*, 2007).

Feng 博士らによってニンガルーニーニョ現象と名づけられた (Feng *et al.*, 2013)。

ニンガルーニーニョ現象の発生メカニズムに関する研究 (Kataoka *et al.*, 2017) が進められている一方で、その研究と合わせて、現象そのものの予測研究を進めることは、科学面だけでなく、社会貢献の上でも重要な課題である。Doi *et al.* (2013a) は、日欧協力によって開発された大気海洋結合大循環モデル SINTEX-F1 を基にした「SINTEX-F1 季節予測システム」(Luo *et al.*, 2005) の過去再予測実験の結果を解析し、ラニーニャ現象と連動して発生するニンガルーニーニョ現象に関しては、半年前から予測可能であることを明らかにした。特に、2011 年に発生した極めて強いニンガルーニーニョ現象の発生を、9ヶ月前から予測することに成功した。一方、ラニーニャ現象と連動せずに、局所的な大気海洋相互作用によって発生するニンガルーニーニョ現象の予測は、非常に困難であることも報告した。

さらに、Doi *et al.* (2015a) は、地球温暖化傾向と太平洋数十年規模変動の負位相の相乗効果によって、オーストラリア西岸の SST や海洋表層の蓄熱量が 1990 年代後半から 2010 年代の始めにかけて上昇したことで、オース

トラリア西岸は、中緯度であるにも関わらず、熱帯の海のように振る舞うようになっていたことを報告した。具体的には、暖かい海洋が、上空で背の高い対流を直接的に駆動するようになり、地域的な大気海洋相互作用を活性化させることで、ニンガルーニーニョ現象の振幅が増幅しやすくなっていた。ニンガルーニーニョ現象が近年になって頻発していることは珊瑚などの代替データからも確認されている (Zinke *et al.*, 2014)。1990 年代後半まで (Fig. 5 の (a)) は、オーストラリアの夏季降水量の年々変動は、インド洋ダイポールモード現象、マッデン・ジュリアン振動、オーストラリアンモンスーン、太平洋のエルニーニョ/ラニーニャ現象やエルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象などから複合的かつ遠隔的に影響を受けることが多い状況にあった。しかし、1990 年代後半から状況は劇的に変化した (Fig. 5 の (b))。極端に強いニンガルーニーニョ現象が頻発するようになり、オーストラリア西部では極端な降水イベントが多くなった。このことは、オーストラリア西岸沖からの直接的な影響が支配的になったので、それ以前に比べて、SINTEX-F システムのような数値モデルを使った予測システムで、甚大な被害をもたらす極端な多雨傾向を数理的

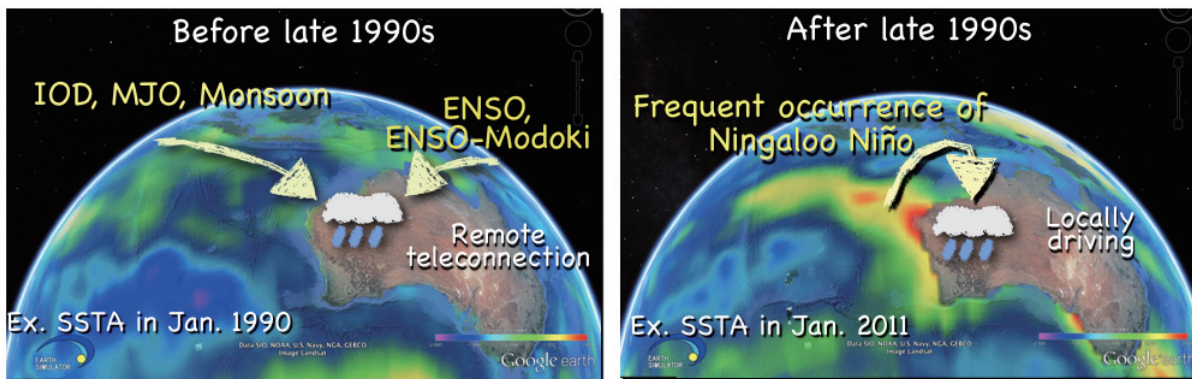


Fig. 5. Schematic images of the climate state over West Australia before/after the late 1990s. Left: Interannual variations of rainfall over West Australia are influenced by several climate modes such as El Niño/Southern Oscillation (ENSO), ENSO-Modoki, Indian Ocean Dipole, Madden-Julian Oscillation (MJO), and Australian Monsoon. Generally speaking, a climate model has a difficulty with capturing those teleconnections. Right: Frequent occurrence of the Ningaloo Niño, partly due to the interdecadal Pacific Oscillation and global warming, starts to drive the atmosphere locally. The local response is well captured by a climate model better relative to the remote effect. Actually, seasonal prediction skill in austral rainfall over West Australia is enhanced after the late 1990s by the SINTEX-F1 seasonal prediction system. Adapted from Doi *et al.* (2015).

に予測し易くなり、防災対策も立てやすくなったと言える。

同様な沿岸ニーニョ/ニーニャ現象が、米国カリフォルニア沖合で見出されカリフォルニアニーニョ/ニーニャと名付けられた (Yuan and Yamagata, 2014)。Doi *et al.* (2015b) は、この現象の季節予測可能性を調べ、エルニーニョ現象と連動して発生するカリフォルニアニーニョ現象に関しては、約半年前から予測可能であることを明らかにした。これらが近年のカリフォルニア州の記録的な干ばつ予測の鍵になっている可能性がある。

これまでの異常気象予測に関する研究は、エルニーニョに代表されるような数 1000 km 規模の熱帯気候変動現象の予測研究が中心だったが、本成果により、今後、中緯度の大陸西岸域で発生する数 100 km 規模の地域と密接に関連した気候変動現象の予測研究にも新たな扉が開かれた。季節予測精度の向上のため、上述した a), b) の研究を進めていくことはもちろんだが、中緯度域の季節予測研究の新たなパラダイムとして、c) 沿岸ニーニョ現象の予測研究が加わったことで、季節予測研究に新しい展開が見え始めた。今後は、数 1000 km 規模の気候変動現象やそのテレコネクションが、時空間スケールの比較的小さい沿岸ニーニョ現象と、スケールの垣根を超えてどのように相互作用し、それらの現象の予測に影響するかを更に詳しく調べる必要がある。

4. インド洋ダイポールモード現象の予測研究

インド洋ダイポールモード現象は、数年に 1 度、北半球の夏から秋にかけて発生する海盆スケールの大気海洋相互作用現象であり、海面水温だけでなく、海面高度、降水量、地上気圧などが東西のダイポール構造を持つことが知られている (Behera *et al.*, 1999; Saji *et al.*, 1999; Vinayachandran *et al.*, 1999)。正と負のイベントがあり、正(負)のイベントが発生すると、熱帯インド洋の南東部で SST が平年より低(高)く、西部で SST が高(低)くなる。正のイベントが発生すると、東アフリカでは豪雨になる一方、インドネシアでは雨が少なくなり、厳しい干ばつと山火事を引き起こす傾向がある。一方、負のイベントが発生すると、通常は東インド洋で活発な対流活動がさらに活発となり、インドネシアやオーストラリア

で雨が多くなり、洪水を引き起こす。さらに、その影響はインド洋周辺国だけでなく、欧州やアジアなどに広く波及する (Guan and Yamagata, 2003; Saji and Yamagata, 2003)。従って、日本を含む東アジアの季節予測の成功にとって、太平洋のエルニーニョ現象だけでなく (Wang *et al.*, 2000)、インド洋ダイポールモード現象の予測は極めて重要である。

JAMSTEC アプリケーションラボが欧州の研究者と連携して開発してきた SINTEX-F 予測システム (Luo *et al.*, 2005) では、準リアルタイムで、2006 年に発生した正のインド洋ダイポールモード現象の発生予測に成功し、国内外の研究者を驚かせると共に、インド洋ダイポールモード現象の予測研究を盛り立てる先駆的な成果をあげた (Luo *et al.*, 2008)。現在は、JAMSTEC アプリケーションラボを含め、アメリカ、欧州、オーストラリア、韓国などの関係機関が、インド洋ダイポールモード現象の発生予測情報を準リアルタイムで提供している。しかし、最先端の予測システムでも、太平洋のエルニーニョ現象ほどには、インド洋ダイポールモード現象の予測精度が高くないのが実情である (Zhu *et al.*, 2015)。その一因として、インド洋ダイポールモード現象のイベント毎の多様性が考えられる。インド洋ダイポールモード現象の発生プロセスには、インドネシアのスマトラ島沿岸の湧昇変動が重要な役割を果たしているが、その相対的な重要性はイベント毎に異なり、その発達メカニズムの違いが各イベントの予測可能性にも影響していることが示唆されている (Tanizaki *et al.*, 2017)。

著者らは、従来のモデルを高度化 (海水モデルの導入、高解像度化、物理スキームの改善等) した第 2 版となる SINTEX-F2 (Masson *et al.*, 2012; Sasaki *et al.*, 2013) を基盤として、新しい季節予測システムのプロトタイプ「SINTEX-F2 システム」を開発し、インド洋ダイポールモード現象の予測精度を調べた。亜熱帯域の予測精度の向上には成功したものの (Fig. 6 の (a) と (b)) (Doi *et al.*, 2016)、インド洋ダイポールモード現象の予測精度の向上を実現できなかった。そこで、新たなアプローチとして、予測システムの海洋初期値を作成するプロセスを高度化した。従来は、衛星から得られた SST 情報のみを取り込んでいたが、新しく、海の内部の 3 次元の水温/塩分の海洋観測データ (係留ブイ (例えば JAMSTEC の

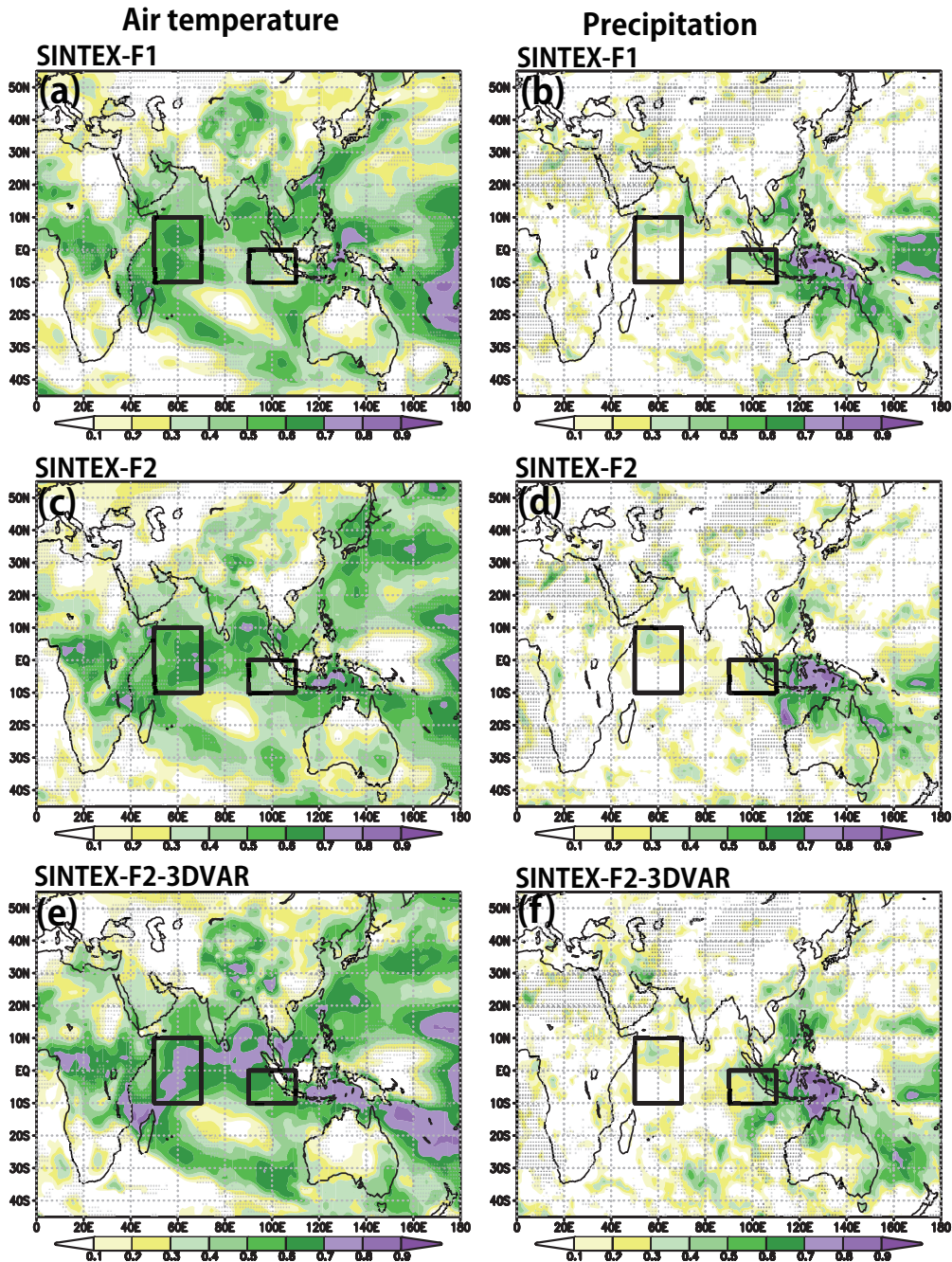


Fig. 6. (a): Anomaly correlation coefficient (ACC) for September–November (SON) averaged 2 m air-temperature between the NCEP/NCAR reanalysis data (Kalnay *et al.*, 1996) and the prediction initialized on every 1st June of each year with the SINTEX-F1 system (9 ensemble mean) in 1983–2015. Dark-shaded is a region where the ACC is below the persistence. (b): Same as (a) except for rainfall between the CMAP (Xie and Arkin, 1996) and the prediction. Dark-shaded is a region where the ACC is below the persistence or the standard deviation of the interannual variability of the observation in 1983–2015 is below 0.2 mm day⁻¹. (c) and (d): Same as (a) and (b) except with the SINTEX-F2 system. (e) and (f): Same as (a) and (b) except with the SINTEX-F2-3DVAR system. Adopted from Doi *et al.* (2017).

TRITON ブイ), 国際協力で投入されている ARGO フロート, 船舶観測など)を3次元変分法(3DVAR)で同化するプロセスを加えた(SINTEX-F2-3DVAR システム)。その結果, インド洋ダイポールモード現象の予測精度の向上に成功した(Fig. 6の(b)と(c))(Doi *et al.*, 2017)。今後の研究では, イベント毎のプロセスを更に詳細に調べると共に, イベント毎の予測改善の余地やその改善手法などを明らかにしていくことが肝要である。

5. おわりに

湧昇の変動とその予測に関する研究は, 海流, 水産資源, 気候の予測精度の向上に大きく貢献し, 人々の生活に深く関わってくる。その中でも, 特に著者らは, 湧昇(upwelling)が重要な役割を果たす気候変動現象の予測研究の発展に重心を置いて研究を進めてきた。第2節では, 熱帯大西洋の気候変動現象と湧昇ドーム現象について, 気候モデルのアウトプット解析により, その変動プロセスを解説した。第3節では, 気候モデルを基盤とした季節予測システムの過去再予測実験のアウトプット解析により, 沿岸ニーニョ現象の予測精度の検証結果と予測可能性を解説した。最後に, 第4節では, 季節予測システムを高度化と, インド洋ダイポールモード現象の予測精度向上のための研究成果を紹介した。著者らの今までの研究を振り返ると, プロセスの理解と, その予測研究とを, 総合的かつ包括的に進めることで効率的に行うことができたといえる。特に, 予測の検証が, 更なる予測精度の向上に向けた研究のために重要な作業であった。例えば, 予測を外してしまうメカニズムの理解や, 予測シミュレーション技術の発展(気候モデルや初期値の取り扱いなど), あるいは予測が潜在的にどこまで可能なかの理論的説明やアンサンブルの取り扱いの理解などを進めた。これらの研究の成果の結晶が, 数理的な予測の成功であったと言える。したがって, 観測データによる検証こそが予測科学を強く鍛えてくれるとも言える。このような研究プロセスによって発展してきた好例が, 毎日の生活に欠かせない天気予報の研究開発である。季節予測研究もこのような検証に基づいた研究開発を展開していくことで, 社会へのよりよいサービスを可能にしていくであろう。世間を賑わす地球温暖化問題とその対

策が重要であることは間違いないが, 既に頻発している異常気象・気候イベントへの差し迫った適応策として, 今後も数ヶ月から数年先の気候予測の精度向上研究への努力が必要である。

さらに, これらの物理変数の予測情報を, 作物の豊凶予測や感染症流行予測など, より人々が利活用しやすい情報に昇華する研究も進めるべきである。世界的な研究プロジェクトでも, climate service, あるいは beyond climate といったスローガンが打ち出され始めた。著者の所属するアプリケーションラボでも, 季節予測情報を応用し, 豪州や東南アジアの作物豊凶予測やアフリカ南部の感染症予測などに取り組んでいる(Yuan and Yamagata, 2015; Ikeda *et al.*, 2017; Oetli *et al.*, 2018)。近年は特に, 研究成果がどのように人々の生活に役立つかを具体的に明示することが強く求められているように感じる。海洋物理の理解が基盤となって, 気候予測研究が発展し, その結果, 人々の生活の安心・安全に資することを, 単なる連想ゲームではなく, 具体的な例で実証していくべきである。海洋研究の豊かな発展性を意識しながら, 今後も湧昇の理解と予測の研究を進めていきたい。

謝辞

この度は岡田賞の荣誉に預かることになり, 身にあまる光荣に存じます。錚々たる歴代受賞者の方々とは並ぶべくもありませんが, その末端に名を連ねる者として, 海洋学の発展に貢献すべく微力を尽くして参ります所存です。

受賞の対象となった研究成果は, 以前所属していた東大理学部, 米国プリンストン大学, また現在のJAMSTEC/APLで, 多くの研究者の方々と交流し, 日々楽しく研究できたお陰です。ここで全てのお方のお名前を上げることはできませんが, 特に直接の上長として御指導して頂いた, 東大の山形先生, 東塚先生, 升本先生, 米国プリンストン大のVecchi博士, JAMSTEC/APLのBehera博士, 野中博士, またたくさん頼れる先輩の中で特別にお世話になった, 相木博士, 木田博士, 岩前博士に心から感謝しております。その中でも特に山形先生は, 海洋物理学, 気候力学の基礎から, その社会応用可能性まで丁寧に教えて頂きました。先生の研究への

熱意を身近に感じることで、研究に対する心構えや研究の楽しさも学ばせて頂きました。本当に感謝しております。渦解像海洋大循環モデル OFES や大気海洋結合モデル UTCM のアウトプットの解析では、升本先生、佐々木英治博士、東塚先生に大変お世話になりました。また、SINTEX-F と呼ばれる最先端の気候予測システムを使った研究については、Luo 博士、佐々木亘博士、Masson 博士らに多大なるご助力を頂きました。皆様が教えてくださった知識や技術はもちろんのこと、そのパッションやスピリットを胸に、面白い研究をこれからたくさん実施して海洋学の発展に貢献したいと思います。また、それらのレガシーを後輩の皆様にも引き継いでもらえるように、頑張りたいと思います。今後ともご指導ご鞭撻の程よろしくお願い致します。

一連の研究は環境研究総合推進費(2-1405)、日本医療研究開発機構(AMED)と国際協力機構(JICA)が連携して推進する地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム(SATREPS)、日本学術振興会 科学研究費助成(16H04047, 16K17810)などの補助を受けて実施しました。

最後になりますが、私の科学者になるという夢を幼い頃から変わらず支援し続けてくれた両親と、日々の私の生活の拠り所である妻と二人の息子達に心から感謝しております。

References

- Behera, S. K., R. Krishnan, and T. Yamagata (1999): Unusual ocean-atmosphere Indian Ocean during 1994 conditions in the tropical Wind Anomalies. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3001-3004.
- Bjerknes, J. (1966): A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, **18**, 820-829.
- Bjerknes, J. (1969): Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Weather Rev.* **97**, 163-172.
- Doi, T., Behera, and T. Yamagata (2013): Predictability of the Ningaloo Niño/Niña. *Sci. Rep.*, **3**, 2892.
- Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata (2015): An interdecadal regime shift in rainfall predictability related to the Ningaloo Niño in the late 1990s. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **120**, 1388-1396.
- Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata (2016): Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model. *J. Adv. Model Earth Syst.*, **8**, 1847-1867.
- Doi, T., A. Storto, S. K. Behera, A. Navara, and T. Yamagata (2017): Improved prediction of the Indian Ocean Dipole Mode by use of subsurface ocean observations. *J. Clim.*, **30**, 7953-7970.
- Doi, T., T. Tozuka, H. Sasaki, Y. Masumoto, and T. Yamagata (2007): Seasonal and Interannual Variations of Oceanic Conditions in the Angola Dome. *J. Phys. Oceanogr.*, **37**, 2698-2713.
- Doi, T., T. Tozuka, and T. Yamagata (2009): Interannual variability of the Guinea Dome and its possible link with the Atlantic Meridional Mode. *Clim. Dyn.*, **33**, 985-998.
- Doi, T., T. Tozuka, and T. Yamagata (2010a): Equivalent forcing depth in tropical oceans. *Dyn. Atmos. Ocean*, **50**, 415-423.
- Doi, T., T. Tozuka, and T. Yamagata (2010b): The Atlantic meridional mode and its coupled variability with the Guinea Dome. *J. Clim.*, **23**, 455-475.
- Doi, T., G. A. Vecchi, A. J. Rosati, and T. L. Delworth (2012): Biases in the atlantic ITCZ in seasonal-interannual variations for a coarse- and a high-resolution coupled climate model. *J. Clim.*, **25**, 5494-5511.
- Doi, T., G. A. Vecchi, A. J. Rosati, and T. L. Delworth (2013): Response to CO2 doubling of the Atlantic hurricane main development region in a high-resolution climate model. *J. Clim.*, **26**, 4322-4334.
- Doi, T., C. Yuan, S. K. Behera, and T. Yamagata (2015): Predictability of the California Niño/Niña. *J. Clim.*, **28**, 7237-7249.
- Ekman, V. W. (1905): On the influence of the earth's rotation on ocean currents. *Arch. Math. Astron. Phys.*, **211**, 1-53.
- Feng, M., M. J. McPhaden, S. Xie, and J. Hafner (2013): La Niña forces unprecedented Leeuwin Current warming in 2011. *Sci. Rep.*, **1277**
- Good, S. A., M. J. Martin, and N. A. Rayner (2013): EN4: Quality controlled ocean temperature and salinity profiles and monthly objective analyses with uncertainty estimates. *J. Geophys. Res. Ocean*, **118**, 6704-6716.
- Guan, Z., and T. Yamagata (2003): The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1544.
- Harlaß, J., M. Latif, and W. Park (2017): Alleviating tropical Atlantic sector biases in the Kiel climate model by enhancing horizontal and vertical atmosphere model resolution: climatology and interannual variability. *Clim. Dyn.* in press.
- Hu, C., Z. Lee, and B. Franz (2012): Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *J. Geophys. Res. Ocean*, **117**, 1-25.
- Ikeda, T., S. Behera, Y. Morioka, N. Minakawa, M. Hashizume, A. Tsuzuki, R. Maharaj, and P. Kruger (2017): Seasonally lagged effects of climatic factors on malaria incidence in South Africa. *Sci. Rep.*, **7**, 2458.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, and D. Joseph (1996): The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **77**, 437-471.
- Kataoka, T., T. Tozuka, S. K. Behera, and T. Yamagata (2014): On the Ningaloo Niño/Niña. *Clim. Dyn.*, **43**, 1463-1482.
- Kataoka, T., T. Tozuka, and T. Yamagata (2017): Generation and decay mechanisms of Ningaloo Niño/Niña. *J. Geophysical Res. Ocean*, **122**, 8913-8932.
- Keenlyside, N. S., H. Ding, and M. Latif (2013): Potential of equatorial Atlantic variability to enhance El Niño prediction. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 2278-2283.
- Kushnir, Y., W. A. Robinson, P. Chang, and A. W. Robertson (2006): The

- Physical Basis for Predicting Atlantic Sector Seasonal-to-Interannual Climate Variability. *J. Clim.*, **19**, 5949–5970.
- Luo, J. J., S. Behera, Y. Masumoto, H. Sakuma, and T. Yamagata (2008): Successful prediction of the consecutive IOD in 2006 and 2007. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, 1–6.
- Luo, J. J., S. Masson, S. Behera, S. Shingu, and T. Yamagata (2005): Seasonal climate predictability in a coupled OAGCM using a different approach for ensemble forecasts. *J. Clim.*, **18**, 4474–4497.
- Masson, S., P. Terray, G. Madec, J.-J. Luo, T. Yamagata, and K. Takahashi (2012): Impact of intra-daily SST variability on ENSO characteristics in a coupled model. *Clim. Dyn.*, **39**, 681–707.
- Oettli, P., S. K. Behera, and T. Yamagata (2018): Climate Based Predictability of Oil Palm Tree Yield in Malaysia. *Sci. Rep.*, **8**, 2271.
- Patricola, C. M., M. Li, and Z. Xu (2012): An investigation of tropical Atlantic bias in a high-resolution coupled regional climate model. *Clim. Dyn.*, **39**, 24–43.
- Philander, S. (1989): *El Nino, La Nina, and the Southern Oscillation*. Academic Press, Cambridge, MA, U.S., 293 pp.
- Reynolds, R. W., N. A. Rayner, T. M. Smith, C. Diane, C. Stokes, and W. Wang (2002): An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Clim.*, **15**, 1609–1625.
- Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, B. Dudley, B. Chelton, K. S. Casey, and M. G. Schlax (2007): Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *J. Clim.*, **20**, 5473–5496.
- Richter, I., and S. P. Xie (2008): On the origin of equatorial Atlantic biases in coupled general circulation models. *Clim. Dyn.*, **31**, 587–598.
- Richter, I., S. P. Xie, S. K. Behera, T. Doi, and Y. Masumoto (2014): Equatorial Atlantic variability and its relation to mean state biases in CMIP5. *Clim. Dyn.*, **42**, 171–188.
- Saji, N. H., B. N. Goswami, P. N. Vinayachandran, and T. Yamagata (1999): A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, **401**, 360–363.
- Saji, N. H., and T. Yamagata (2003): Possible impacts of Indian Ocean Dipole mode events on global climate. *Clim. Res.*, **25**, 151–169.
- Sasaki, H., M. Nonaka, Y. Masumoto, Y. Sasai, H. Uehara, and H. Sakuma (2008): Chapter 10, An eddy-resolving hindcast simulation of the quasiglobal ocean from 1950 to 2003 on the Earth Simulator. In *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean*, edited by K. Hamilton and W. Ohfuchi, Springer, New York, NY.
- Sasaki, W., K. J. Richards, and J. J. Luo (2013): Impact of vertical mixing induced by small vertical scale structures above and within the equatorial thermocline on the tropical Pacific in a CGCM. *Clim. Dyn.*, **41**, 443–453.
- Servain, J. (1991): Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications. *J. Geophys. Res.*, **96**, 15137–15146.
- Small, R. J., J. Bacmeister, and D. Bailey (2014): A new synoptic-scale resolving global climate simulation using the community earth system model. *J. Adv. Model. Earth, Syst.*, **6**, 1065–1094.
- Stockdale, T. N., M. A. Balmaseda, and A. Vidard (2006): Tropical Atlantic SST Prediction with Coupled Ocean–Atmosphere GCMs. *J. Climate*, **19**, 6047–6061.
- Tanizaki, C., T. Tozuka, T. Doi, and Y. Yamagata (2017): Relative importance of the processes contributing to the development of SST anomalies in the eastern pole of the Indian Ocean Dipole and its implication for predictability. *Clim. Dyn.*, **49**, 1289–1304.
- Tozuka, T., T. Kagimoto, Y. Masumoto, and T. Yamagata (2002): Simulated multiscale variations in the western tropical Pacific: The Mindanao Dome revisited. *J. Phys. Ocean.*, **32**, 1338–1358.
- Tozuka, T., T. Miyasaka, A. Chakraborty, M. Mujumdar, S. K. Behera, Y. Masumoto, H. Nakamura, and T. Yamagata (2006): Univ. of Tokyo coupled general circulation model (UTCM1.0). *Ocean-Atmos. Res. Rep.*, **7**, 44 pp.
- Umatani, S., and T. Yamagata (1991): Response of the Eastern Tropical Pacific to Meridional Migration of the ITCZ: The Generation of the Costa Rica Dome. *J. Phys. Ocean.*, **21**, 346–363.
- Vinayachandran, P. N., N. H. Saji, and T. Yamagata (1999): Response of the Equatorial Indian Ocean to an unusual wind event during 1994. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1613–1616.
- Vinayachandran, P. N., and T. Yamagata (1998): Monsoon Response of the Sea around Sri Lanka: Generation of Thermal Domes and Anticyclonic Vortices. *J. Phys. Oceanogr.*, **28**, 1946–1960.
- Wang, B., R. Wu, and J. X. Fu (2000): Pacific—East Asian Teleconnection: How Does ENSO Affect East Asian Climate? *J. Clim.*, **13**, 1517–1536.
- Wang, C., F. Kucharski, R. Barimalala, and A. Bracco (2009): Teleconnections of the tropical Atlantic to the tropical Indian and Pacific Oceans: A review of recent findings. *Meteorol. Zeitschrift*, **18**, 445–454.
- Xie, P., and P. A. Arkin (1996): Analyses of Global Monthly Precipitation Using Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Predictions. *J. Clim.*, **9**, 840–858.
- Xie, S.-P. (1999): A dynamic ocean-atmosphere model of the tropical Atlantic decadal variability. *J. Clim.*, **12**, 64–70.
- Xie, S.-P., and J. Carton (2004): Tropical Atlantic variability: Patterns, mechanisms, and impacts, p. 121–142. In: *Earth Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction Geophys. Monogr.*, edited by C. Wang, S.P. Xie, and J.A. Carton, Amer. Geophys. Union, Washington D.C.
- Yamagata, T., and S. Iizuka (1995): Simulation of the tropical thermal domes in the Atlantic: A seasonal cycle. *J. Phys. Ocean.*, **25**, 2129–2140.
- Yokoi, T., T. Tozuka, and T. Yamagata (2008): Seasonal variation of the Seychelles Dome. *J. Phys. Ocean.*, **21**, 3740–3754.
- Yoshida, K. (1955): Coastal upwelling off the California coast. *Rec. Ocean Work Japan*, **2**, 1–13.
- Yoshida, K., (1959): A theory of the Cromwell Current and of the equatorial upwelling –an interpretation in a similarity to a coastal circulation. *J. Ocean. Soc. Japan*, **15**, 154–170.
- Yuan, C., and T. Yamagata (2014): California Niño/Niña. *Sci. Rep.*, 4801.
- Yuan, C., and T. Yamagata (2015): Impacts of IOD, ENSO and ENSO Modoki on the Australian Winter Wheat Yields in Recent Decades. *Sci. Rep.*, **5**, 17252.
- Zebiak, S. (1993): Air-sea interaction in the equatorial Atlantic region. *J. Clim.*, **6**, 1567–1586.
- Zhu, J., B. Huang, A. Kumar, and J. L. Kinter (2015): Seasonality in prediction skill and predictable pattern of tropical Indian Ocean SST. *J. Clim.*, **28**, 7962–7984.
- Zinke, J., A. Rountrey, M. Feng, S.-P. Xie, D. Dissard, K. Rankenburg, J. M. Lough, and M. T. McCulloch (2014): Corals record long-term Leeuwin current variability including Ningaloo Niño/Niña since 1795. *Nat. Commun.*, **5**, 1–9.

Understanding and predicting variation in tropical and coastal ocean upwelling

Takeshi Doi*

Abstract

Understanding the mechanisms of variation of tropical and coastal ocean upwelling phenomena is crucial for not only physical oceanographic but also fishery and climate studies. In particular, the interaction between subsurface ocean upwelling and climate modes needs to be well understood from the viewpoint of climate prediction and its societal application. In this paper, I summarize three research topics for the 2017 Okada Prize: 1) tropical Atlantic climate modes and their link with upwelling domes, 2) predictability of Coastal Niño/Niña, and 3) prediction of the Indian Ocean Dipole.

Key words : upwelling dome, Atlantic Niño, Atlantic Meridional Mode, Ningaloo Niño, Indian Ocean Dipole

(Corresponding author's e-mail address: takeshi.doi@jamstec.go.jp)

(Received 29 November 2017; accepted 22 January 2018)

(doi: 10.5928/kaiyou.27.3_141)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2018)

* Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, 236-0001, Japan.
TEL: +81457785517 FAX: +81457785707
e-mail: takeshi.doi@jamstec.go.jp