

Environment Research and Technology Development Fund

環境省環境研究総合推進費終了研究等成果報告書

最近頻発し始めた新しい自然気候変動現象の予測と
その社会応用
(2-1405)

平成26年度～平成28年度

Prediction of Climate Variability with a Focus on Newly Discovered Modes and
its Application

国立研究開発法人海洋研究開発機構

平成29年5月

環境省
総合環境政策局総務課環境研究技術室
環境保健部環境安全課環境リスク評価室
地球環境局総務課研究調査室

最近頻発し始めた新しい自然気候変動現象の予測と

その社会応用

(2-1405)

I. 成果の概要	.....	i
1. はじめに（研究背景等）	.....	i
2. 研究開発目的	.....	i
3. 研究開発の方法	.....	ii
4. 結果及び考察	.....	iv
5. 本研究により得られた主な成果	.....	v
6. 研究成果の主な発表状況	.....	vi
7. 研究者略歴	.....	ix
II. 成果の詳細		
(1) 最近頻発し始めた新しい自然気候変動現象の予測とその社会応用 (国立研究開発法人海洋研究開発機構)	.....	1
要旨	.....	1
1. はじめに	.....	2
2. 研究開発目的	.....	3
3. 研究開発方法	.....	5
4. 結果及び考察	.....	18
5. 本研究により得られた成果	.....	79
6. 国際共同研究等の状況	.....	81
7. 研究成果の発表状況	.....	83
8. 引用文献	.....	90
III. 英文Abstract	.....	93

課題名 2-1405 最近頻発し始めた新しい自然気候変動現象の予測とその社会応用

課題代表者名 山形 俊男 (国立研究開発法人海洋研究開発機構)
 研究実施期間 平成26～28年度
 累計予算額 平成26～28年度累計予算額80,335千円 (うち平成28年度:23,623千円)
 予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード エルニーニョモドキ現象、沿岸ニーニョ現象、アジア域、オセアニア域、
 気候変動予測サービスの可能性

研究体制

(1) 最近頻発し始めた新しい自然気候変動現象の予測とその社会応用 (国立研究開発法人海洋研究開発機構)

研究概要

1. はじめに (研究背景等)

ゆるやかに一方向に進む気候変化 (climate change) とはるかに大きな振幅で変動する気候変動 (climate variations) の二つの用語をわが国では混同して使うことが多い。両者は別な概念である。二酸化炭素やメタンなどの温暖化気体の濃度が徐々に増大していることに対応して、対流圏の気温や海水温が徐々に上昇しているのは気候変化の代表的なものといえる。確実に進行する海洋酸性化も海の気候変化の代表的なものである。一方、数年ごとに発生を繰り返し、世界各地に異常気象を引き起こすエルニーニョ現象やラニーニャ現象は気候変動の代表的なものである。変化 (change) と変動 (variations) の概念の相違を正しく認識することは対応策においても重要である。地球温暖化と海洋起源の気候変動現象の相互関係の解明と社会活動や産業活動に直接的に貢献する気候変動予測システムの実用化に向けた技術開発が対応策、適応策の面からも極めて重要になって来ている。

近年、地球温暖化や数10年規模変動の影響を強く受けて、気候変動現象そのものが変質し、新たな気候変動現象が頻発し始めた。熱帯太平洋では研究代表者が命名したエルニーニョモドキやラニーニャモドキなる現象が頻発している。世界各地への影響もこれまでの現象とは著しく異なる。加えて、研究代表者らは、最近、中緯度の大陸西岸に沿岸ニーニョ/ニーニャなる地域気候変動現象が発生することを見出した。例えば、2011年2月、オーストラリア西岸域の海水温は過去に先例の無いほど異常に暖まり、周辺の珊瑚礁・漁業・農業に甚大な被害を与えた。この現象はニンガルー・ニーニョと名づけられた。

これら最近頻発している新しい気候変動現象は我が国のみならず世界中の最近頻発してきた未曾有の極端現象との関連が示唆されている。本研究では、それらの発生メカニズムやその周辺国の気候への影響を解明し、SINTEX-F1季節予測システムや新たな予測システムを用いて、その予測精度を向上させる。更にその予測情報をアジア-オセアニア域に対し、力学的ダウンスケーリング手法を用いて詳細化し、農業等の実社会活動に応用する気候サービスのプロトタイプを確立させる。

2. 研究開発目的

本研究では、近年頻発してきた気候変動現象に関する基礎的なメカニズムの解明から、その予測技術の高度化と精度の向上、更には予測情報の利活用まで、一連の研究開発を総合的に目指す。具体的には、以下の三つの項目から構成される。

- (1) 太平洋熱帯域のエルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象や、中緯度大陸西岸に現れる沿岸ニーニョ/ニーニャ現象のメカニズムを解明し、その予測可能性を検証する。特にここ15年はラニーニャモドキ現象やニンガルーニーニョ現象が頻発しているので、その実態を解明する。こうした現象が10年規模変動の位相の違いや地球温暖化そのものとのように関係するの、また地域の異常気象にどのような影響をもたらすのかを、最新の観測データやEUと共同開発した大気海洋結合モデルSINTEX-Fを使って調べる。また既に運用しているSINTEX-Fをベースとした季節予測システムを用いてそれらの予測可能性を総合的に検証する。更に、SINTEX-Fモデルの高解像度化や初期化手法を改良し、それらの予測精度を向上させる。
- (2) 上記の地球規模の予測情報を、地域規模へと力学的にダウンスケーリングし、実社会活動に利活用しやすいようにする。特に数km間隔で、湿度、気温、日射量等を適切にダウンスケーリングできるよう、地域の複雑な地形データを組み込み、観測値と検証しながら、その技術開発を行う。エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象やニンガルーニーニョ/ニーニャ現象の影響を受けやすいアジア-オセア

ニア地域に対して開発を進める。

- (3) 実社会活動に具体的に予測情報を活用するために、アジア-オセアニア域における感染症、農業、水資源管理などを対象に、気候サービスのプロトタイプを構築する。本研究を通して、インド-太平洋域の熱帯域および亜熱帯域の気候変動予測とその応用研究において、国際的なリーダーシップを発揮する。

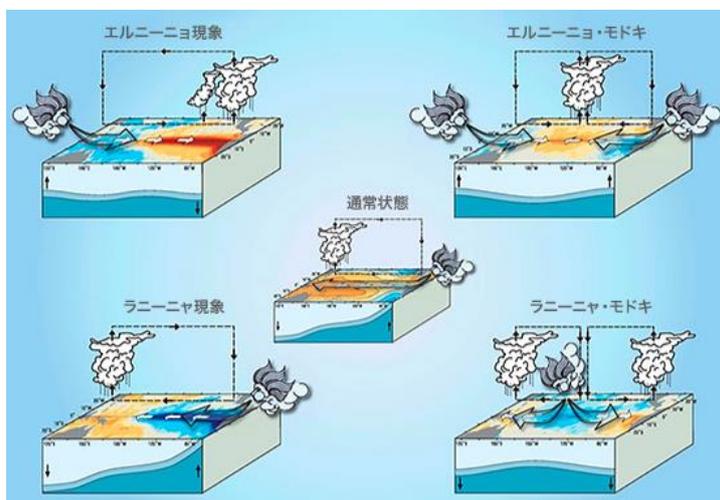
3. 研究開発の方法

(1) 最近頻発し始めた新しい自然気候変動現象の予測とその社会応用

1) 地球規模で発生する気候変動現象の理解と予測

a エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象について

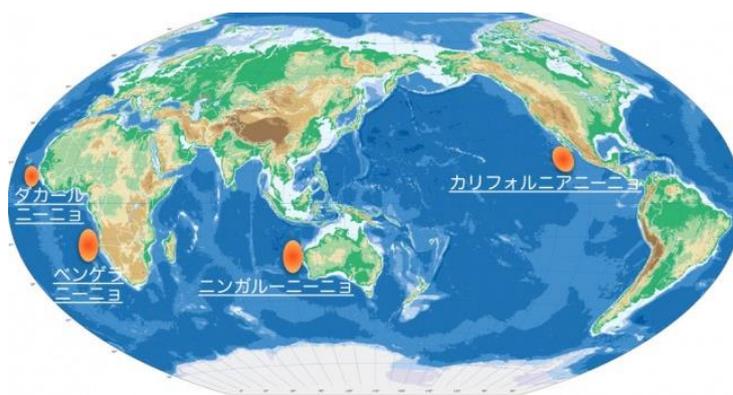
古典的なエルニーニョ現象が発生すると、東太平洋赤道域が平年より異常に暖くなるのに対して、エルニーニョモドキ現象が発生すると、中央太平洋赤道域が異常に暖まり、西部及び東部の太平洋赤道域が異常に冷たくなる(図(1)-1)。世界各地への影響もこれまでの現象とは著しく異なることが知られている。例えば、エルニーニョ現象が発生するとアメリカ西海岸で雨が多くなるが、エルニーニョモドキ現象が発生すると、雨が少なくなる。また、インドや南アフリカの降水にも影響を及ぼすことが知られている。さらには、中央太平洋の島々や、カリフォルニア沖、インド洋の南西部など、離れた地域の海面水位に影響を与えることが報告されている。この現象の実態を捉えるため、エルニーニョモドキ指標EMIの周波数解析や現象の空間特性を抽出する経験的直行関数(EOF)解析を行い、近年の地球温暖化の見かけ上の停滞との関係などを調べた。



図(1)-1 エルニーニョ現象(左上)、ラニーニャ現象(左下)、及びそれらのモドキ現象(右上、右下)にともなう海面水温の偏差の模式図。中央は熱帯太平洋の水温分布の平年値

b 中緯度大陸西岸に現れる沿岸ニーニョ/ニーニャ現象について

沿岸ニーニョ現象とは、大陸の西岸沖合で、東西100kmスケールで発生する気候変動現象である。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。特に暖水を伴い発生するものをニーニョ現象、逆に冷水を伴うものをニーニャ現象と呼ぶ。アンゴラ・ナミビア沖合に発生するベンゲラ・ニーニョ/ニーニャ現象、オーストラリア西岸で発生するニンガルー・ニーニョ/ニーニャ現象、アメリカ・カリフォルニア沖合のカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャ現象、ダカール沖合で発生するダカール・ニーニョ/ニーニャ現象などが発見されている(図(1)-2)。本課題では、特に後者3つの沿岸ニーニョ/ニーニャ現象に注目し、その特性や予測可能性を調べた。



図(1)-2 様々な沿岸ニニヨ現象

c 最近数十年で頻発しているインドの熱波と寒波

南アジアのインドにおいて3月から6月にかけて発生する熱波と11月から2月の寒波の観測分布とその統計特性を調査した。

d SINTEX-F2季節予測システムの開発

研究代表者が本研究期間中に所長を務めたアプリケーションラボ（主たる前身は地球フロンティア研究システム気候変動予測領域）では、数ヶ月から数年スケールで発生する気候変動現象の解明ならびにその予測研究のため、1990年代後半からSINTEX-F大気海洋結合大循環モデルを日欧研究協力に基づき地球シミュレータを用いて開発および改良してきた。その第一版がSINTEX-F1季節予測システムであり、2005年にそのプロトタイプが完成して以来、主に熱帯域のエルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の予測において世界最高級の性能を発揮してきた。本課題では、このSINTEX-F1予測システムを使って、近年頻発して来た自然気候変動現象としてエルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象や、大陸西岸沖合で水平100kmスケールで発生する沿岸ニニヨ/ニニャ現象の予測可能性を調べた。

さらに季節予測の精度を向上させるためには、予測に使う大気海洋結合モデルの高度化と海洋観測データを予測モデルの初期値に取り込む同化手法の高度化の二つが同程度に重要であることが知られている。本課題でもこの二つの戦略で、予測システムの精度向上に挑戦した。

2) アジア-オセアニア域へのダウンスケーリング

オーストラリア周辺域と東南アジア域それぞれを対象に力学的ダウンスケーリングする技術を開発した。初期値や境界値として再解析データを使用し、領域モデルの性能テスト計算を繰り返し、ファインチューンすることで、最適な設定を決めた。

次にSINTEX-F2季節予測システムによる2000-2013年の過去再予測計算の6時間毎のアウトプットを入力し、ダウンスケーリング後の予測スキルを検証した。

3) アジア-オセアニア域の気候予測情報の社会応用研究

アジア-オセアニア域の気候予測情報を社会応用するために、農業、水管理、健康分野の専門家と連携し、気候サービスとして実現可能性が高いものが何かを調べた。特に(a) オーストラリアの小麦の豊凶予測と(b) マレーシアのパーム油生産予測がそれに当たることがわかった。

a オーストラリアの小麦の豊凶予測

オーストラリアは世界の主要な小麦輸出国の一つであり、世界の小麦取引の10～15%を占める。日本の小麦輸入の五分之一はオーストラリアからなので、日本の食糧安全保障の観点からも重要な穀物ともいえる。オーストラリアの小麦は主に冬小麦であり、4月頃に播種され、11月頃に収穫されるが、その収量は大きな年々変動をする。この変動は、主に小麦栽培時期の気象、特に降水量と地上気温によって支配される。したがって、この気象要素を数季節前に大気海洋結合モデルにより予測し、それを用いて年々の冬小麦収量変動が予測できれば、季節予測が世界の食料管理や安全保障に重要な役割を果たすことを実証することになる。

これまで熱帯太平洋におけるエルニーニョ現象がオーストラリアの気温と降水に強い影響を与えることから、冬小麦の収量にも大きな影響を及ぼすものと考えられてきた。エルニーニョ現象の発生時にはオーストラリアに大規模な干ばつが起きることが多いため小麦の収量が減り、逆にラニーニャ

現象の発生時にはオーストラリアの東部の降水量が増えることが多いために、小麦の収量も増えると思われてきた。そのためエルニーニョ現象の指標を使って、収量の年々変動を推定する研究が多くなされてきた。しかしエルニーニョ現象の影響は安定せず、「ビッグドライ」と呼ばれる1995以降のオーストラリアの深刻な干ばつはエルニーニョ現象によるものではなく、インド洋の正のダイポールモード現象に関わることが最近の研究で明らかになった。さらに、最近では地球温暖化に伴う海洋温暖化により典型的なエルニーニョ現象が少なくなる一方で新たに発見されたエルニーニョモドキ現象が増加し、インド洋では正のダイポールモード現象がより起きやすくなっている。

そこで、熱帯海洋に発生する3つの主要な気候現象がオーストラリアの冬小麦の収量にどのような影響を与えているのかについて正確に知る必要がある。気候変動現象がどのように穀物の収量に影響を与えるのかは農業に関わる人たちだけでなく、食糧安全保障の視点からも重要である。本研究では、気候と小麦の収量の観測データに基づいて、線形相関や線形回帰などの分析方法を使って、インド洋ダイポールモード現象、エルニーニョ現象、エルニーニョモドキ現象のなかでどの現象が最もオーストラリアの冬小麦に影響を与えているのかを調べた。更にSINTEX-F季節予測システム(1)を参照)を利用して、この影響を事前に予測することが可能であるかどうかを調べた。

b マレーシアのパーム油生産予測

東南アジアにおける気候予測情報の利活用のためのニーズを調べ、実現可能性の高い具体的な対象分野を、気候予測研究と連携して調査した結果、オイルパームから採れるパーム油生産が該当することを見出した。インドネシアとマレーシアは全世界のパーム油生産の約80%を担っている。特にマレーシアの生産量は、全世界生産の39%および世界の輸出量の44%を占めるため、生産量を予測することがマレーシアだけでなく全世界にとって重要である。そこで過去20年のマレーシアにおけるパーム油生産の年々変動と気候変動現象の関係を調べつつ、その予測モデルを開発した。

4. 結果及び考察

(1) 最近頻発し始めた新しい自然気候変動現象の予測とその社会応用

1) 地球規模で発生する気候変動現象の理解と予測

a エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象について

エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象には数十年スケール(interdecadal)で変動する成分があることを発見した。その位相逆転は1970年代後半から1990年代後半までの地球温暖化の見かけ上の強化や1990年代後半から最近までの地球温暖化の見かけ上の停滞と深く関連している。更に、1990年代後半からの熱帯太平洋南東部(エルニーニョモドキ現象の東の極)の大気海洋相互作用の不活性にも関連している。また、東南アジアの降水量を予測するためには、古典的なエルニーニョ現象の発生を予測することに加えて、エルニーニョモドキ現象の発生も予測する必要があることを明らかにした。

b 中緯度大陸西岸に現れる沿岸ニーニョ/ニーニャ現象について

ニンガルー・ニーニョ現象が最近になって頻発している理由を明らかにした。近年の地球温暖化傾向と太平洋数十年規模変動の負位相によって、オーストラリア西岸の海水の平均水温や海洋表層の蓄熱量が1990年代後半から急激に上昇している。それに伴い、オーストラリア西岸は緯度的に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・ニーニョの振幅を増幅させやすくなった。太平洋数十年規模変動の負位相が継続すれば、今後も極端に強いニンガルー・ニーニョが、極端な降水量増加を伴って頻発に発生する可能性が高い。一方、皮肉なことに、西オーストラリアの降水量はこのニンガルー・ニーニョからの直接的な影響が支配的になったので、1990年以降の極端な西オーストラリアの多雨傾向を数理的に予測し易くなった。

北太平洋西部亜熱帯域に発生する沿岸ニーニョ/ニーニャ現象であるカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャの予測可能性を調べたところ、エルニーニョ/ラニーニャ現象が同時発生し、それらがカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャ現象の発達に寄与しているイベントは予測可能であることを見出した。

西アフリカのダカール沖合の新たな沿岸ニーニョ現象を見出すことに成功した。ダカール・ニーニョと名付けられたその現象は、北西オーストラリア沿岸のニンガルー・ニーニョ/ニーニャやカリフォルニア沿岸のカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャなどと同様に局所的な大気海洋相互作用を伴って発達するため、近隣諸国の季節予測に影響を与えうることを世界で初めて指摘した。

c 最近数十年で頻発しているインドの熱波と寒波

3月から6月の間、インドでは2種類の熱波が発生する。第1のタイプの熱波は北部および中部インドで発生し、北大西洋上空のブロッキングと関連していることがわかった。一方で、インド東部の沿岸域上空での第2のタイプの熱波は、太平洋の低温偏差に対する、大気の松野-ギル型応答に起因することがわかった。

また、11月から2月にかけて発生するインドの寒波にも、2種類のタイプがあることを同定した。主要な第1タイプはインド全域を寒波が襲うが、第2タイプは主に北西部だけで起きる。面白いことに、第1成分はラニーニャ現象発生時に起きやすく、第2成分はエルニーニョ現象発生時に起きやすい。

d SINTEX-F2季節予測システムの開発

SINTEX-F1季節予測システムでは、エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象、ニンガルー・ニーニョ/ニーニャ現象の発生を約半年前から高い精度で予測可能であることを明らかにした。従来のシステムを高度化(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SINTEX-F2季節予測システムを開発し、季節予測精度を向上させることに成功した。特に、亜熱帯域で発生する大気海洋相互作用現象の予測精度が向上したことで、実社会に貢献する季節予測技術開発において新たな扉を開いた。

季節予測の精度を更に向上させるために、従来のSSTナッジング法に、海洋観測に基づいた3次元の水温/塩分データを同化する修正法(3DVAR補正)を加えた新たな初期値作成システムを開発し、初期化の精度を向上させた。その恩恵を受け熱帯インド洋や熱帯太平洋で季節予測精度が向上した。

2) アジア-オセアニア域へのダウンスケーリング

アジア-オセアニア域のそれぞれを対象として、SINTEX-F2季節予測システムで得られた気候予測情報を数10km-数km間隔で、力学的にダウンスケーリングする技術を開発し、過去再予測実験を実施した。システムティックなバイアス補正をして力学的ダウンスケーリングすることで降水量の予測精度を向上させることに成功した。

3) アジア-オセアニア域の気候予測情報の社会応用研究

a オーストラリアの小麦の豊凶予測

インド洋のダイポールモード現象がエルニーニョ現象や新たに発見されたエルニーニョモドキ現象よりも、オーストラリアの冬小麦の収量に圧倒的に大きな影響を及ぼすことを初めて明らかにした。更にSINTEX-F季節予測システムにより、インド洋ダイポールモード現象の指標をはじめとする気候変動指標を種まき前に予測できることから、穀物収量を事前にある程度予測可能であることも示した。一連の成果は季節予測モデルが食糧安全保障において重要な役割を担えることを実証したことになる。

b マレーシアのパーム油生産予測

ある年のマレーシアのパーム油の生産量変動を、その前年の12月からその年の2月で平均したエルニーニョ指標を使って予測する統計モデルを開発した。更に、ある年のマレーシアのパーム油の生産量変動を、地域の降水量、エルニーニョ指標、ニンガルー・ニーニョ指標を使って予測できることを明らかにした。

その他、関東地方における熱中症の防止に熱帯域の気候変動現象予測が間接的に利用できる可能性を示唆した。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

最近頻発している新しい気候変動現象であるエルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象や沿岸ニーニョ/ニーニャの発生メカニズムやその周辺国の気候への影響を調べた。特に、近年の地球温暖化傾向と、1990年代後半から2010年代前半まで続いた太平洋数十年規模変動の負位相によって、オーストラリア西岸の海水の平均水温や海洋表層の蓄熱量が急激に上昇しており、それに伴い、地域的な大気海洋相互作用が活性化され、極端に強いニンガルー・ニーニョ現象が頻繁に発生するようになったことが明らかになった。

SINTEX-F1季節予測システムを高度化(高解像度化、海水モデルの導入、海洋初期化システムの高度化など)した新たな予測システムSINTEX-F2を開発し、上記の気候変動現象の予測精度を向上させた。

更にその気候予測情報を、アジア・オーストラリア域のそれぞれに対して、領域大気モデルを使っ

て詳細化(力学的ダウンスケーリング)し、気温や降水量の予測精度を向上させた。

これらの予測情報をより社会に利活用しやすい形で提供するため、アジア・オーストラリア域の気候サービスとして実現可能性が高く、且つ影響が大きいものを調べた。その結果、オーストラリアの小麦の豊凶予測とマレーシアのパーム油生産予測に注目した。それらの経年変動を数ヶ月前から予測するシステムを開発し、気候サービスの基盤を整えた。一連の成果は季節予測モデルが食糧安全保障において重要な役割を担えることを実証したことになる。

上記の成果はいずれも科学的に最先端の知見であり、Nature社のオープンアクセス誌、アメリカ地球科学連合の国際学術誌、アメリカ気象学会の国際学術誌など、国際的に評価の高い学術誌で発表した(計12本)。また、国内外の学会やシンポジウムで積極的に発表した(50件以上)。

さらに、本課題に対する「国民との科学・技術対話」に資するため、一般公開シンポジウムやWebを通じた成果・情報発信、プレスリリース、一般向け講義なども積極的に行った。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

IGSU(国際科学会議)のROAP(アジア太平洋地域事務所)と連携し、Future Earth計画の一環として推進中のSustainability Initiative in the Marginal Seas of South and East Asia (SIMSEA)計画において、本課題の成果の一つである気候予測とその社会応用を紹介した。SIMSEAはFuture Earthのアジア太平洋地域公式プロジェクトとして認定されている。その結果、フィリピン大学、海洋科学研究所(ケソン市)に設置したSIMSEAプロジェクトオフィスのサイトから本課題の成果物である季節予測情報を世界に配信中である。アジア太平洋地域環境政策へ大きく貢献した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

内閣府宇宙戦略室 宇宙システム海外展開戦略の策定調査 ブラジル検討会においても本研究が進める季節予測が世界各地の防災対策などに有効なことを示した。その他、政策関係者が参加した会議で、プロジェクト成果の発表を多数実施し、今後の発展が期待される。特に、オーストラリア小麦の収量予測は食料安全保障に貢献できることが期待される。例えば、本プロジェクトで開発された予測システムでは2017年の不作が懸念される。更に、マレーシアのパーム油の生産予測が気候サービスとして展開可能であることを世界で初めて示した。国際的に権威ある学会やシンポジウムなどの基調講演、招待講演などで、プロジェクト成果の発表を多数実施した。上記の、IGSU(国際科学会議)のROAP(アジア太平洋地域事務所)と連携した、Future Earth計画の一環として推進中のSIMSEA計画にも、更なる貢献が期待できる。

6. 研究成果の主な発表状況 (※別添. 報告書作成要領参照)

(1) 主な誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) A. Takaya, Y. Morioka and S. K. Behera: Scientific Reports, 5655, (2015) "Role of climate variability in the heatstroke death rates of Kanto region in Japan"
- 2) C. Tsai, S. K. Behera, and T. Waseda: Scientific Reports, 8107, (2015) "Indo-China Monsoon Indices"
- 3) T. Doi, S. K. Behera, and T. Yamagata: J. Geophys. Res. Oceans, 120, 1388-1396 (2015) "An interdecadal regime shift in rainfall predictability related to the Ningaloo Niño in the late 1990s"
- 4) C. Yuan, and T. Yamagata: Scientific Reports, 17252, (2015) "Impacts of IOD, ENSO and ENSO Modoki on the Australian Winter Wheat Yields in Recent Decades"
- 5) T. Doi, C. Yuan, S. K. Behera, and T. Yamagata: Journal of Climate, 28, 7237-7249 (2015) "Predictability of the California Niño/Niña"
- 6) P. Oettli, Y. Morioka, and T. Yamagata: Scientific Reports, 18782, (2016) "A Regional Climate Mode Discovered in the North Atlantic: Dakar Niño/Niña"
- 7) T. Doi, S. K. Behera, and T. Yamagata: Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 8, 1847-1867 (2016) "Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model"
- 8) J. V. Ratnam, S.K. Behera, S.B. Ratna, M. Rajeevan and T. Yamagata: Scientific Reports, 24395, (2016) "Anatomy of Indian heatwaves"

- 9) J. V. Ratnam, S.K. Behera, H. Annamalai, S.B. Ratna, M. Rajeevan and T. Yamagata: Scientific Reports, 37657, (2016) “ENSO’s far reaching connection to Indian cold waves”
- 10) S. B. Ratna, J.V. Ratnam, S.K. Behera, F.T. Tangang and T. Yamagata: Climate Research, 71, 263-280 (2017) “Validation of the WRF regional climate model over the subregions of Southeast Asia: climatology and inter annual variability”
- 11) J. V. Ratnam, T. Doi and SK Behera: J. Climate, 30, 3219-3235 (2017) “Dynamical downscaling of SINTEX-F2v CGCM seasonal retrospective austral summer forecasts over Australia”
- 12) C. Tanizaki, T. Tozuka, T. Doi, and T. Yamagata: Climate Dynamics (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” (in press)

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

(2) 主な口頭発表 (学会等)

50件以上の中から招待講演や主要なもの抜粋

- 1) C. Tsai, S. Behera and T. Waseda: Asia Oceania Geosciences Society 2014, Sapporo, Japan, 2014 “The Role of ENSO, IOD and EMI in South East Asia’s Precipitation”
- 2) T. Doi, S. Behera and T. Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2014, Sapporo, Japan, 2014 “A Drastic Change in Predictability of Precipitation Off the West Coast of Australia After Late 1990s”
- 3) Y. Morioka, K. Takaya, S. Behera and Y. Masumoto: Asia Oceania Geosciences Society 2014, Sapporo, Japan, 2014 “Local SST Impacts on the Summertime Mascarene High variability”
- 4) T. Yamagata: The World Weather Open Science Conference 2014, Montreal, Canada, 2014 “New climate modes and their predictability”
- 5) 土井 威志, Swadhin Behera, 山形 俊男: 日本海洋学会 2014年秋季大会, “ニンガルーニーニヨ域での降水量の予測可能性が1990年代後半から劇的に変化している”
- 6) T. Doi, S. Behera and T. Yamagata: American Geophysical Union Fall meeting 2014, San Francisco, U.S., 2014 “A Dramatic Regime Shift in Rainfall Predictability Related to the Ningaloo Niño/Niña in the Late 1990s”
- 7) S. Behera, C. Tsai, Y. Morioka, T. Doi, V. Ratnam and T. Yamagata: American Geophysical Union Fall meeting 2014, San Francisco, U.S., 2014 “The Non-Linear Interplay Among ENSO, ENSO Modoki, IOD and Monsoon”
- 8) C. Tsai, S. Behera, T. Waseda and F. Tangang: American Geophysical Union Fall meeting 2014, San Francisco, U.S., 2014 “The Relative Influences of ENSO Conventional, ENSO Modoki and Indian Ocean Dipole on Mindanao and Northeastern Borneo Precipitation Anomaly”
- 9) C. Yuan and T. Yamagata: American Geophysical Union Fall meeting 2014, San Francisco, U.S., 2014 “A Regional Air-Sea Coupled Mode in the Coastal Ocean Off California and Baja California”
- 10) P. Oettli, Y. Morioka, T. Doi and T. Yamagata: American Geophysical Union Fall meeting 2014, San Francisco, U.S., 2014 “A Coastal Niño/Niña Phenomenon Off the Coast of Senegal (West Africa)”
- 11) V. J. Ratnam, S. Behera, T. Doi, P. Oettli and T. Yamagata: Japan Geoscience Union 2015 Meeting, Makuhari, Japan, 2015 “High resolution WRF downscaling of the SINTEX-F1 CGCM seasonal forecasts over the Kanto region”
- 12) T. Doi, S. K. Behera, and T. Yamagata: Japan Geoscience Union 2015 Meeting, Makuhari, Japan, 2015 “2014年エルニーニョの急激な衰退と予測について” (招待講演)
- 13) T. Yamagata, International Symposium on Tropical Ocean and Climate, Qingdao, China, 2015 “Coastal Niño/Niña and its predictability” (Invited)
- 14) T. Yamagata, and Collaborators, Prince Albert I Memorial Lecture, IAPSO General Assembly, 26thIUGG, Prague, Czech, 2015 “New Climate Modes and Their Predictability”

- 15) J. V. Ratnam, Takeshi Doi, Swadhin K. Behera, S. B. Ratna, Toshio Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2014, Singapore, 2015 “Value addition of WRF downscaling to SINTEX-F2 forecasts” (Invited)
- 16) J. V. Ratnam, Takeshi Doi, S. K. Behera, S. B. Ratna and Toshio Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2015, Singapore, 2015 “Improvements to the SINTEX-F2 Seasonal Hindcasts Over Australia by WRF Downscaling”
- 17) S. B. Ratna, J. V. Ratnam, S. K. Behera, Fredolin T. Tangang, T. Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2015, Singapore, 2015 “Downscaling climate variability over Southeast Asia using WRF model”
- 18) S. B. Ratna, J. V. Ratnam, S. K. Behera, T. Yamagata: Tropical Precipitation System Workshop 2015, Yokohama, Japan, 2015 “Downscaling seasonal climate variability over Southeast Asia and its association with the large-scale climate modes”
- 19) T. Yamagata: 11th Association of Pacific Rim Universities – Multi-Hazards around the Pacific Rim, Quezon, Philippines, 2015 “Prediction of Indo-Pacific Climate Modes for Mitigation and Preparedness of the Multi-Hazards” (Keynote)
- 20) T. Yamagata: Seminar at Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand, 2015 “Challenges for a Sustainable World under a Planetary Boundary”
- 21) T. Doi, S. K. Behera, and T. Yamagata: Ocean Sciences Meeting 2016, New Orleans, U. S., 2016 “An interdecadal regime shift in rainfall predictability related to the Ningaloo Niño in the late 1990s”
- 22) P. Oettli, Y. Morioka, and T. Yamagata: Ocean Sciences Meeting 2016, New Orleans, U. S., 2016 “A Regional Climate Mode Discovered in the North Atlantic: Dakar Niño/Niña”
- 23) Y. Morioka, F. Engelbrecht, S. K. Behera: Ocean Sciences Meeting 2016, New Orleans, U. S., 2016 “Role of Antarctic Circumpolar Current in Decadal Climate Variability over Southern Africa”
- 24) Ratna, S. B., J. V. Ratnam, S. K. Behera, Fredolin T. Tangang, T. Yamagata: The International Science Conference on Monsoon Asian Hydro-Atmosphere Scientific Research and Prediction Initiative, Tokyo, Japan, 2016 “Downscaling Southeast Asian Summer Monsoon climate using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model”
- 25) 土井威志, Swadhin K. Behera, 山形俊男: 日本海洋学会2016年度春季大会, 2016 “SINTEX-F2季節予測システムについて”
- 26) 山形俊男: 日本学術会議第23第6回地球・人間圏分科会, 2016年 “SIMSEAについて”
- 27) T. Yamagata and Collaborators: OCEANS 16 MTS/IEEE, Shanghai, China, 2016 “New Climate Modes and Rich Applicability of Seasonal Climate Prediction” (Keynote)
- 28) T. Yamagata: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Makuhari, Japan, 2016 “Geoscience and Society – The Era of Mega-Disaster: What We Can Do for the Society” (Panelist)
- 29) T. Doi, S. K. Behera, T. Yamagata: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Makuhari, Japan, 2016 “SINTEX-F2 seasonal prediction system”
- 30) T. Doi, G. Yuan, S. K. Behera, T. Yamagata: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Makuhari, Japan, 2016 “Predictability of the California Niño/Niña”
- 31) T. Yamagata: 21st Century Trilateral Maritime Cooperation –US–Japan–Australia Maritime Security Conference–, Canberra, Australia, 2016 “Challenges for Sustainable World under Recent Advancement in Ocean and Climate Prediction”
- 32) T. Doi, S. K. Behera, T. Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2016, Beijing, China, 2016 “The SINTEX-F2 seasonal prediction system” (Invited)
- 33) T. Doi, S. K. Behera, T. Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2016, Beijing, China, 2016 “Coastal Niño prediction”
- 34) J. V. Ratnam, T. Doi, S. K. Behera, S. B. Ratna and T. Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2016, Beijing, China, 2016 “Improvements to SINTEX-F2 seasonal retrospective forecasts using WRF model”
- 35) T. Doi, A. Storto, S. K. Behera, T. Yamagata: 2016年度海洋学会秋季大会, 2016 “海洋垂表層観測データを用いた初期値補正とインド洋ダイポールモード現象の予測精度向上について”

- 36) T. Yamagata: SIMSEA Regional Symposium 2016, Diliman Quezon City, Philippines, 2016
“Asia-Pacific Challenge for a Sustainable World under a Planetary Boundary (Keynote)”
- 37) T. Yamagata: AASSA-NAST PHL Workshop on the Role of Science Academies in Sustainable Development in conjunction with the 2016 Climate Conference on Addressing Climate Risk for Sustainable Development, Tagaytay City, Philippines, 2016 “Prediction of Climate Variation and its Rich Application to Societies for Sustainable Development” (Keynote)
- 38) T. Yamagata: Workshop for modeling and prediction of climate variability and change and its social applications, Aizu, Japan, 2016 “Necessity of Network-Based Marine Crisis Watch and Prediction for Knowledge to Operate”
- 39) T. Yamagata: Workshop on Western Pacific Ocean Circulation and Climate—Past, Present, and Future, Qingdao, China, 2016 “Prediction of Climate Variation and its Rich Application to Societies for Sustainable Development”
- 40) 山形俊男: 温暖化・海洋酸性化の研究と対策に関する国際会議～西太平洋におけるネットワーク構築に向けて～, 2017 “Future Earth/SIMSEAと海洋危機ウォッチ”
- 41) 山形俊男: 宇宙学セミナー、京都大学宇宙総合学研究ユニット, 2017 “気候変動予測と持続可能な開発に向けた社会応用”
- 42) 山形俊男: 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「陸と海と人と一里海」, 2017 “Future EarthとSIMSEA: アジア太平洋地域の人間安全保障への貢献”

7. 研究者略歴

課題代表者: 山形 俊男

東京大学理学部卒業、理学博士、現在、海洋研究開発機構 アプリケーションラボ
特任上席研究員

研究分担者

1) 土井 威志

東京大学理学部卒業、理学博士、現在、海洋研究開発機構 アプリケーションラボ 研究員

2) Behera K. Swadhin

Berhampur大学理学部卒業、理学博士、現在、海洋研究開発機構 アプリケーションラボ
ラボ所長

3) Jayanthi V. Ratnam

インドPune大学理学博士、現在、海洋研究開発機構 アプリケーションラボ 主任研究員

4) 袁 潮霞

東京大学理学部卒業、理学博士、海洋研究開発機構 アプリケーションラボ
ポストドクトラル研究員、現在、南京信息工程大学准教授

5) 佐久間 弘文

カリフォルニア大学理学博士号、2017年3月海洋研究開発機構を退職

2-1405 最近頻発し始めた新しい自然気候変動現象の予測とその社会応用

(1) 最近頻発し始めた新しい自然気候変動現象の予測とその社会応用

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

山形 俊男

土井 威志・Behera K. Swadhin・

Jayanthi V. Ratnam・袁 潮霞・

佐久間弘文

<研究協力者>

Satyaban Ratna・Pascal Oettli

平成26(開始年度)～28年度累計予算額：80, 335千円（うち平成28年度：23, 623千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

近年、地球温暖化の影響を強く受けて、新たな気候変動現象が頻発し始めた。熱帯太平洋では研究代表者が命名したエルニーニョモドキやラニーニャモドキなる現象が頻発している。世界各地への影響もこれまでの現象とは著しく異なる。加えて、研究代表者らは、最近、中緯度の大陸西岸に沿岸ニーニョ/ニーニャなる地域気候変動現象が発生することを見出した。例えば、2011年2月、オーストラリア西岸域の海水温は過去に先例の無いほど異常に暖まり、周辺の珊瑚礁・漁業・農業に甚大な被害を与えた。この現象はニンガルー・ニーニョと名づけられた。

本研究では、まず、上記の最近頻発している新しい気候変動現象の発生メカニズムやその周辺国の気候への影響を調べた。特に、近年の地球温暖化傾向と、1990年代後半から2010年代前半まで続いた太平洋数十年規模変動の負位相によって、オーストラリア西岸の海水の平均水温や海洋表層の蓄熱量が急激に上昇しており、それに伴い、地域的な大気海洋相互作用が活性化され、極端に強いニンガルー・ニーニョが頻繁に発生するようになったことが明らかになった。更に、SINTEX-F季節予測システムを高度化(高解像度化、海氷モデルの導入、海洋初期化システムの高度化など)した新たな予測システムSINTEX-F2を開発し、エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキや沿岸ニーニョ/ニーニャ現象の予測精度を向上させた。

更にその気候予測情報を、アジア-オセアニア域のそれぞれに対して、領域大気モデルを使って詳細化(力学的ダウンスケーリング)し、気温や降水量の予測精度を向上させた。

これらの予測情報をより社会に利活用しやすい形で提供するため、アジア-オセアニア域の気候サービスとして実現可能性が高く、且つ影響が大きいものを調べた。その結果、オーストラリアの小麦の豊凶予測とマレーシアのパーム油生産予測に注目した。それらの経年変動を数ヶ月前から予測するシステムを開発し、気候サービスの基盤を整えた。

[キーワード] エルニーニョモドキ現象、沿岸ニーニョ現象、アジア域、オセアニア域、気候変動予測サービスの可能性

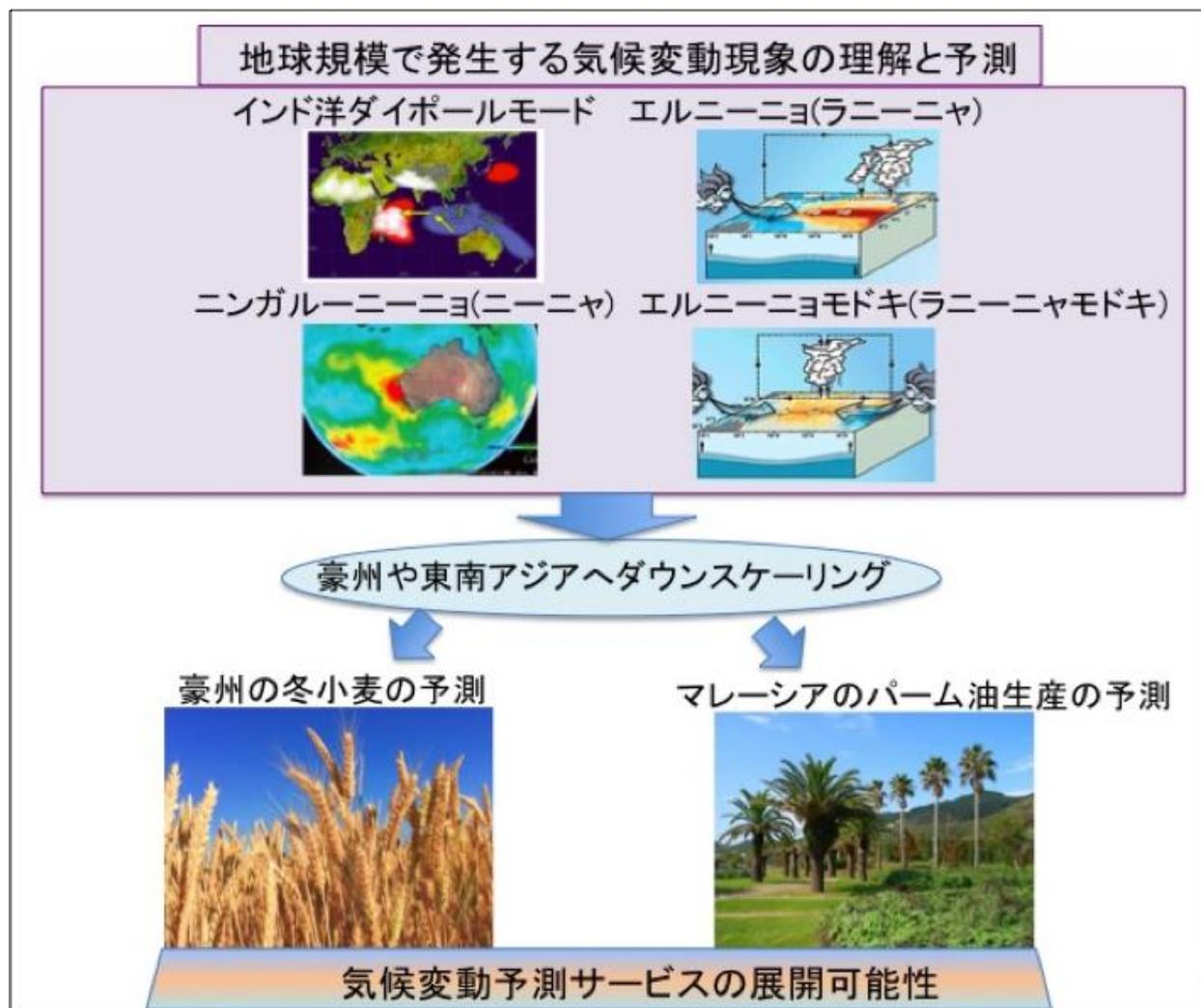
1. はじめに

ゆるやかに一方向に進む気候変化 (climate change) とはるかに大きな振幅で変動する気候変動 (climate variations) の二つの用語をわが国では混同して使うことが多い。両者は別な概念である。二酸化炭素やメタンなどの温暖化気体の濃度が徐々に増大していることに対応して、対流圏の気温や海水温が徐々に上昇しているのは気候変化の代表的なものといえる。確実に進行する海洋酸性化も海の気候変化の代表的なものである。一方、数年ごとに発生を繰り返し、世界各地に異常気象を引き起こすエルニーニョ現象やラニーニャ現象は気候変動の代表的なものである。

「エルニーニョ現象は気候変動ではない」という意味不明の和訳が見られることがあるが、これは正確には「エルニーニョ現象は気候変化ではない」ということである。変化 (change) と変動 (variations) の概念の相違を正しく認識することは対応策においても重要である。私たちの日常生活に直接的に影響する猛暑、厳冬、洪水、干ばつなどの異常気象や極端現象が世界各地で頻発しているのは、地球温暖化がそうした気候変動現象により大気と海洋の大循環に影響を与えているためである。地球温暖化と海洋起源の気候変動現象の相互関係の解明と、社会活動や産業活動に直接的に貢献する気候変動予測システムの実用化に向けた技術開発が対応策、適応策の面からも極めて重要になって来ている。

近年、地球温暖化や数10年規模変動の影響を強く受けて、気候変動現象そのものが変質し、新たな気候変動現象が頻発し始めた。熱帯太平洋では研究代表者が命名したエルニーニョモドキやラニーニャモドキなる現象が頻発している (Ashok et al. 2007; Ashok and Yamagata 2009)。世界各地への影響もこれまでの現象とは著しく異なる (Weng et al. 2007; Weng et al. 2009a; 2009b)。加えて、研究代表者らは、最近、中緯度の大陸西岸に沿岸ニーニョ/ニーニャなる地域気候変動現象が発生することを見出した。例えば、2011年2月、オーストラリア西岸域の海水温は過去に先例の無いほど異常に暖まり、周辺の珊瑚礁・漁業・農業に甚大な被害を与えた。この現象はニンガルー・ニーニョと名づけられた (Feng et al. 2013; Kataoka et al. 2014)。

これら最近頻発している新しい気候変動現象は我が国のみならず世界中の最近頻発してきた未曾有の極端現象との関連が示唆されている。本研究では、それらの発生メカニズムやその周辺国の気候への影響を解明し、SINTEX-F1季節予測システムや新たな予測システムを用いて、その予測精度を向上させる。更にその予測情報をアジア-オセアニア域に対し、力学的ダウンスケーリング手法を用いて詳細化し、農業等の実社会活動に応用する気候サービスのプロトタイプを確立させる。本課題のフローチャートは図(1)-1にまとめた。



図(1)-1 本課題のフローチャート

2. 研究開発目的

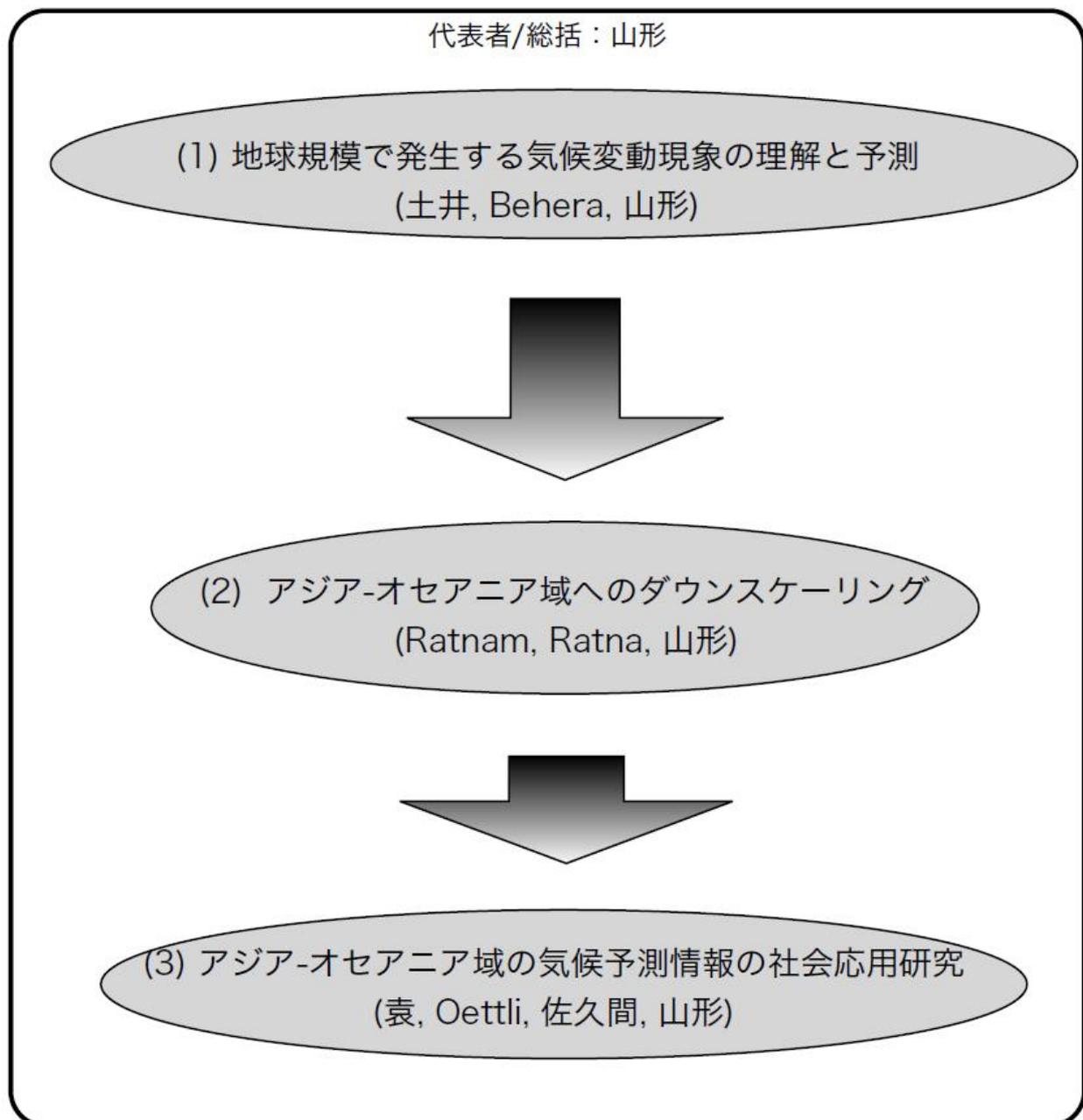
本研究では、近年頻発してきた気候変動現象に関する基礎的なメカニズムの解明から、その予測技術の高度化と精度の向上、更には予測情報の利活用まで、一連の研究開発を総合的に目指す。具体的には、以下の三つの項目から構成される。

- (1) 太平洋熱帯域のエルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象や、中緯度大陸西岸に現れる沿岸ニーニョ/ニーニャ現象のメカニズムを解明し、その予測可能性を検証する。特にここ15年はラニーニャモドキ現象やニンガルーニョ現象が頻発しているので、その実態を解明する。こうした現象が10年規模変動の位相の違いや地球温暖化そのものどどのように関係するのか、また地域の異常気象にどのような影響をもたらすのかを、最新の観測データやEUと共同開発した大気海洋結合モデルSINTEX-Fを使って調べる。また既に運用しているSINTEX-Fをベースとした季節予測システムを用いてそれらの予測可能性を総合的に検証する。更に、SINTEX-Fモデルの高解像度化や初期化手法を改良し、それらの予測精度を向上させる。
- (2) 上記の地球規模の予測情報を、地域規模へと力学的にダウンスケーリングし、実社会活動に利活用しやすいようにする。特に数km間隔で、湿度、気温、日射量等を適切にダウンスケーリン

ができるよう、地域の複雑な地形データを組み込み、観測値と検証しながら、その技術開発を行う。エルニーニョモードキ/ラニーニャモードキ現象やニンガルニーニョ/ニーニャ現象の影響を受けやすいアジア-オセアニア地域に対して開発を進める。

- (3) 実社会活動に具体的に予測情報を利活用するために、アジア-オセアニア域における感染症、農業、水資源管理などを対象に、気候サービスのプロトタイプを構築する。本研究を通して、インド-太平洋域の熱帯域および亜熱帯域の気候変動予測とその応用研究において、国際的なリーダーシップを発揮する。

本研究の研究体制は図(1)-2でまとめた。



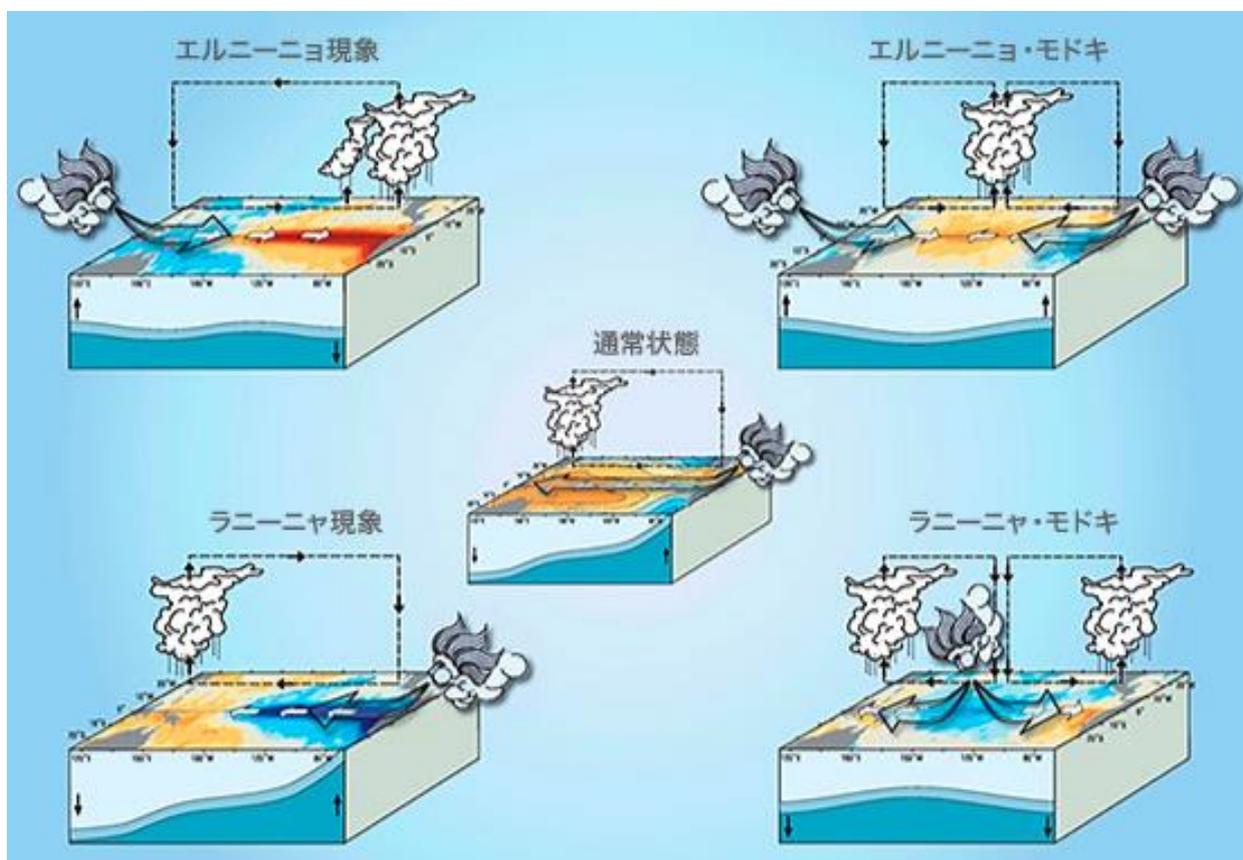
図(1)-2 本課題の研究体制

3. 研究開発方法

(1) 地球規模で発生する気候変動現象の理解と予測

1) エルニーニョ・モドキ/ラニーニャ・モドキ現象について

古典的なエルニーニョ現象が発生すると、東太平洋赤道域が平年より異常に暖くなるのに対して、エルニーニョ・モドキ現象が発生すると、中央太平洋赤道域が異常に暖まり、西部及び東部の太平洋赤道域が異常に冷たくなる(図(1)-3。Ashok et al. 2007; Ashok and Yamagata 2009)。世界各地への影響もこれまでの現象とは著しく異なることが知られている(Weng et al. 2007; Weng et al. 2009a; 2009b)。例えば、エルニーニョ現象が発生するとアメリカ西海岸で雨が多くなるが、エルニーニョ・モドキ現象が発生すると、雨が少なくなる。また、インドや南アフリカの降水にも影響を及ぼすことが知られている。さらには、中央太平洋の島々や、カリフォルニア沖、インド洋の南西部など、離れた地域の海面水位に影響を与えることが報告されている。



図(1)-3 エルニーニョ現象(左上)、ラニーニャ現象(左下)、及びそれらのモドキ現象(右上、右下)にともなう海面水温の偏差の模式図。中央は熱帯太平洋の水温分布の平年値(Ashok and Yamagata 2009)

Ashok et al. (2007) は海面水温偏差に現れるエルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象を捉えるために、エルニーニョモドキ指標 (EMI) を考案した。

$$EMI = SSTA_{BOX-A} - 0.5 * SSTA_{BOX-B} - 0.5 * SSTA_{BOX-C}$$

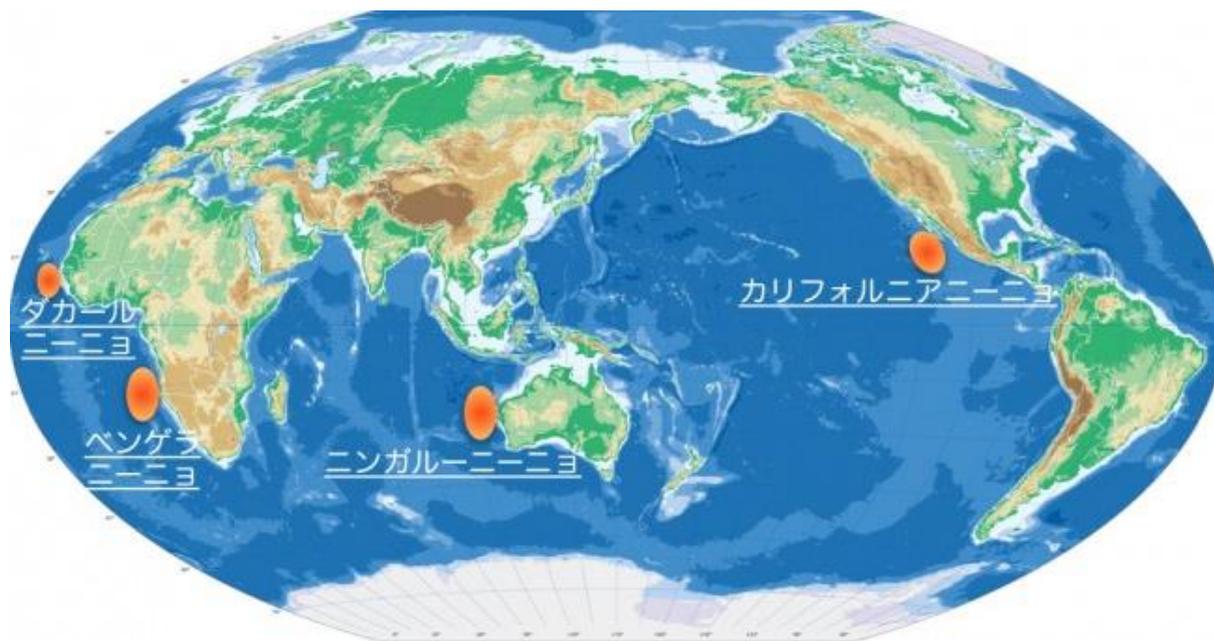
右辺の3つの項は領域 A(165°E-140°W, 10°S-10°N)、B(110°W-70°W, 15°S-5°N)、C(125°E-145°E, 10°S-20°N)のそれぞれの領域平均した海面水温偏差を表す。

本課題では、この現象の実態を捉えるため、エルニーニョモドキ指標 EMI に対してウェーブレット周波数解析を行った。この解析では、フーリエ周波数解析のように周波数特性を求める際に失われる時間領域の情報を残すことができる。更にその結果をもとに、最も卓越するエルニーニョモドキの空間特性を経験的直行関数 (EOF) 解析によって抽出し、近年の地球温暖化の見かけ上の停滞との関係を調べた。更に大気海洋相互作用との関連性について、観測から得られた海面水温と降水量の相関係数を計算して調べた。

エルニーニョモドキは古典的なエルニーニョと比べて世界各地への影響も著しく異なることが報告されている。本課題で注目するアジア-オセアニア域にどのように影響を与えるのか観測データを用いた統計解析によって明らかにした。それぞれの影響は、課題(3) アジア-オセアニア域の気候予測情報の社会応用研究とも合わせて議論する。

2) 中緯度大陸西岸に現れる沿岸ニーニョ/ニーニャ現象について

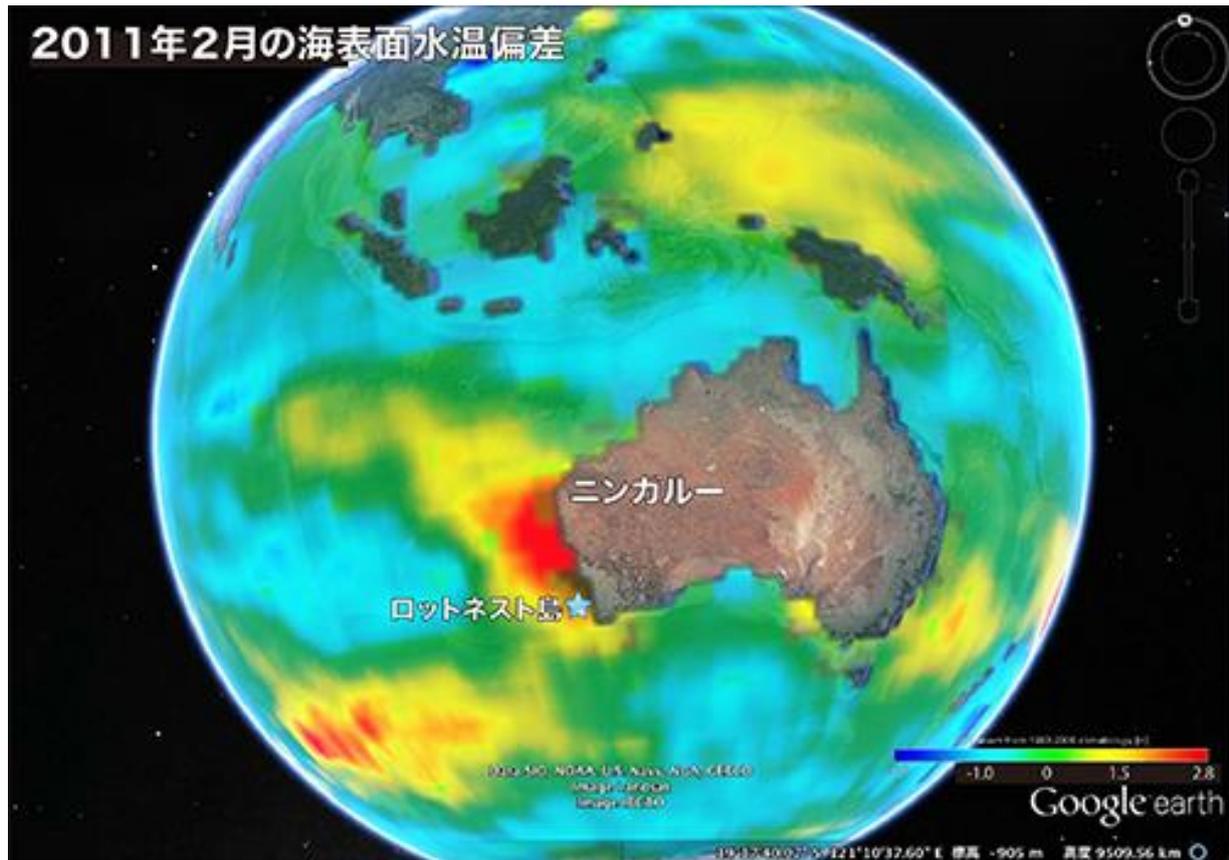
沿岸ニーニョ現象とは、大陸の西岸沖合で、東西100kmスケールで発生する気候変動現象である。大気海洋相互作用を伴い発達するため、近隣国の気候や海洋生態系に多大な影響を与える。特に暖水を伴い発生するものをニーニョ現象、逆に冷水を伴うものをニーニャ現象と呼ぶ。アンゴラ・ナミビア沖合に発生するベンゲラ・ニーニョ/ニーニャ現象 (Florenchie et al. 2003; Richter et al. 2010など)、オーストラリア西岸で発生するニンガルー・ニーニョ/ニーニャ現象 (Feng et al. 2013; Kataoka et al. 2014など)、アメリカ・カリフォルニア沖合のカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャ現象 (Yuan and Yamagata, 2014)、ダカール沖合で発生するダカール・ニーニョ/ニーニャ現象 (Oettli et al. 2016) などが発見されている (図(1)-4)。本課題では、特に後者3つの沿岸ニーニョ/ニーニャ現象に注目した。



図(1)-4 様々な沿岸ニーニョ現象

a ニンガルー・ニーニョ/ニーニャ現象について

中緯度大陸西岸に現れる沿岸ニーニョ/ニーニャ現象の一つであり、オーストラリア西岸で発生するニンガルー・ニーニョ/ニーニャ現象(オーストラリア西岸域の海水温が平年に比べて異常に暖まる/冷たくなる現象。図(1)-5)は近年頻発してきた気候変動現象の代表的なものの一つである。本課題で注目するアジア-オセアニア域にとっても重要な沿岸ニーニョ現象である。研究代表者らが開発したSINTEX-F1季節予測システム(Luo et al. 2005)では、過去30年のニンガルー・ニーニョおよびニーニャの発生を約半年前から予測可能であることを明らかにしたが(Doi et al. 2013)、オーストラリアの降水量との関係性についてはよくわかっていない。また本現象が何故最近に頻発するようになったのかもよくわかっていない。そこで、1990年代後半以前と以後で、本現象が関わる大気海洋相互作用がどのように変化したのかを、観測から得られた海面水温と降水量の相関係数を計算して調べた。またその変化に伴い、オーストラリアの降水量予測可能性がどのように変化したのかを調べた。

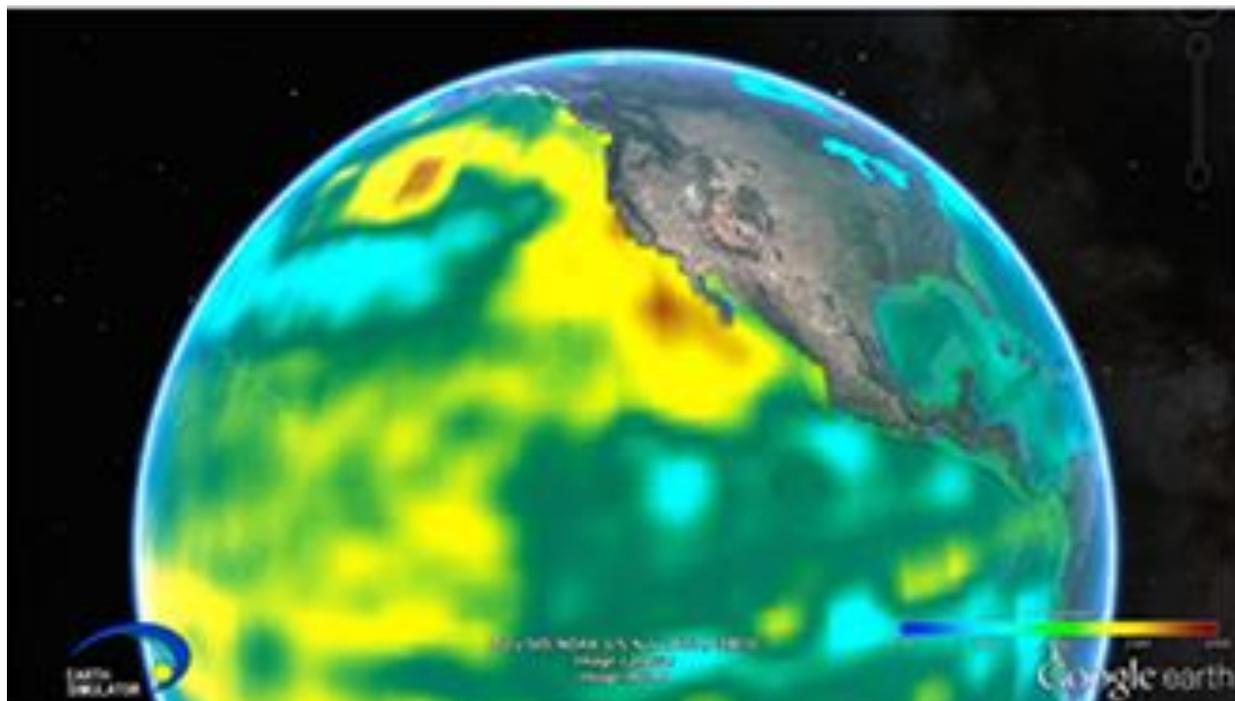


図(1)-5 観測された2011年2月の海面水温偏差(°C)。1983-2006年の平均値からの差。アメリカ海洋大気局NOAAによるOISSTv2観測データを使用。オーストラリア西岸ニンガルー沖で海水温が異常に暖まっており、ニンガルー・ニーニョが発生している。

(描画ソフトはJAMSTEC地球シミュレータセンターで開発されたVDVGEを使用
<http://www.jamstec.go.jp/esc/research/Perception/vdvge.ja.html>)。

b カリフォルニア・ニーニョ/ニーニャ現象について

中緯度大陸西岸に現れる沿岸ニーニョ/ニーニャ現象の一つであるカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャ現象(カリフォルニア半島沖合の海水温が平年に比べて異常に暖まる/冷たくなる現象)も近年頻発してきた気候変動現象である(図(1)-6)。例えば2014年の2月、カリフォルニア・ニーニョ現象とラニーニャ現象の同時発生の影響を受け、カリフォルニア州は記録的な早魃に見舞われた。更に2014年5月からはカリフォルニア・ニーニョ現象が発生し、カリフォルニア州は多雨傾向になった。このようなカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャ現象の予測可能性についても、aのニンガルー・ニーニョ/ニーニャ現象と同様に調べた。



図(1)-6 観測された1991年7月の海面水温偏差(°C)。1983-2006年の平均値からの差。アメリカ海洋大気局NOAAによる OISSTv2観測データを使用。カリフォルニア半島沖合が平年より暖かく、カリフォルニア・ニーニョが発生している。

c ダカール・ニーニョ/ニーニャ現象について

本課題では、アジア-オセアニア域において重要な北西オーストラリア沿岸のニンガルー・ニーニョ/ニーニャにまず注目した。この沿岸ニーニョ現象をさらに深く理解するため、他の各沿岸ニーニョ現象との相違性および類似性を研究した。その過程で、新たな沿岸ニーニョ現象を見出すことに成功した。ダカール・ニーニョと名付けられたその現象は、西アフリカのダカール沖合の海水温が平年より異常に温まる現象である。そのメカニズムを解明するため、1982年から2011年までの過去30年間の観測データと再解析データを解析し、ダカール沿岸で海面水温が最も大きく変動する海域を特定するとともに、領域平均した海面水温と南北風の標準偏差(平年値からのずれ)を月ごとに調べた。

3) 最近数十年で頻発しているインドの熱波と寒波

3月から6月の間、南アジアのインドは熱波の影響を強く受ける。最近数十年の強い熱波の増加は、主に地球温暖化が原因とされてきた。熱波は人間の死亡率に重大な影響を与えるため、これらの熱波の根本的な原因を解明する必要がある。最高気温の変動に関する観測分布と統計解析(コンポジット解析、回帰解析、EOF解析など)に基づき、2種類の熱波を同定した。

また、11月から2月にかけてはインドは寒波の影響を強く受ける。最低気温の変動に関して、熱波と同様に観測分布と統計解析を実施した結果、2種類の寒波を同定した。

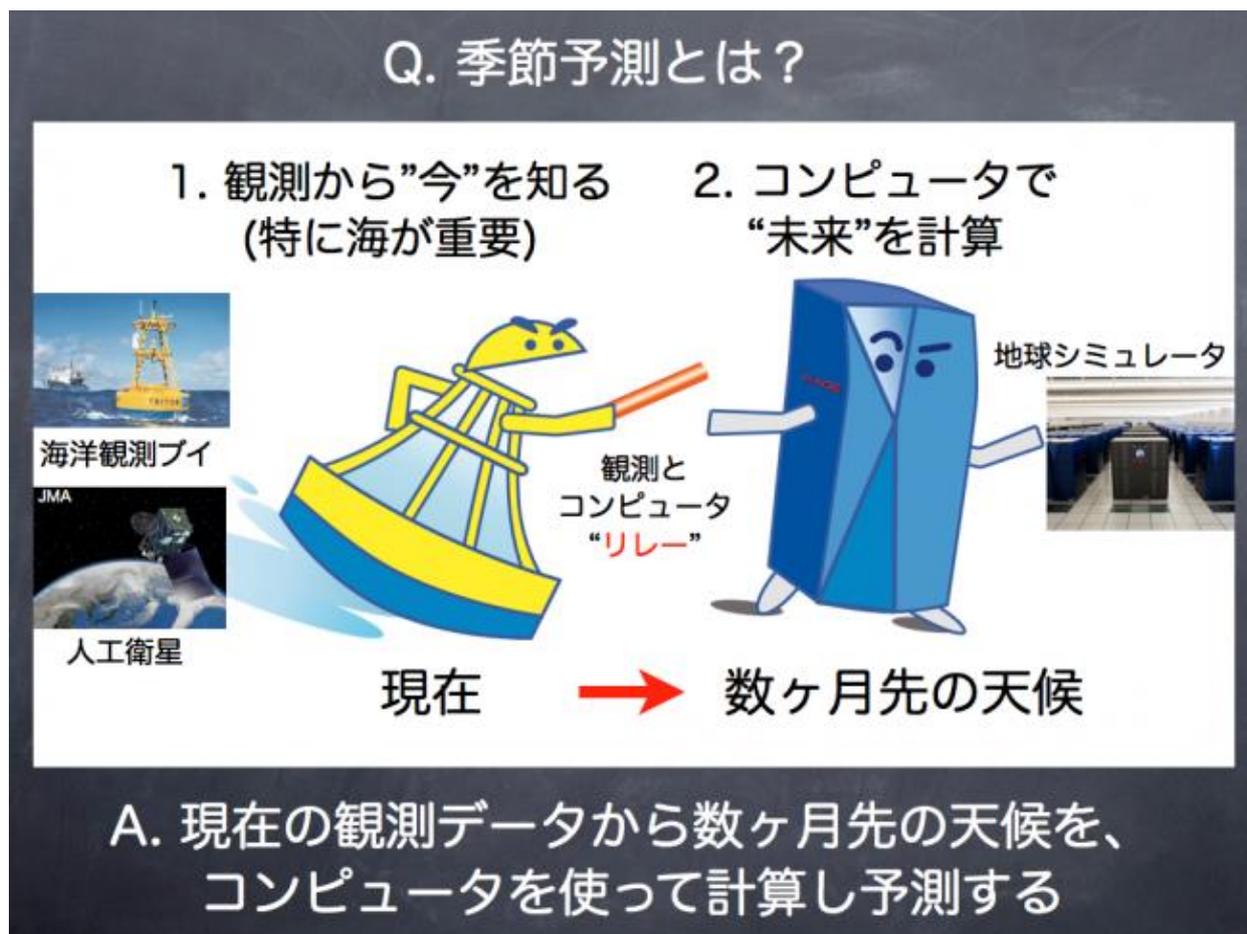
4) SINTEX-F2季節予測システムの開発

季節的な異常（例えば冷夏、猛暑、暖冬、厳冬など）を数ヶ月前から事前に予測することを“季節予測”と呼ぶ。日々の“天気”（晴れ、雨、日最高気温など。英訳weather）を予測する天気予報と大きく違う点は、天気の集合体（あるいは統計量）である“気候”（英訳climate）が予測の対象である点である。例えば、天気予報の例は、“3日後に、都内で雨が降るか？”で、季節予測の例は“3ヶ月後に、都内の月平均降水量が平年より多いか？”である。季節予測を高精度に実現できれば、作物の豊凶予測、熱中症などの健康被害対策、水管理、レジャー、アイスクリームやビールの生産管理にまで、幅広い豊かな社会応用可能性がある。本課題の(2), (3)では特定地域に対し季節予測情報を詳細化し、その予測情報を社会に利活用するための研究を実施する。ここではその上流部分に当たる全地球の季節異常を、コンピューターを使って数理的に予測するシステムの説明とそれを戦略的に高度化する開発方法について説明する。

現在の科学技術では、天気予報が実用的に利用されるのはせいぜい1週間程度先までである。にもかかわらず、数ヶ月先の季節の変動を予測することは可能なのか？その鍵を握るのが海である。海は大気よりも大きな熱容量をもち、ゆっくりと変動する。冬に利用する湯たんぽを想像してもらえれば、水が冷めにくいことが容易に想像できるかと思う。海の水温異常が、季節的な異常を引き起こしている状況ならば、それを数ヶ月先から予測することが可能である。

季節予測の数理科学的アプローチは“観測とモデルのバトンタッチリレー”として例えることができる(図(1)-7)。まず、1. 現在の大気・海洋・陸面の状況を観測システムから知る必要がある。前述の通り、熱容量の大きい海洋の水温異常の情報は、季節予測の時間スケールでは特に重要である。それらの観測情報が将来どのように時間発展するのかを計算するのが気候モデルである。気候モデルとは、大気-海洋-陸面の物理に関する微分方程式群で構成されており、地球を3次元的な格子状に分割し、それぞれの格子に対して方程式を時間方向に数値積分する計算アルゴリズムである。2. 現在の観測情報を気候モデルに取り込み(同化、初期値化とも呼ばれる)、スーパーコンピューターで気候モデルを計算することで、未来をシミュレート、つまり数ヶ月先の季節の異常をシミュレート(予測)することが可能となる。

研究代表者が所属する海洋研究開発機構では、海洋観測網の発展に尽力していると共に、世界有数のスーパーコンピューター「地球シミュレータ」を有する。観測と数値計算を両輪として、自然災害をもたらす現象の高精度な事前予測を実現させ、安全・安心に資するために、海洋研究の中核機関として海洋研究開発機構が推進すべき重要な課題の一つが季節予測研究と言える。特に研究代表者が本研究期間中に所長を務めたアプリケーションラボ（主たる前身は地球フロンティア研究システム気候変動予測領域）では、数ヶ月から数年スケールで発生する気候変動現象の解明ならびにその予測研究のため、1990年代後半からSINTEX-F大気海洋結合大循環モデルを日欧研究協力に基づき地球シミュレータを用いて開発および改良してきた。その第一版がSINTEX-F1季節予測システムであり、2005年にそのプロトタイプが完成して以来、主に熱帯域のエルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の予測において世界最高級の性能を発揮してきた(Luo et al. 2005, 2007, 2008, Jin et al. 2008)。



図(1)-7 数理的な季節予測(短期気候変動予測)システムの概要

本課題(1)では、このSINTEX-F予測システムを使って、近年頻発して来た自然気候変動現象としてエルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象や、大陸西岸沖合に水平100kmスケールで発生する沿岸ニーニョ/ニーニャ現象の予測可能性を調べた。

それらの研究成果から予測精度を更に向上させるために必要な問題点も次第に明らかになってきた。亜熱帯域で発生する大気海洋相互作用現象を解像することは実社会に貢献する季節予測技術開発において新たな方向性を示している。季節予測の精度を向上させるためには、(i)予測に使う大気海洋結合モデルの高度化と(ii)海洋観測データを予測モデルの初期値に取り込む同化手法の高度化の二つが同程度に重要であることが知られている。本課題でもこの二つの戦略で、予測システムの精度向上に挑戦した。それぞれの詳細を以下にまとめた。

a 予測モデルの高度化

従来のシステムを高度化(海氷モデルの導入、高解像度化、物理スキームの改善等)したSINTEX-F2季節予測システムを開発した。SINTEX-F1とF2の主な違いは表(1)-1のとおりである。

表(1)-1 SINTEX-F1とSINTEX-F2の主な違い

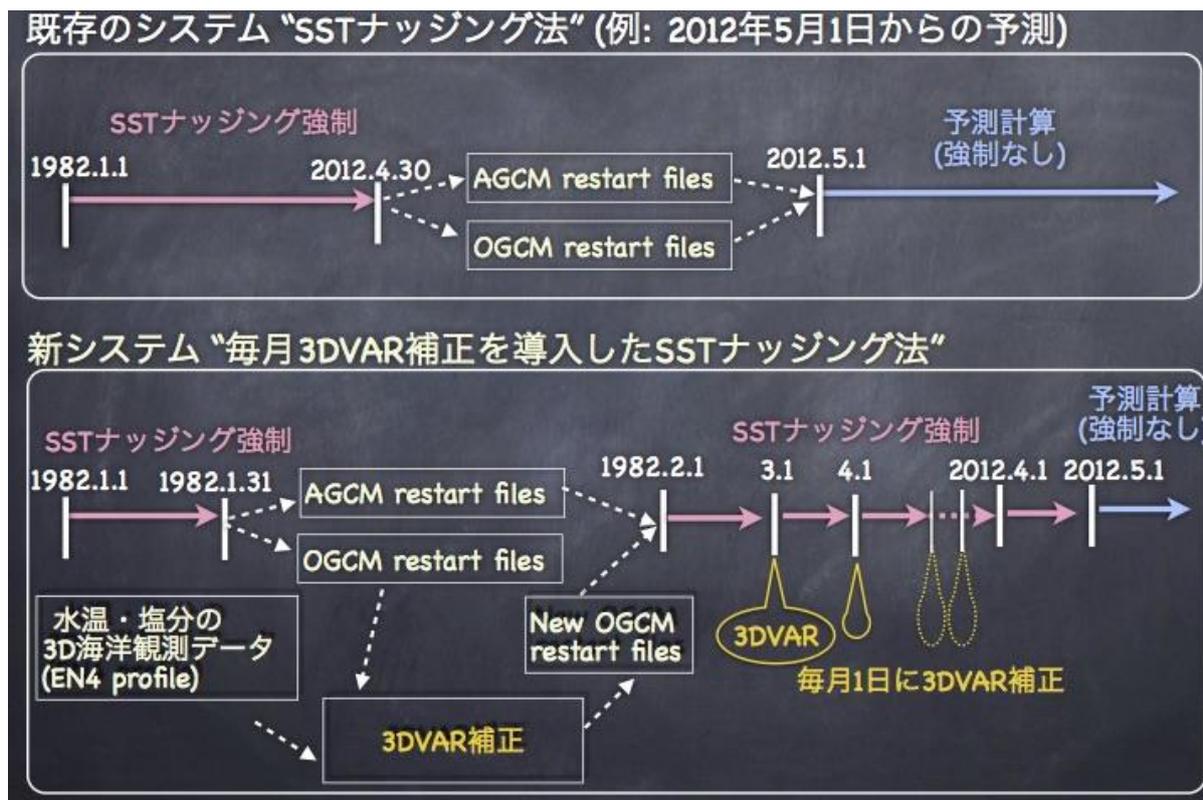
	大気モデル	海洋モデル	結合過程	海氷モデル	アンサンブル数
SINTEX-F1	ECHAM4.6 T106L19	OPA8.2 2×(0.5-2) L31	2時間毎 フラックス 調整無し	No	9
SINTEX-F2	ECHAM5 T106L31	OPA9 0.5×0.5 L31	2時間毎 フラックス 調整無し	Yes	12

SINTEX-F2では高解像度化(大気モデルの鉛直解像度を約1.6倍、海洋モデルの水平解像度を約4倍細かく)や海氷モデルの導入により、中緯度域の再現性がSINTEX-F1より向上している(Morioka et al. 2015)。両システムとも初期化には海面水温(SST) ナッジングスキームを使用している。これは、観測のSSTデータをナッジングしつつ(なじませつつ)、大気海洋結合モデルを時間積分していくことで大気と海洋の予測初期値を作るスキームで、簡易ながらも大気-海洋モデル間を力学、熱力学的に矛盾なく同化できる利点がある。

F1システムのアンサンブル数は、初期化時のSSTのナッジングの強さを3種、地上風と表層海流の相互作用に関する物理スキームを3種使うことで合計9つある(Luo et al. 2005)。一方SINTEX-F2は、初期化時のSSTのナッジングの強さを3種、ナッジするSSTの観測データを2種、海洋微細構造に伴う鉛直混合に関する物理スキーム2種(Sasaki et al. 2012)を使い、合計12のアンサンブルメンバーで構成されている。本研究では2000-2013年の過去再予測実験の結果を解析した。

b 初期値作成システムの高度化

季節予測の精度を向上させるためには、aのような大気海洋結合モデルの高度化が重要であるが、それと同程度に重要なのが海洋観測データを予測の初期値に取り込む同化手法の高度化である。現在のSINTEX-F1およびF2予測システムの初期値を作成するSSTナッジング法は、エルニーニョ予測では高い実績を有するものの、熱帯インド洋や熱帯大西洋、更には中緯度域での海洋内部の初期化には充分ではないことがわかっている。そこで、従来のSSTナッジング法に、海洋観測に基づいた3次元の水溫/塩分データを同化する修正法(3DVAR補正)を加えた新たな初期値作成システムを、イタリア気候変化地中海研究センター(CMCC)のStorto博士の協力のもと開発した。従来のSSTナッジング法では、1982年から現在まで連続的に観測SSTをナッジングしていた。新スキームでも同様に観測SSTをナッジングするものの、1982年2月から毎月1日に、UK Met Officeから配信されているEN4 profileと呼ばれる海洋3次元の水溫・塩分の観測データを使って、海洋モデルを3DVAR補正しながら、SSTナッジングを行う(図(1)-8)。



図(1)-8 既存のSSTナッジング法と、3DVAR補正を導入した新しい初期化システムの模式図

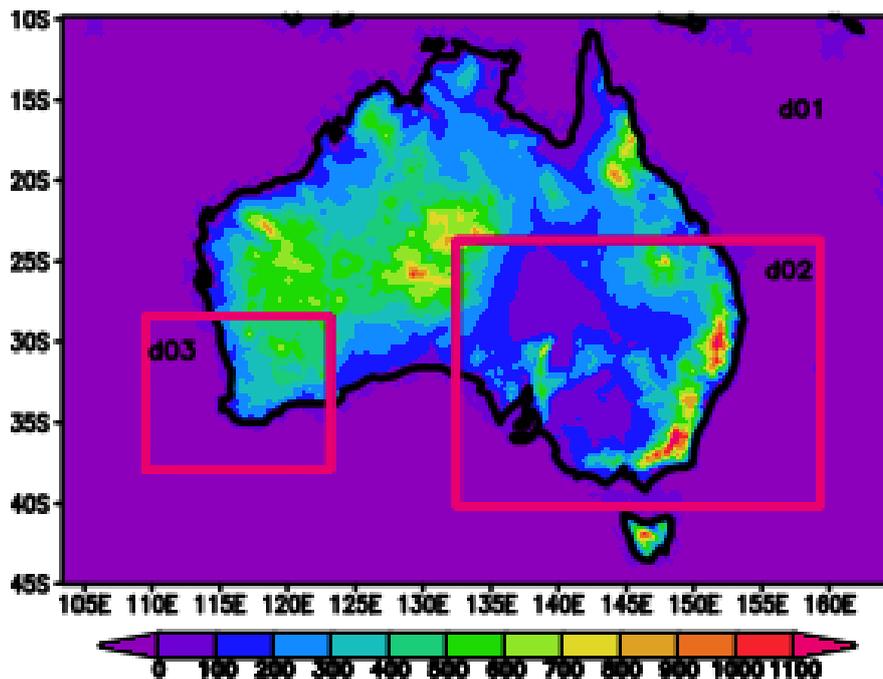
(2) アジア-オセアニア域へのダウンスケーリング

1) オーストラリアにおける力学的ダウンスケーリング技術開発

オーストラリア周辺を対象に力学的ダウンスケーリングする技術を開発した。アフリカ南部域で使用経験のあるWRF領域モデル(Ratnam et al. 2013)をオーストラリア周辺域に適用した(図(1)-9)。初期値や境界値として再解析データを使用し、領域モデルの性能テスト計算を繰り返し、ファインチューンすることで、最適な設定を決めた。詳細は以下の通りである。

- ・ 鉛直レベル：28
- ・ 空間解像度：d01域が27 km, d02及びd03域が9km
- ・ 積雲パラメタリゼーション：Kain-Fritsch(KF法)とBetts-Miller-Janjic(BMJ)法

次にSINTEX-F2季節予測システムによる2000-2013年の過去再予測計算の6時間毎のアウトプットを入力し、ダウンスケーリング後の予測スキルを検証した。



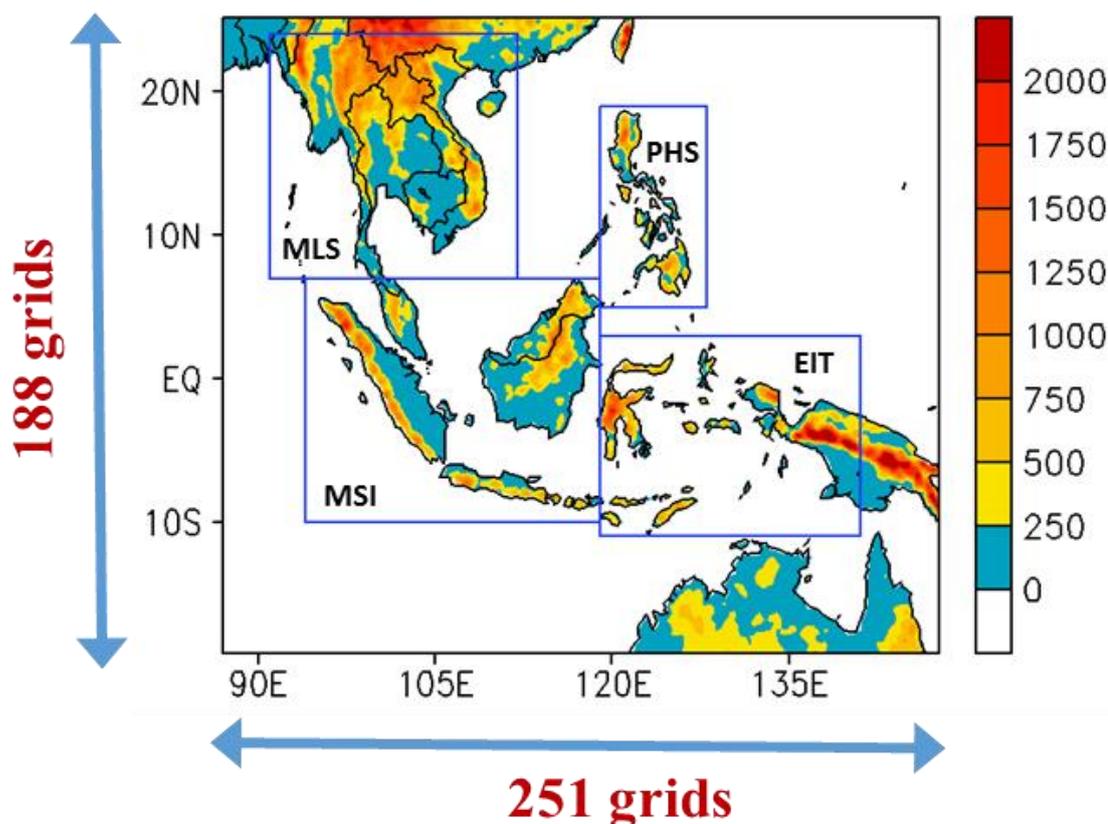
図(1)-9 ダウンスケーリングの領域。色影は地形[m]

2) 東南アジアにおける力学的ダウンスケーリング技術開発

東南アジアを対象に力学的ダウンスケーリング技術を開発した。(a)で記したWRF領域モデルを東南アジア域に適用させ、初期値や境界値として再解析データを使用し、領域モデルの性能テスト計算を繰り返した(図(1)-10)。その結果をもとに戦略的にファインチューンすることで、最適な設定を決めた。初期値や境界値として再解析データを使用し、領域モデルの性能をテストした。

- ・ 鉛直レベル：32
- ・ 空間解像度：27 km
- ・ 積雲パラメタリゼーション：Betts-Miller-Janjic (BMJ)法

1)と同様に SINTEX-F2 季節予測システムによる 2000-2013 年の過去再予測計算の 6 時間毎のアウトプットをダウンスケーリングし、その予測スキルを検証した。



図(1)-10 ダウンスケーリングの領域。色影は地形[m]

(3) アジア-オセアニア域の気候予測情報の社会応用研究

アジア-オセアニア域の気候予測情報を社会応用するために、農業、水管理、健康分野の専門家と連携し、気候サービスとして実現可能性が高いものが何かを調べた。特に1)オーストラリアの小麦の豊凶予測と2)マレーシアのパーム油生産予測がそれに当たることがわかった。それぞれに対して、気候予測情報を、社会応用で求められる予測情報に変換する技術を開発した。詳細は以下の通りである。

1) オーストラリアの小麦の豊凶予測

オーストラリアは世界の主要な小麦輸出国の一つであり、世界の小麦取引の10～15%を占める。日本の小麦輸入の五分之一はオーストラリアからなので、日本の食糧安全保障の観点からも重要な穀物ともいえる(図(1)-11)。オーストラリアの小麦は主に冬小麦であり、4月頃に播種され、11月頃に収穫されるが、その収量は大きな年々変動をする。この変動は、主に小麦栽培時期の気象、特に降水量と地上気温によって支配される。したがって、この気象要素を数季節前に大気海洋結合モデルにより予測し、それを用いて年々の冬小麦収量変動が予測できれば、季節予測が世界の食料管理や安全保障に重要な役割を果たすことを実証することになる。

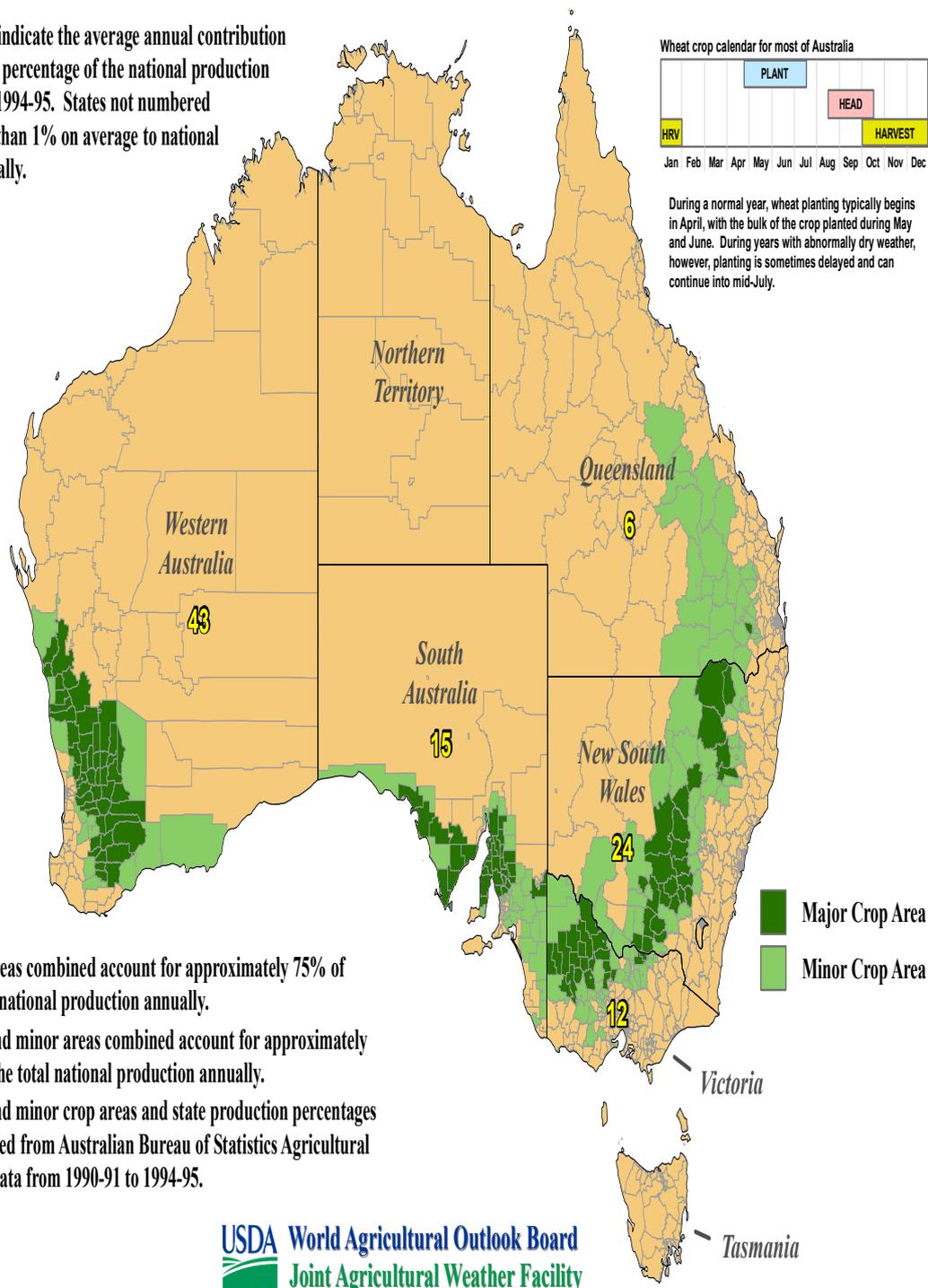
これまで熱帯太平洋におけるエルニーニョ現象がオーストラリアの気温と降水に強い影響を与えることから、冬小麦の収量にも大きな影響を及ぼすものと考えられてきた。エルニーニョ現象

の発生時にはオーストラリアに大規模な干ばつが起きることが多いため小麦の収量が減り、逆にラニーニャ現象の発生時にはオーストラリアの東部の降水量が増えることが多いため、小麦の収量も増えると信じられてきた。そのためエルニーニョ現象の指標を使って、収量の年々変動を推定する研究が多くなされてきた。しかしエルニーニョ現象の影響は安定せず、「ビッグドライ」と呼ばれる1995以降のオーストラリアの深刻な干ばつはエルニーニョ現象によるものではなく、インド洋の正のダイポールモード現象に関わることが最近の研究で明らかになった。さらに、最近は地球温暖化に伴う海洋温暖化により典型的なエルニーニョ現象が少なくなる一方で新たに発見されたエルニーニョモドキ現象が増加し、インド洋では正のダイポールモード現象がより起きやすくなっている。

そこで、熱帯海洋に発生する3つの主要な気候現象がオーストラリアの冬小麦の収量にどのような影響を与えているのかについて正確に知る必要がある。気候変動現象がどのように穀物の収量に影響を与えるのかは農業に関わる人たちだけでなく、食糧安全保障の視点からも重要である。本研究では、気候と小麦の収量の観測データに基づいて、線形相関や線形回帰などの分析方法を使って、インド洋ダイポールモード現象、エルニーニョ現象、エルニーニョモドキ現象のなかでどの現象が最もオーストラリアの冬小麦に影響を与えているのかを調べた。更にSINTEX-F季節予測システム(1)を参照)を利用して、この影響を事前に予測することが可能であるかどうかを調べた。

Australia: Wheat

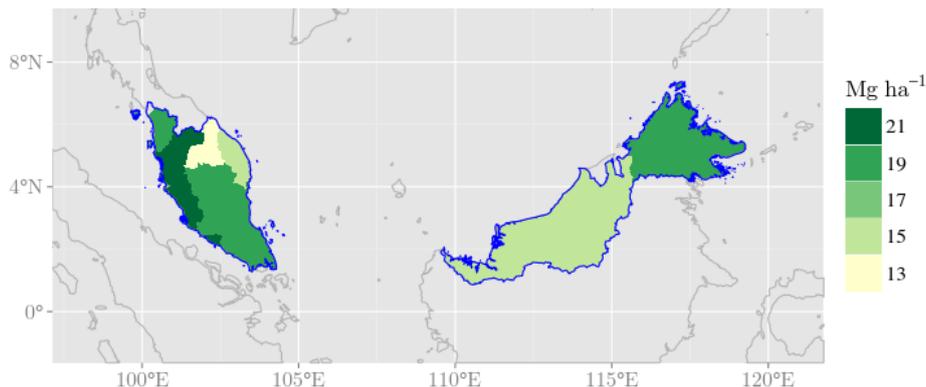
Yellow numbers indicate the average annual contribution of each state as a percentage of the national production from 1990-91 to 1994-95. States not numbered contributed less than 1% on average to national production annually.



図(1)-11 オーストラリアで小麦生産が盛んな地域を緑で図示。色が濃い程収量が多い。

2) マレーシアのパーム油生産予測

東南アジアにおける気候予測情報の利活用のためのニーズを調べ、実現可能性の高い具体的な対象分野を、気候予測研究と連携して調査した結果、オイルパームから採れるパーム油生産が該当することを見出した。インドネシアとマレーシアは全世界のパーム油生産の約80%を担っている。特にマレーシアの生産量は、全世界生産の39%および世界の輸出量の44%を占めるため、生産量を予測することがマレーシアだけでなく全世界にとって重要である(図(1)-12)。そこで過去20年のマレーシアにおけるパーム油生産の年々変動と気候変動現象の関係を調べつつ、その予測モデルを開発した。



図(1)-12 マレーシアにおけるパーム油の年平均生産量
(the Official Portal of Malaysian Palm Oil Boardより)

4. 結果及び考察

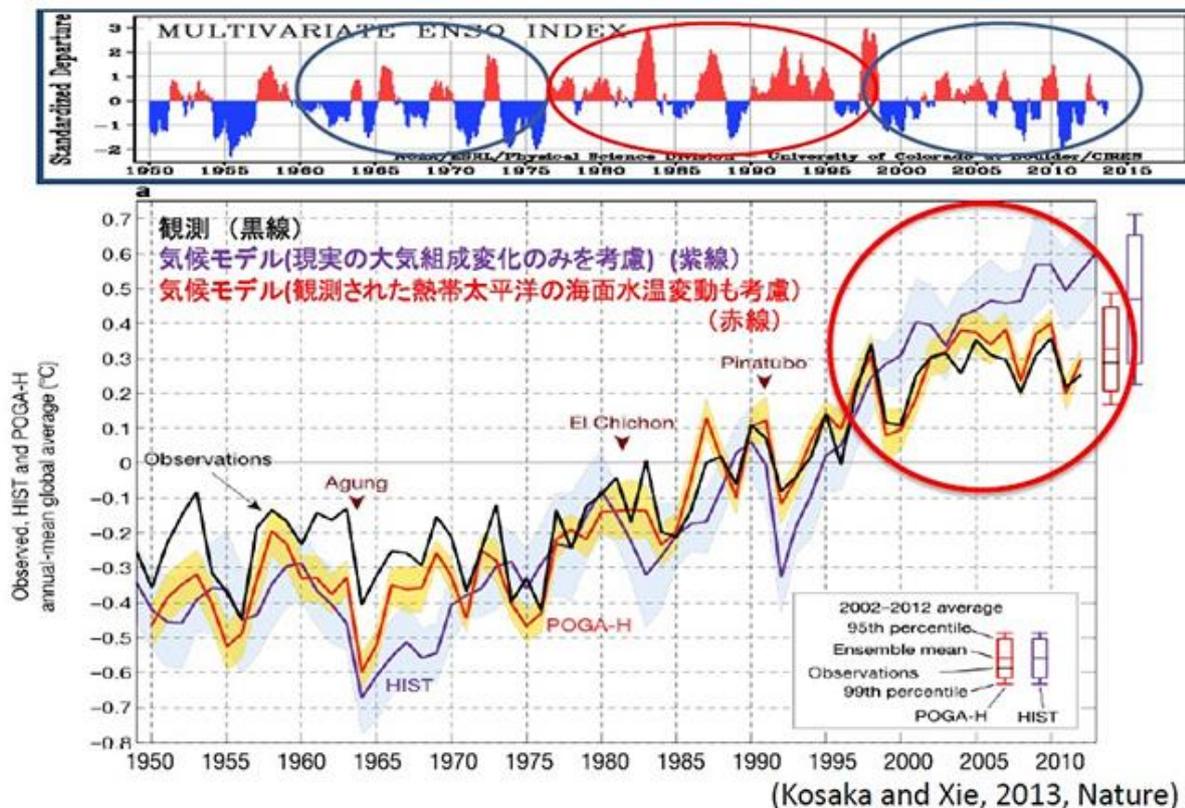
(1) 地球規模で発生する気候変動現象の理解と予測

1) エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象について

1976年から1997年に至る20余年にわたって、海洋のもっとも広い表面を覆う熱帯太平洋ではエルニーニョ現象やエルニーニョモドキ現象が多発していた。これらの気候変動現象は海洋に貯まった熱を大気に放出するプロセスであるために、確実に進行する地球温暖化との相乗効果により、対流圏下層の温暖化が急速に進み、人類起源の地球温暖化が広く着目されるようになった。海洋生態系への大きな影響が世界規模で着目されたのも1976年前後であり、この頃に気候のレジームシフトが起きたといわれている。

ところが1998年から現在までは、熱帯太平洋では逆にラニーニャ現象やラニーニャモドキ現象が多発し、熱帯太平洋の広い範囲で冷水が表層を覆う傾向にある。このために大気は冷やされ、地球の平均気温の上昇は一見して高止まりで終息した状況にある(図(1)-13)。これは地球温暖化の停止(hiatus)として、気候研究者の間で大きな話題になっている(Tollefson, 2014)。1998年以降は長期的に見て熱帯太平洋に冷水が露出し、大気の熱を効果的に吸収しているために、人為起源の地球温暖化が緩和されているのである。この状況は前述した気候のレジームシフト以前の1945年から1976年の状況とよく似ている。

1998年から現在までの地球温暖化の見かけ上の停止
—数10年スケールの熱帯太平洋の気候変動が重要な鍵を握る—



図(1)-13 エルニーニョ現象やラニーニャ現象の指標(上図)。赤はエルニーニョ現象(あるいはエルニーニョモドキ現象)、青はラニーニャ現象(あるいはラニーニャモドキ現象)を示す。それぞれの現象が頻発する期間が十年スケールで交互に現れていることがわかる。(Kosaka and Xie, 2013)による温暖化の停滞の解析(下図)。黒線のグラフは観測された温暖化、紫線のグラフは温暖化気体の濃度変化のみを考慮した大気海洋大循環モデルの結果、赤線のグラフは熱帯太平洋の海面水温の実測値も考慮した大気海洋結合大循環モデルの結果。赤線のグラフは最近の観測値が示す温暖化の停滞(黒線のグラフ)を良く捉えているのがわかる。

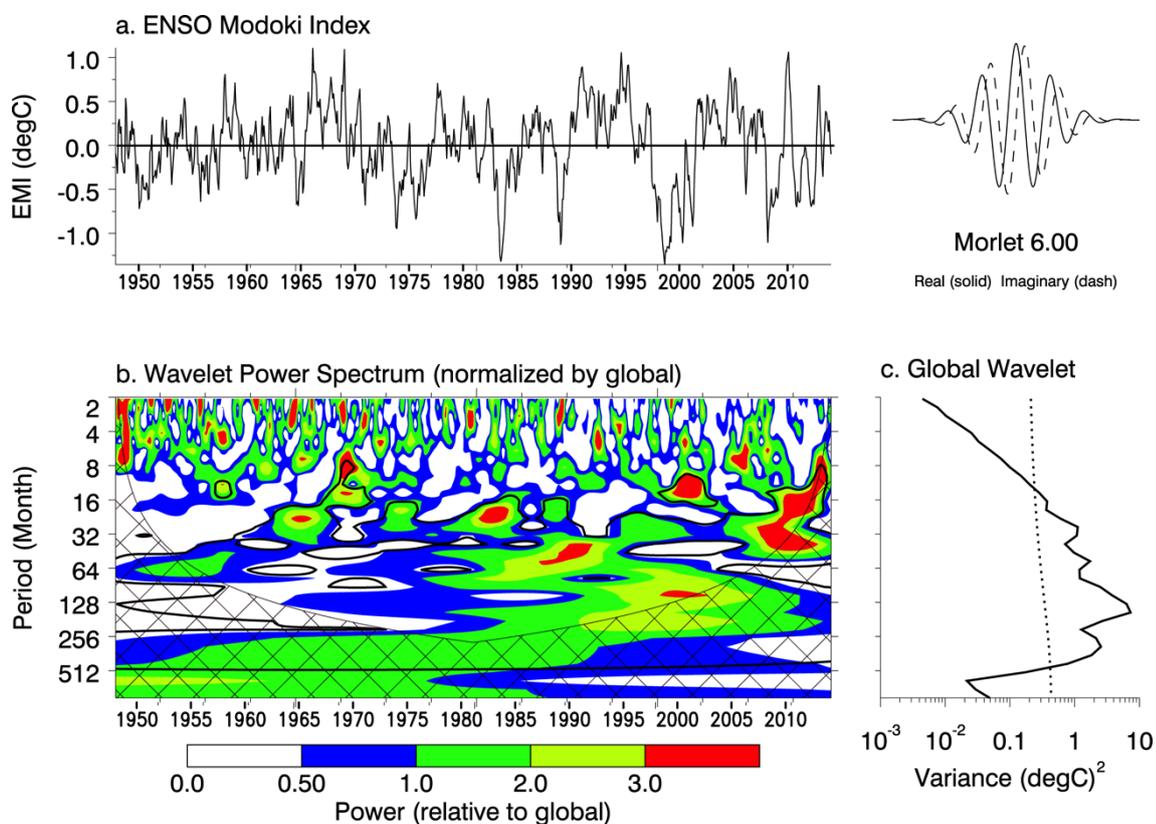
このような数十年スケールの太平洋振動現象(Interdecadal Pacific Oscillation)が、1976年から1997年にかけて続いていたようなフェーズにいつ戻るのかは明らかではない。しかし、現在の状況は既に15年以上も続いていることから、今後10年以内に逆のフェーズに戻る可能性は極めて高いといわねばならない。もし、このような状況になるならば、これまで海洋に蓄積された熱エネルギーが大気に放出され、地球温暖化の傾向はひときわ増幅されるであろう。その影響は広範囲に及び、極めて深刻なものになるに違いない(2015-2017年にかけて位相がシフトし、このような状況に既になったと指摘する研究者も増えてきた)。

世界気候研究計画(WCRP)の下、1980年代半ばより熱帯太平洋には日米協力により約70台のブイが展開され、貴重な現場データが長期にわたり衛星経由で送信されてきていた。しかし、昨今の予算削減により、かなりの数のブイが放棄されつつあるのが現状である。これは由々しき事態

であるといわねばならない (<http://www.pmel.noaa.gov/tao/index.shtml>)。二酸化炭素濃度の大气中における増大は、これと接する海洋の温暖化に加えて、海洋の酸性化も確実に引き起しており、数十年スケールの太平洋振動現象による効果と相まって海洋生態系に深刻な影響を与えることが危惧されている。

一方向に徐々に進行する気候変化の中にあつて数年から数十年スケールで変動する気候変動現象は異常気象をもたらすものとして直接的に社会や産業活動を直撃する。こうした現象の理解とそれへの対策はより長期的な地球温暖化への対策と等しく重要なものである。

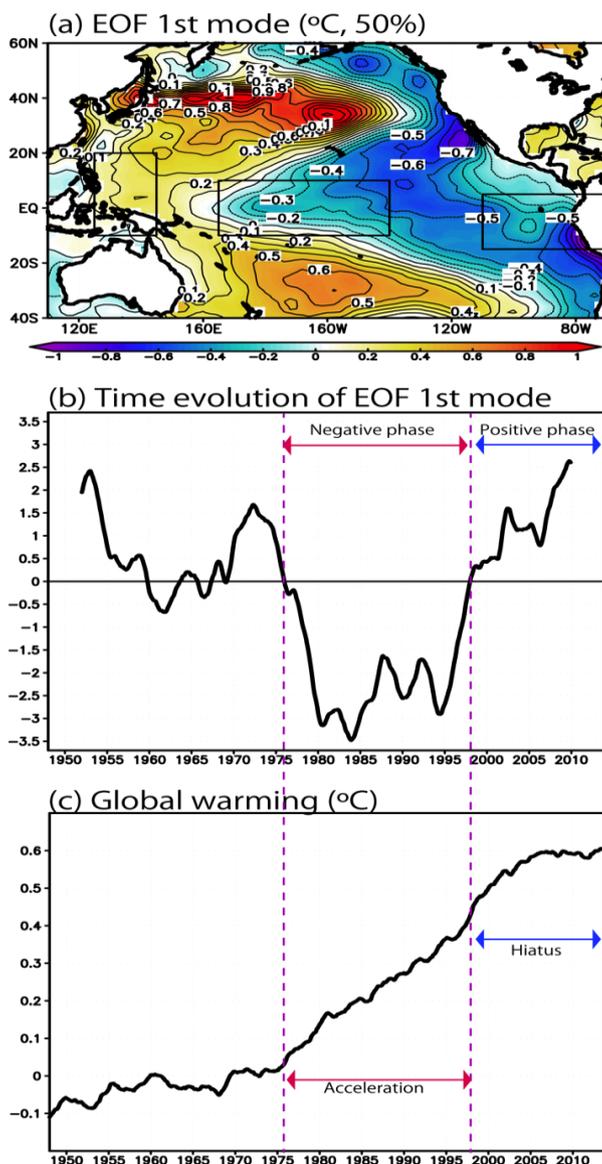
更に詳しく、この現象の実態を捉えるため、エルニーニョモドキ指標EMIに対してウェーブレット周波数解析を行ったところ、エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象は1970年代後半以降で4-15年程度の長周期で発生する成分が卓越してきたことがわかる(図(1)-14)。



図(1)-14 エルニーニョモドキ指標 (Ashok et al. 2007; 領域A(165° E-140° W, 10° S-10° N)、B(110° W-70° W, 15° S-5° N)、C(125° E-145° E, 10° S-20° N)、それぞれの領域平均した海面水温偏差を使ってA-0.5×(B+C)で定義。各領域は図a-1-2で図示)のウェーブレット解析。観測データERSSTv3を使用。トレンドは除去済。上図：時系列(°C)とウェーブレット母関数。下左図：ウェーブレットスペクトラム。スペクトルパワーは下右図の時間平均ウェーブレットで規格化。クロスハッチは端の影響で誤差が現れる部分。黒のコンターは白色ノイズに対して10%の信頼区間を超える部分。下右図：時間平均ウェーブレット。点線が白色ノイズに対して10%の信頼区間。解析手法の詳細は(Torrence, C. and G. P. Compo, 1998)

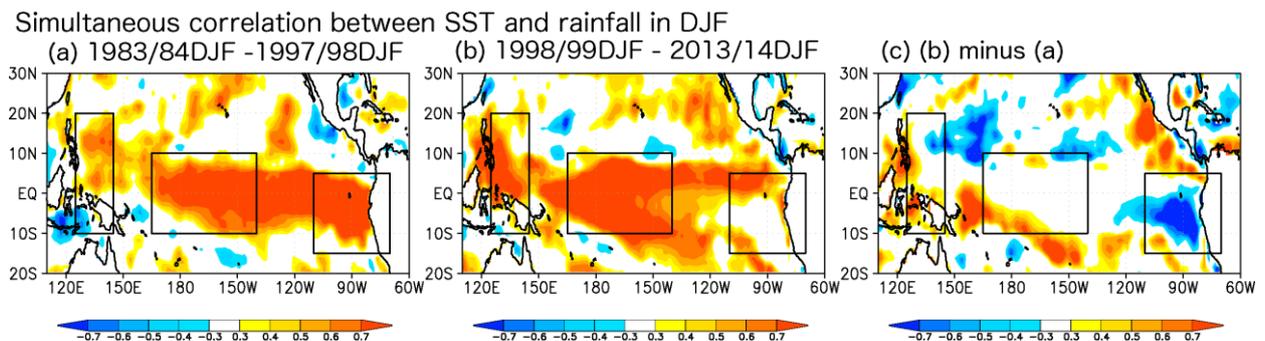
更にその空間特性について、EOF解析を用いて調べたところ、典型的なラニーニャ現象の構造(東

太平洋赤道域が平年より異常に冷たく)ではなく、ラニーニャモードキ現象の構造(中央太平洋赤道域が異常に冷え、西部及び東部の太平洋赤道域が異常に暖くなる構造)であることがわかった(図(1)-15)。またその時系列図を見ると、1975-1998年が負位相で、1998-最近までが正位相である。これを地球全体で平均した気温の時系列と比べると、1975-1998年の地球温暖化の見かけ上の強化と、1998-最近における温暖化の見かけ上の停滞と位相がよく合っていることが解った。従ってエルニーニョモードキ/ラニーニャモードキ現象の実態は、太平洋の数10年規模変動の一つであり、経年的に発生する古典的なエルニーニョ/ラニーニャ現象とは空間構造だけでなく、周期も違う現象であることが明らかになった。



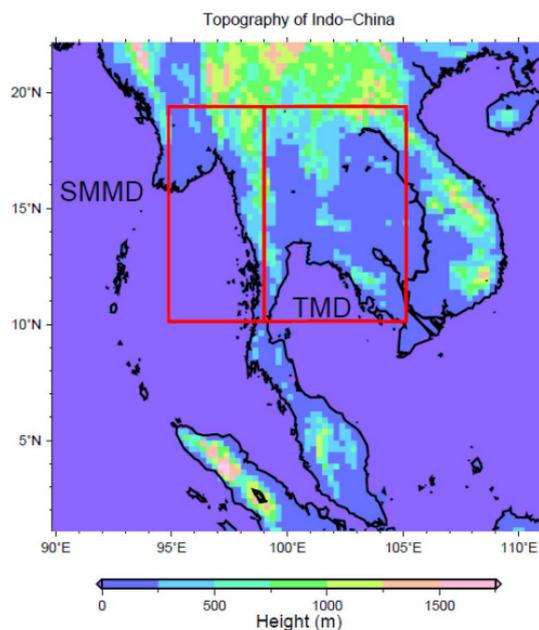
図(1)-15 上図:8年より長い周期の現象に対する太平洋の海面水温で最も卓越する構造(EOF第一モード, °C)。観測データERSSTv3を使用。トレンドは除去。エルニーニョモードキ指標の計算に関連する領域は黒ボックスで表示。中図: EOF第一モードの時系列図。下図: 地球平均気温偏差の時系列図(°C)。NASA GISSのデータを使用。

数10年規模で位相が逆転するエルニーニョモドキ現象において、位相が逆転した1990年代後半の以前と以後では、熱帯太平洋の大気海洋相互作用はどのように変わっているのかを観測から得られた海面水温と降水量の相関係数を計算して調べた(図(1)-16)。すると1975-1998年では熱帯太平洋全域で相関係数が非常に高く、正(負)の海面水温偏差が、上空の多(少)雨傾向を引き起こしている可能性が高い。従って1975-1998年では熱帯太平洋全域で海が空を駆動している状況が一般的であったといえる。しかし、1998年から現在になると、太平洋熱帯域南東部(三極構造を持つエルニーニョモドキ現象の東の極に相当)での相関係数が低い。これはこの領域で、正(負)の海面水温偏差が、上空の多(少)雨傾向を引き起こすような状況が少なくなったといえる。つまり、海が空を駆動する状況が少なくなったといえる。これは、1998年から現在では数10年規模でラニーニャモドキ現象が発生している状況で、太平洋熱帯域南東部の海水温の絶対値が低くなっていることに起因する。このような熱帯太平洋の大気海洋相互作用の数10年規模のレジームシフトは、エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象の数10年規模変動によるものであり、1997/98年以降、典型的なエルニーニョ現象が発達しきれないことと深く関係していると考えられる。



図(1)-16 12-2月平均の海面水温偏差と降水量偏差の相関係数。観測データNOAAOISSTとGPCPデータから計算。(a)1983-1998年で計算。(b)1998-2014で計算。(c)(b)から(a)の差。

エルニーニョモドキ現象が東南アジアにどのような影響があるかを詳しく調べるために、南ミャンマーモンスーン領域(SMMD)とタイモンスーン領域(TMD)に分けて(図(1)-17)、それぞれの領域の降水量が古典的なエルニーニョ、エルニーニョモドキ、インド洋ダイポールモードからどのような影響を受けるのかを相関係数を計算して調べた(表(1)-2)。南ミャンマーモンスーン領域の北半球の春の降水量は、古典的なエルニーニョ現象の影響を強く受けるが、夏、秋の降水量はエルニーニョモドキ現象の影響が古典的なエルニーニョ現象と同程度になることを発見した。また、タイモンスーン領域は北半球の春に古典的なエルニーニョ現象の影響を強く受けるが、秋にはエルニーニョモドキ現象の影響の方が古典的なエルニーニョ現象の影響より強くなる事がわかった。従って、東南アジアの降水量を予測するためには、古典的なエルニーニョ現象の発生を予測することはもちろん、エルニーニョモドキ現象の発生も予測する必要があることを明らかにした。以上の成果は(Tsai et al., 2015)として発表した。



図(1)-17 南ミャンマーモンスーン領域(SMMD)とタイモンスーン領域(TMD)。カラーは地形。

表(1)-2 南ミャンマーモンスーン領域の降水量(SMI)とタイモンスーン領域の降水量(TI)に対する季節毎の気候変動現象指標との相関係数。Nino3.0 (210°E- 270°E 5°S-5°N平均の海面水温偏差)は古典的なエルニーニョの指標，EMIはエルニーニョモドキ指標，DMIはインド洋ダイポールモードの指標(50E-70E and 10S-10N平均の海面水温から90E-110E and 10S-0N平均の海面水温を引いた値)。その他、様々な降水量指標を定義し(Indian Monsoon Index (IMI), Western North Pacific Monsoon Index (WNPMI) Indo-China Monsoon Indices I-IV)、相関係数を計算しているが、本課題に関連するのはNino3.0とEMIの解析(テーブル上部)。詳しくはTsai et al. (2015)参照。

	SMI			TI		
	MAM	JJA	SON	MAM	JJA	SON
Niño 3.0	-0.51 (-0.52)	0.16 (0.03)	-0.15 (-0.13)	-0.62 (-0.63)	-0.17 (-0.21)	-0.05 (-0.03)
EMI	-0.15 (-0.23)	0.15 (0.18)	-0.14 (-0.11)	-0.09 (-0.18)	0.08 (0.08)	-0.12 (-0.11)

更に日本気候の影響を詳細に調べるため、気象庁の地域気象観測システムAMeDASデータを非線形統計解析したところ、日本南西部は経年変動が卓越し、エルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象の影響を強く受けることがわかった。一方で、日本北部は、数十年規模変動の影響を強く受ける。このような日本内部での詳細な気候レジームについての解析は画期的なものであり、気候変動現象の発生と日本の各地域への影響を明らかにするために新たな知見を得られた。

エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象の予測精度の検証については、“4) SINTEX-F2季節予測システムの開発”で言及する。

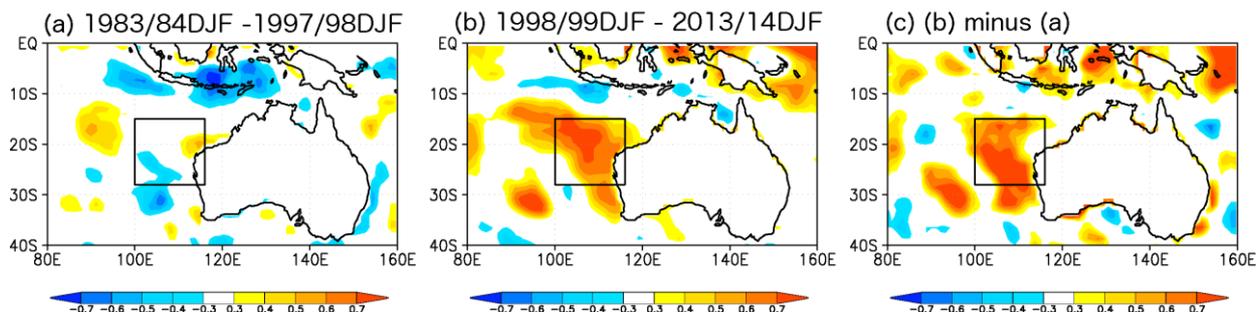
2) 中緯度大陸西岸に現れる沿岸ニーニョ/ニーニャ現象について

a ニンガルー・ニーニョ/ニーニャ現象について

1990年代後半以前と以後で、本現象に関わる大気海洋相互作用がどのように変化したのかを、観測から得られた海面水温と降水量の相関係数を計算して調べた(オーストラリア周辺: 図(1)-18、全球: 図(1)-19)。1990年代後半より前では、ニンガルー・ニーニョ発生域での海面水温偏差と降水量偏差の相関は低いですが、1990年代後半以降、その正相関が非常に高くなっていることを発見した。これは、オーストラリア西岸沖合で領域平均した海面水温偏差と降水量偏差の時系列(図(1)-20)や散布図(図(1)-21)でも確認できる。これらは、1990年代後半以降、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ったことを示している。言い換えると、オーストラリア西岸は緯度的に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たと言える。

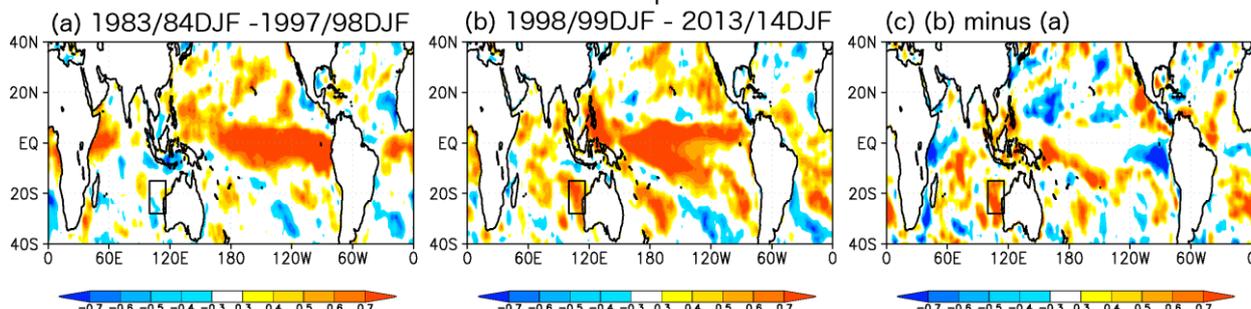
太平洋には数十年規模で変動する成分があり Interdecadal Pacific Oscillation: IPO と呼ばれている。1990年代後半から2014年くらいまでは、熱帯太平洋ではラニーニャ現象(あるいはラニーニャモドキ現象)が多発し、熱帯太平洋の中央部から東部の広い範囲で通常より冷たい海水が表層を覆う傾向にある(太平洋数十年規模変動の負位相とも呼ばれる。熱帯太平洋の西部は通常より暖かい海水が蓄積している状況にある)。この太平洋数十年規模変動の負位相と地球温暖化傾向とが重なり、オーストラリア西岸の海水の平均水温や海洋表層の蓄熱量が1990年代後半から急激に上昇している。これが、オーストラリア西岸は緯度的に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た主な原因であるといえる。

Simultaneous correlation between sea surface temperature and rainfall in DJF



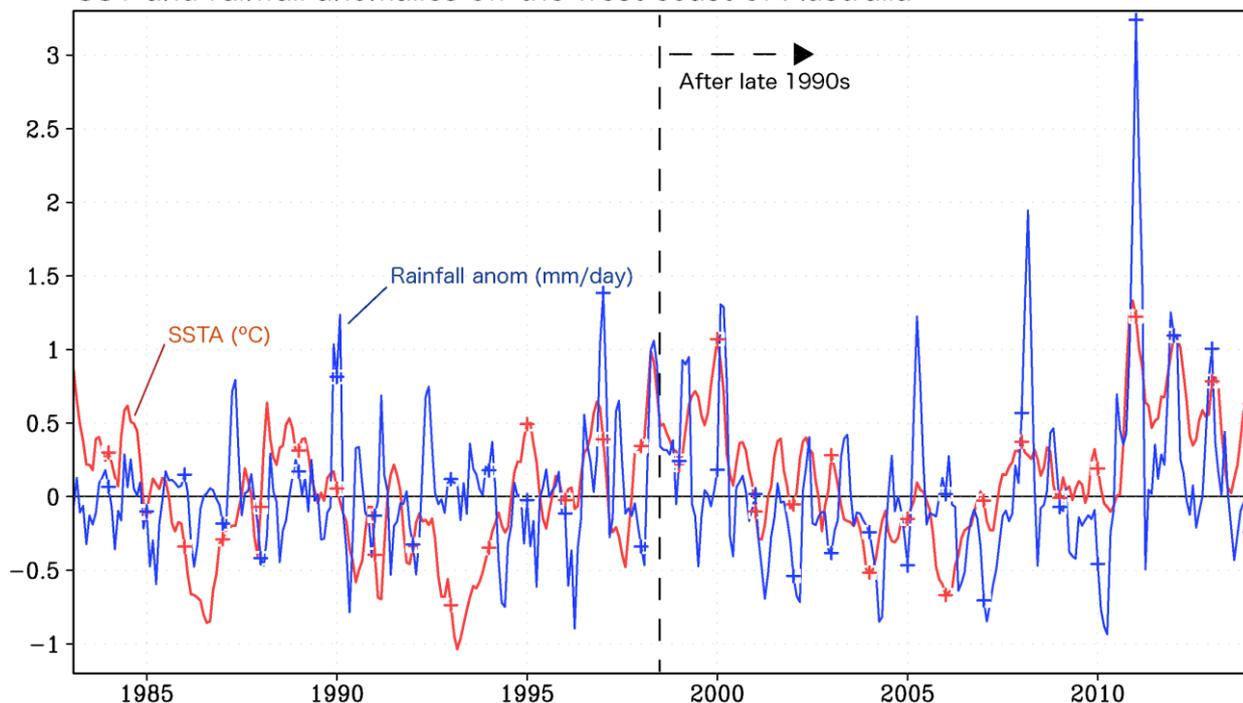
図(1)-18 オーストラリアの夏(12-2月平均)における海面水温偏差と降水量偏差の同時相関係数。観測データNOAA OISSTv2とGPCPを使用。(a)1983-1998年で計算。(b)1998-2014で計算。(c) (b)から(a)の差。

Simultaneous correlation between sea surface temperature and rainfall in DJF

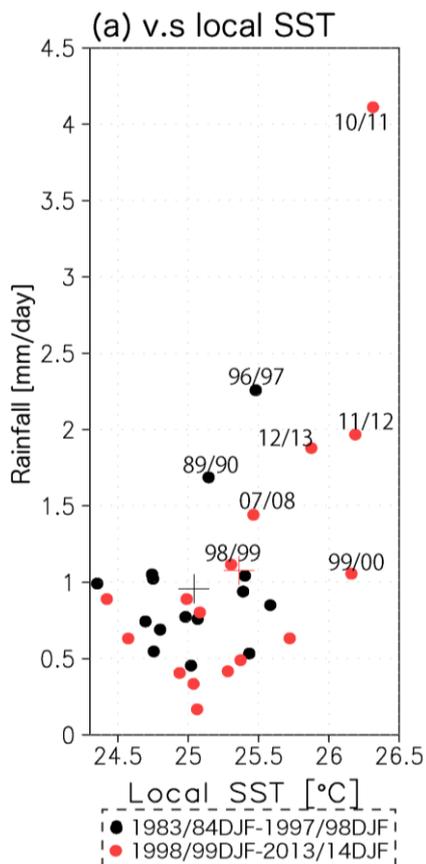


図(1)-19 図(1)-18と同様だが、全球分布について。

SST and rainfall anomalies off the west coast of Australia



図(1)-20 図(1)-18の黒ボックスの領域で平均した海面水温偏差(°C)と降水量偏差(mm/day)の時系列。

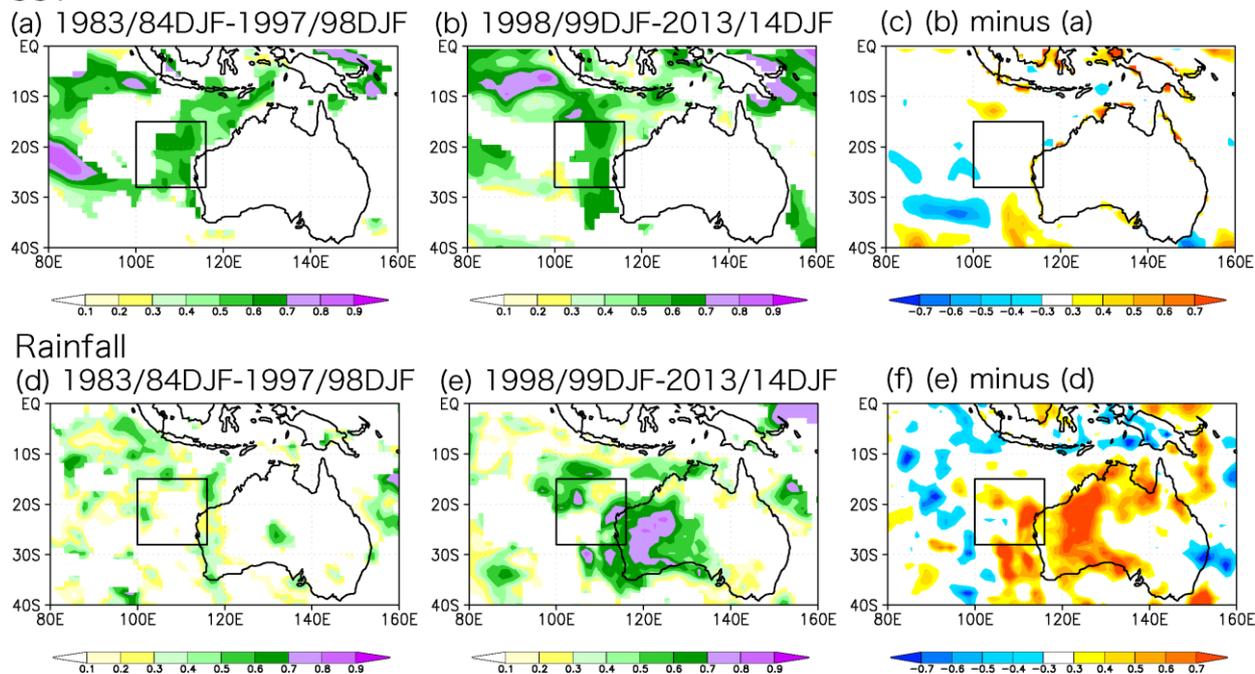


図(1)-21 図(1)-18の黒ボックスの領域で平均した降水量(mm/day)と海面水温(°C)との散布図。
またこのような大気海洋相互作用の変化に伴い、オーストラリアの降水量予測可能性がどのよ

うに変化したのかをSINTEX-F1季節予測システムの過去再予測実験を用いて調べた(オーストラリア周辺: 図(1)-22、全球: 図(1)-23)。1990年代後半を境に、ニンガルー・ニーニョ域の海面水温の予測精度にはあまり違いはないが、西オーストラリアの夏季降水量の季節予測精度が1990年代後半から劇的に向上している。1990年代後半より前は、オーストラリアの夏季降水量の年々変動は、インド洋の気候変動現象(ダイポールモード、マッデン・ジュリアン振動、オーストラリアンモンスーンなど)や、太平洋の気候変動現象(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)から複合的に影響を受ける(テレコネクション)ことが多い状況であった(図(1)-24左)。このように遠方海洋からの間接的な影響は複雑で、SINTEX-F1システムのような数理モデルを使った予測で捉えることは難しいのが現状である。しかし、1990年代後半から状況は劇的に変化した。地球温暖化や太平洋数十年規模変動の影響を受け、オーストラリア西岸ではニンガルー・ニーニョ現象が頻発するようになり、極端な多雨傾向を西オーストラリアにもたらす頻度も多くなった。一方、皮肉なことに、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、その極端な多雨傾向を数理的に予測し易くなった。

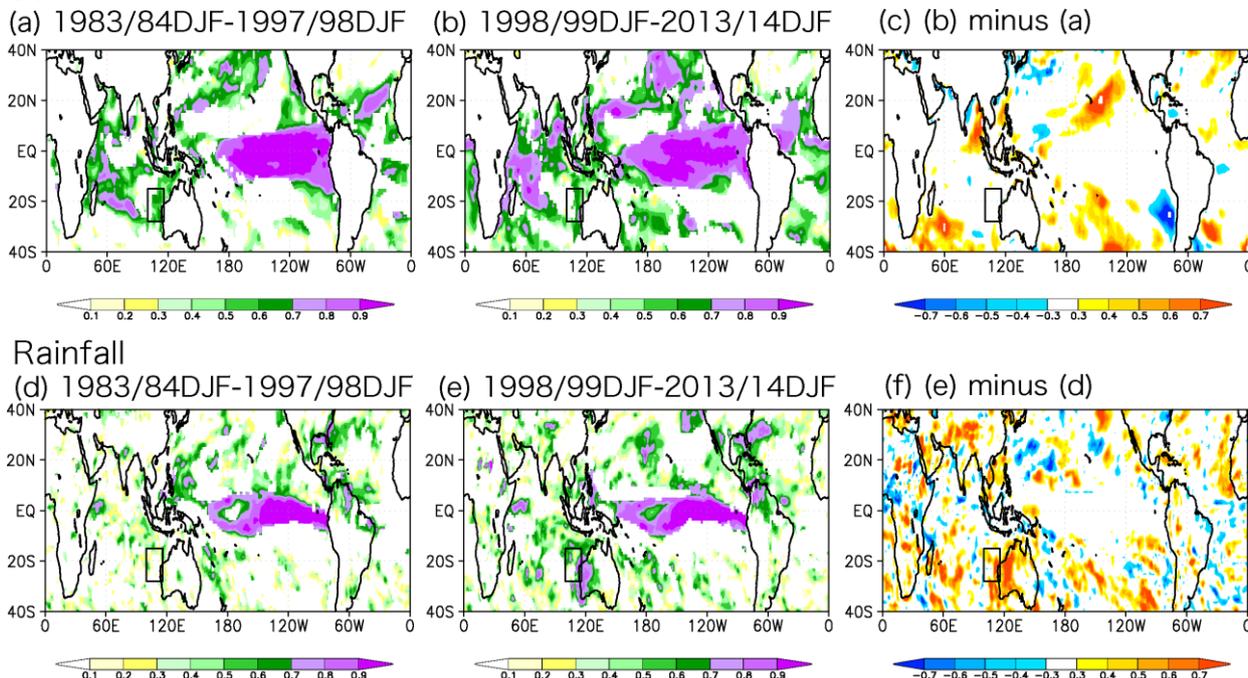
以上の成果は(Doi et al. 2015a)として発表した。

ACC in DJF (Obs. v.s. Prediction from Sep. 1st) SST



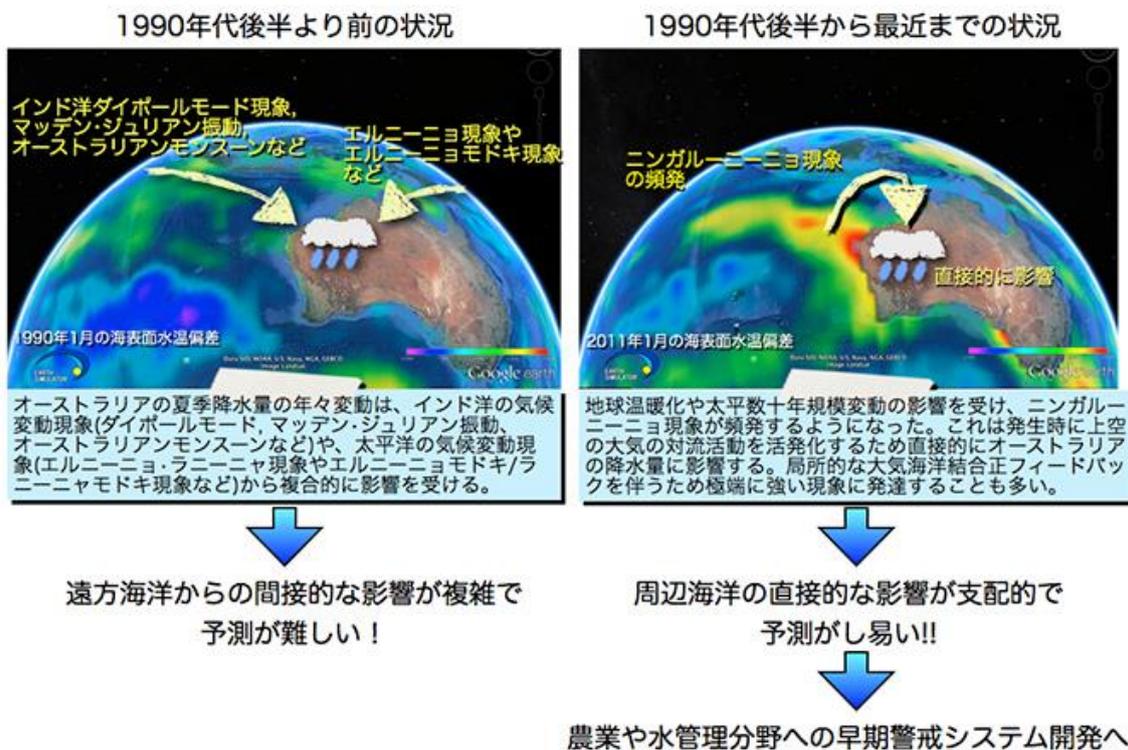
図(1)-22 上段: SINTEX-F1季節予測システム(9アンサンブル平均値)におけるオーストラリアの夏(12-2月平均)の海面水温偏差の予測スキル。観測データと9月1日からの予測値の偏差相関係数ACCで表示。1に近い程高精度。(a)1983-1998年で計算。(b)1998-2014で計算。(c)(b)から(a)の差。下段: SINTEX-F1季節予測システム(9アンサンブル平均値)におけるオーストラリアの夏(12-2月平均)の降水量偏差の予測スキル。観測データと9月1日からの予測値の偏差相関係数ACCで表示。1に近い程高精度。(d)1983-1998年で計算。(e)1998-2014で計算。(f)(e)から(d)の差。

ACC in DJF (Obs. v.s. Prediction from Sep. 1st)
SST



図(1)-23 図(1)-22と同様だが、全球分布について。

オーストラリアの夏季降水量と気候変動現象の関係

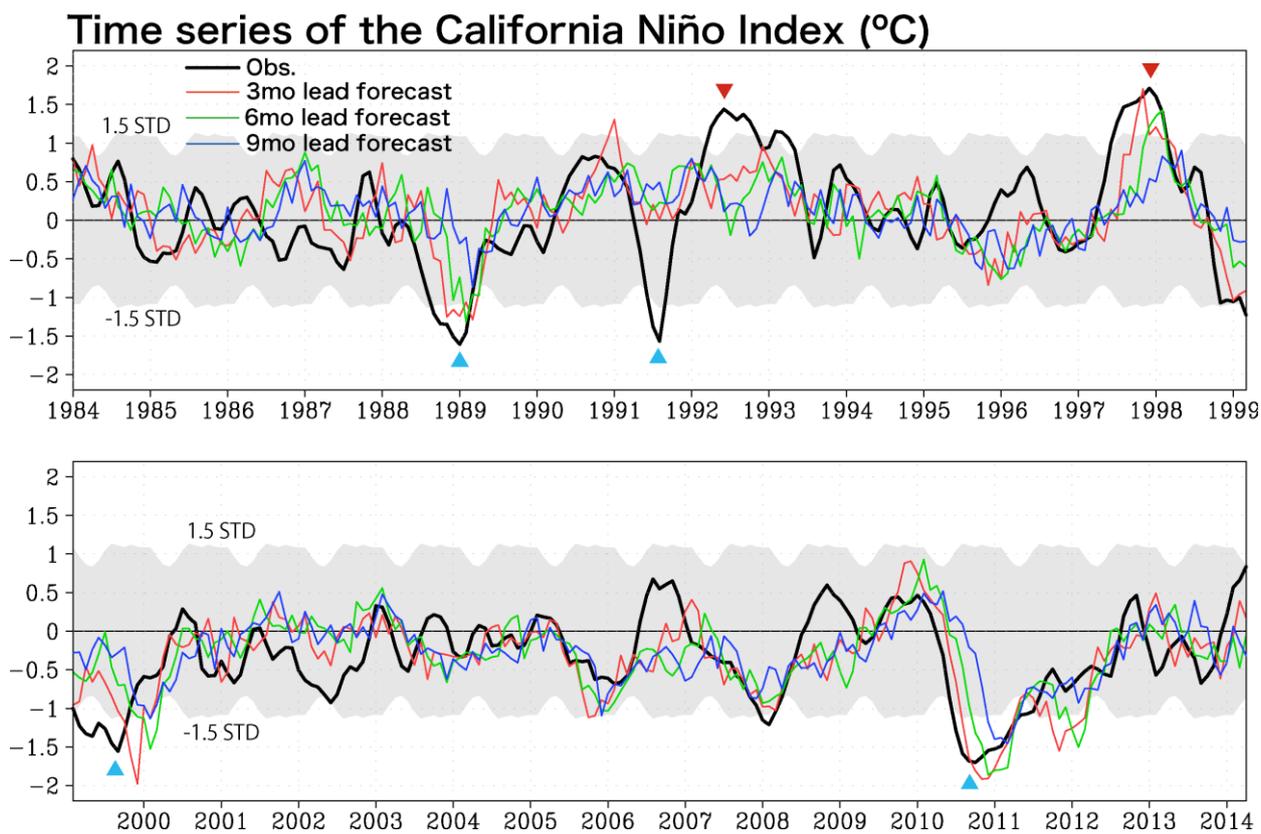


図(1)-24 オーストラリアの夏季降水量と気候変動現象の関係。1990年代後半以前と以後の状況の模式図。

b カリフォルニア・ニーニョ/ニーニャ現象について

SINTEX-F1季節予測システムで、過去30年間で発生したカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャをどの程度予測し得たのかを調べた。カリフォルニア半島の沖合(240E-250E, 20-30N)で領域平均した海面水温が、平年値と比べて何度差があったのかをカリフォルニア・ニーニョの指標(この差が平均的な振れ幅より大きいとカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャが発生したと見なす)と定義し、SINTEX-F1季節予測システムのアンサンブル予測値と観測値とを比べた(図(1)-25)。平均的な年々変動の振幅の1.5倍を超えるイベントに注目したところ、1997年の正イベント、1988、1999、2010年の負イベントの発生予測に3-6ヶ月前から成功しているが、1992年の正イベントや1991年の負イベントの予測には失敗している。予測できた正(負)イベントはエルニーニョ(ラニーニャ)と同時発生しているが、予測できなかった正(負)イベントはエルニーニョ(ラニーニャ)と独立して発生していることがわかった。つまり、現在の予測システムでは、カリフォルニア・ニーニョ/ニーニャの季節予測の成功は、エルニーニョ(ラニーニャ)が予測可能であることによることを見出した。现阶段では、エルニーニョ(ラニーニャ)と独立して発生するカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャの予測はチャレンジングなトピックであるといえる。

以上の成果は、(Doi et al. 2015b)として発表した。



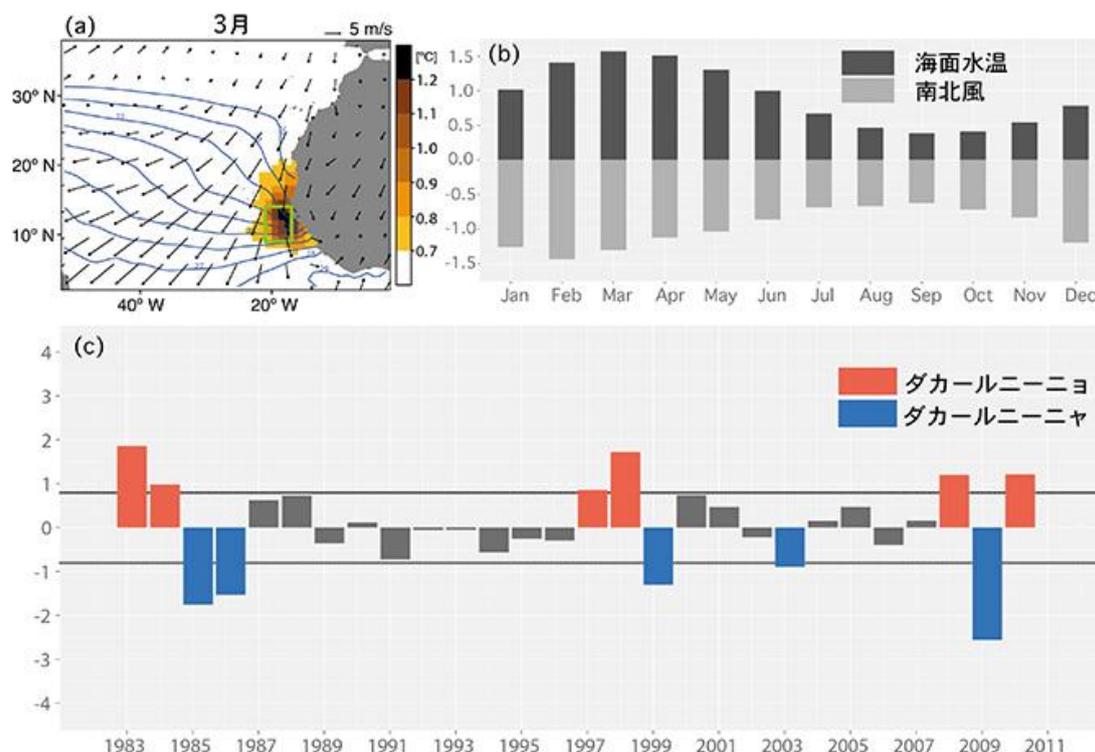
図(1)-25 カリフォルニア・ニーニョ指標(カリフォルニア半島の沖合(240E-250E, 20-30N)で領域平均した海面水温が平年値と比べて何度差があったのかを計算したもの)の時系列(°C)。黒線:観測、赤線:3か月前からの予測値、緑線:6か月前からの予測値。青線:9か月前からの予測値。予測値はSINTEX-F1季節予測システムの9アンサンブルの平均値。

c ダカール・ニーニョ/ニーニャ現象について

ダカール沖合の海面水温の年々変動は3月に最も大きく、南北風の変動は2月に最も大きいことがわかった(図(1)-26)。海面水温の変動も南北風の変動も同じ季節にあらわれるため、両者が関係している可能性がある。そこで、3月にダカール沿岸で領域平均した海面水温の偏差をダカール・ニーニョ/ニーニャ指数と定義し、各年の変動について調べた(図(1)-26)。その結果、30年間でダカール沿岸の海面水温が温くなるダカール・ニーニョ現象が6回、冷たくなるダカール・ニーニャ現象が5回、それぞれ発生していることがわかった。

更に観測データを統計解析することで、ダカール・ニーニョ現象に伴う温かい海面水温が、対流圏下部の大気を暖めることで低気圧性の循環を生じている可能性も示唆できた。これにより、大陸との圧力勾配が弱まり、地衡風の釣り合いにある北東沿岸風も弱まる。これは、ニンガルー・ニーニョ/ニーニャやカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャと同様、西アフリカのダカール沿岸においても、地域的な大気海洋相互作用「沿岸ビヤークネス・フィードバック」が海面水温の年々変動に重要な役割を果たしていることを意味している。

これらの成果は(Oettli et al. 2016)として発表した。

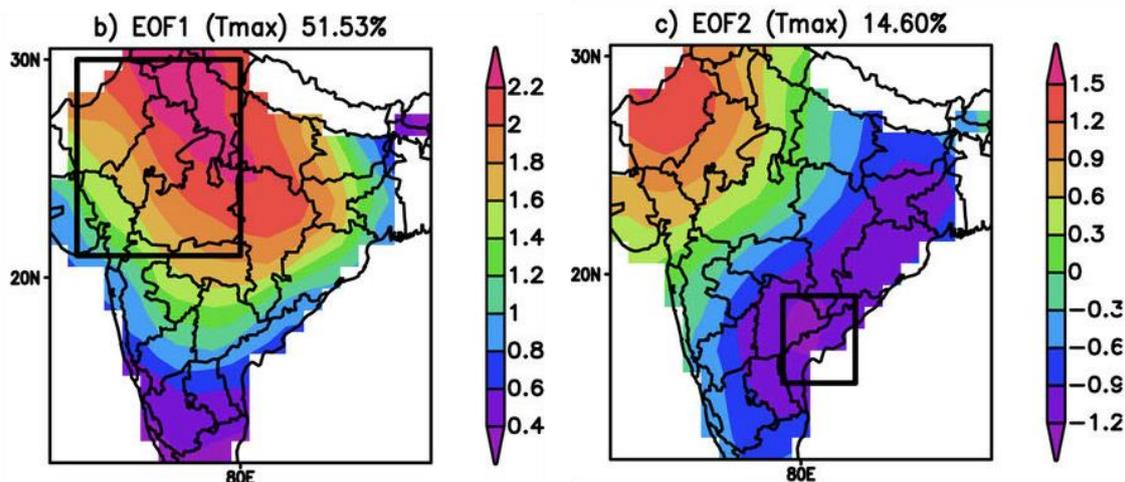


図(1)-26 (a)3月の海面水温(コンター)と海上風(矢印)の平均値および海面水温の標準偏差(カラー) (b)ダカール沿岸のボックス(aの緑)で月ごとに領域平均した海面水温と南北風の標準偏差。値は標準偏差で規格化している。解釈のため、南北風は正の値が北風に対応する。(c)3月のダカール・ニーニョ/ニーニャ指数。値は標準偏差で規格化している。実線は0.8標準偏差を示し、この線を越えた年をダカール・ニーニョ/ニーニャ現象と定義した。

3) 最近数十年で頻発しているインドの熱波と寒波

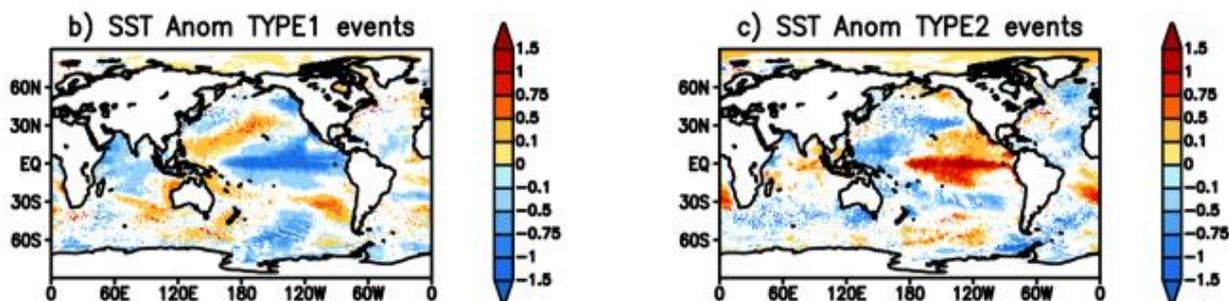
3月から6月の間、インドでは2種類の熱波が発生する(図(1)-27)。第1のタイプの熱波は北部および中部インドで発生し、北大西洋上空のブロッキングと関連していることがわかった。北大西洋上空のブロッキングは、北アフリカの西側の大気上層で低気圧循環の偏差を引き起こす。これに伴う渦度の伸長によって、アフリカジェットの入付付近で、大気のロスビー波が励起される。ジェットに沿う準定常ロスビー波の波列はさらに、インド亜大陸上空で高気圧循環の偏差を生じ、下降気流によってインドで熱波の状況がもたらされる。一方で、インド東部の沿岸域上空での第2のタイプの熱波は、太平洋の低温偏差に対する、大気の松野-ギル型応答に起因することがわかった。松野-ギル型応答は大陸上で北西風の偏差を生じ、海陸風を弱めることで熱波をもたらす。

この成果は(Ratnam et al. 2016a)として発表した。



図(1)-27 最高気温偏差の経験的直行関数EOF主要成分(左)と第2成分(右)。単位は $^{\circ}\text{C}$

また、11月から2月にかけて発生するインドの寒波にも、2種類のタイプがあることを同定した。主要第1タイプはインド全域を寒波が襲うが、第2タイプは主に北西部だけで起きる。面白いことに、第1成分はラニーニャ現象発生時に起きやすく、第2成分はエルニーニョ現象発生時に起きやすい(図(1)-28)。前者は、赤道の対流の影響で、後者は、西インドで生成される低気圧偏差によってもたらされる。この成果は(Ratnam et al. 2016b)として発表した。

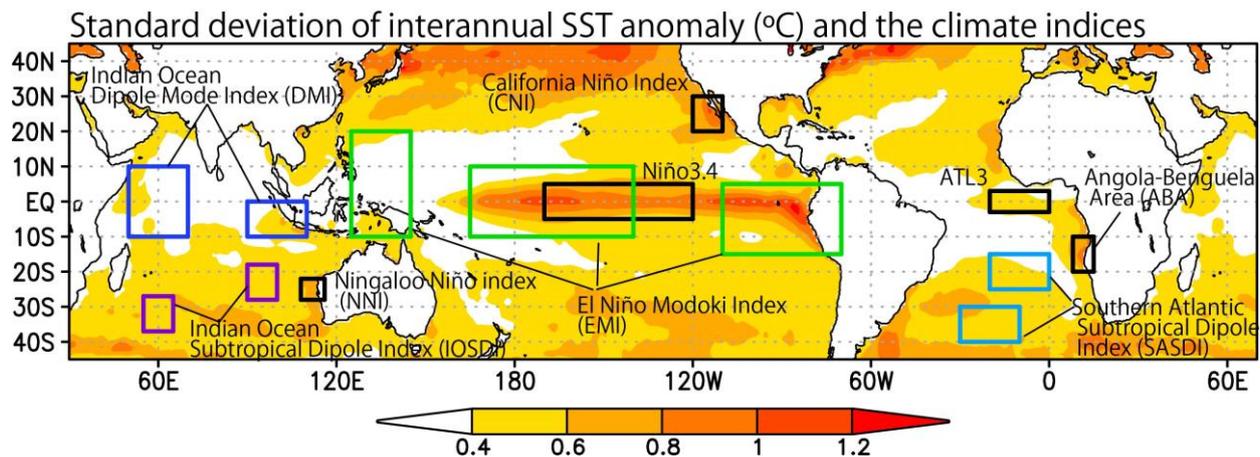


図(1)-28 インドの最低気温偏差の経験的直行関数EOF主要成分と相関する海面水温偏差(左)と第二成分によるもの(右)。単位は $^{\circ}\text{C}$

4) SINTEX-F2季節予測システムの開発

a 予測モデルの高度化

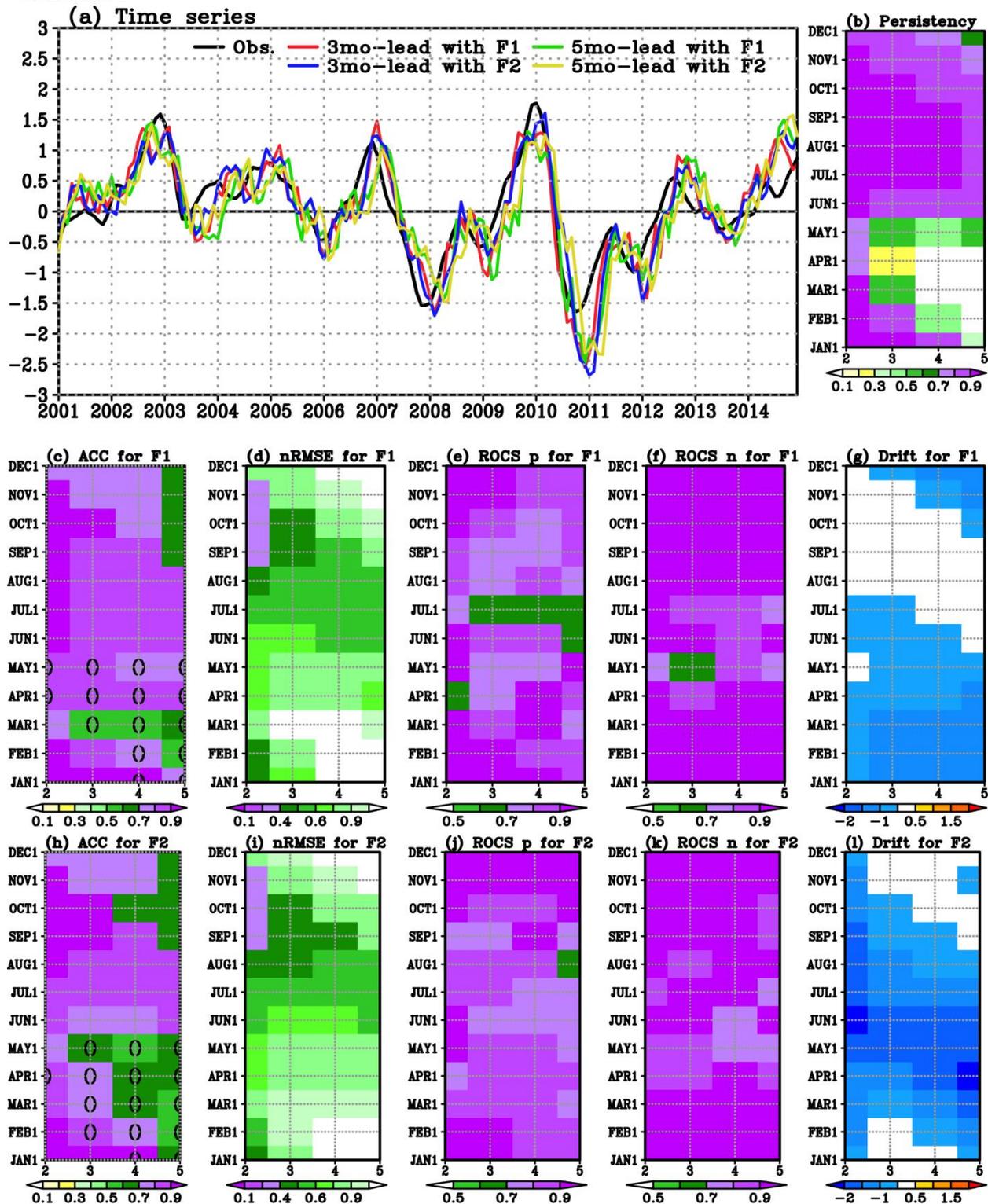
季節予測に重要となる経年的に発生し、大気海洋相互作用を伴う気候変動現象について、SINTEX-F1システムと新しいSINTEX-F2システムの予測精度を調べた。気候変動現象の指標は図(1)-29に示した。



図(1)-29 気候変動現象の指標の模式図。

まず、季節予測にとって最も重要な現象の一つであるエルニーニョ現象の予測精度を調べた(図(1)-30)。エルニーニョ現象の予測で世界最先端の精度を誇ったSINTEX-F1システムと同程度の予測精度をSINTEX-F2システムでも実現できた。

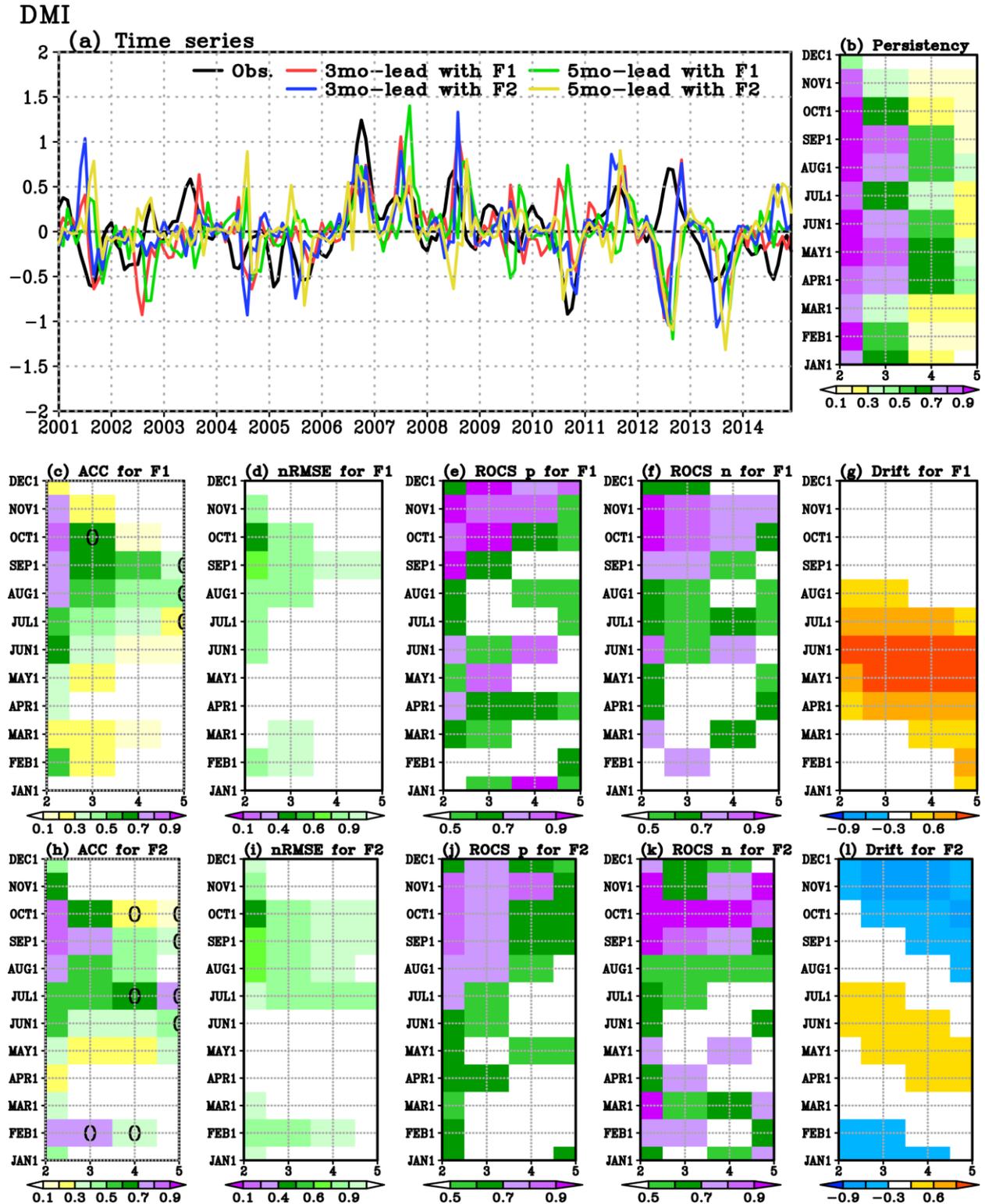
Nino3.4



図(1)-30 SINTEX-F1季節予測システム(9アンサンブル平均値)によるエルニーニョ/ラニーニャ現象の予測精度。(a)エルニーニョ指標「Nino3.4」(北緯5度～南緯5度、西経170度～120度で領域平均した海面水温の平年値からの差)の時系列[°C]。黒:観測,赤:3ヶ月前から予測値,緑:5ヶ月前からの予測値。(b)季節毎のpersistence(自己ラグ相関係数)。X軸が予測リード月。Y軸が予測

開始月。値が1に近い程、状況が持続し予測しやすいことを意味する。(c) 季節毎の予測スキル（偏差相関係数ACCスキルスコア）。X軸が予測リード月。Y軸が予測開始月。値が1に近い程、予測値が観測値に近いことを意味する。(d) 標準偏差で規格化した二乗平均平方根誤差(RMSE)。値が小さい程、予測値と観測値の誤差が少ないことを意味する。(e) 正イベント(エルニーニョ)に対する相対作用特性(ROC)スコアスキル。1に近い程、9アンサンブルメンバーによる確率的な予測の精度が高いことを表す。(f) 負イベント(ラニーニャ)に対するROCスコアスキル。(g) SINTEX-F1季節予測システムで予測される気候値と観測との差(climate driftとも呼ぶ)(°C)。(h-k) (c-g)と同様だが、SINTEX-F2季節予測システムの結果。

次に、アジア-オセアニア域の気候予測にとってエルニーニョ現象と匹敵するほど重要で、研究代表者らが発見したインド洋ダイポールモード現象の予測精度を調べた(図(1)-31)。インド洋ダイポールモード現象の予測でも世界最先端の精度を誇ったSINTEX-F1システムと同程度の予測精度をSINTEX-F2システムでも実現できた。



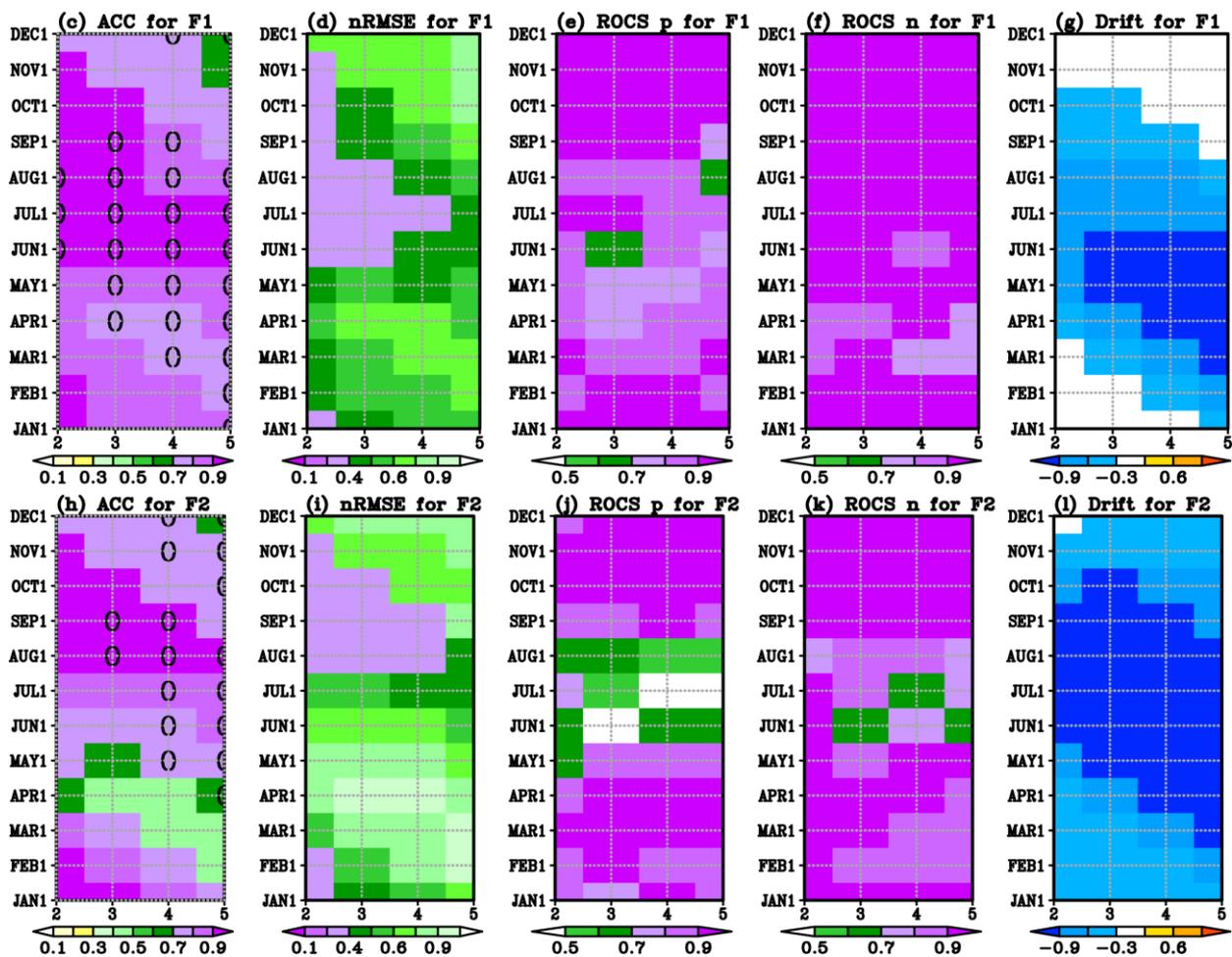
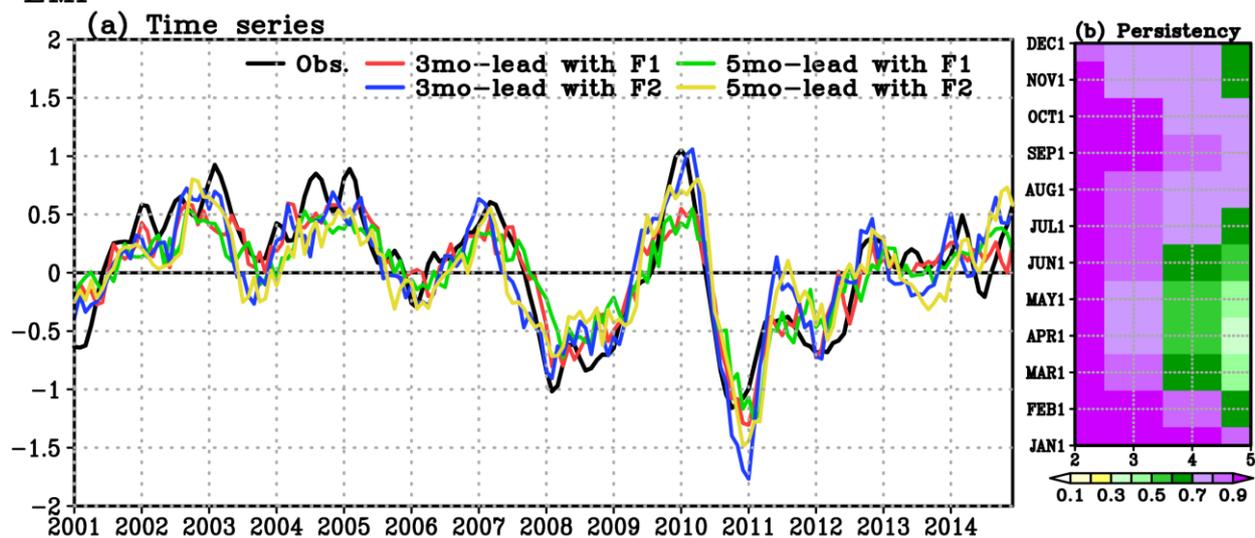
図(1)-31 図(1)-30と同様だが、インド洋ダイポールモード現象の指標DMI(赤道インド洋の西部(50E-70E, 10S-10N)と南東部(90E-110E, 10S-0N)の海面水温偏差の勾配。DMIが正のときは正のインド洋ダイポールモード現象、負のときは負のインド洋ダイポールモード現象と呼ぶ)について。

次に本課題で注目しているエルニーニョモドキ現象の予測精度を調べた(図(1)-32)。エルニーニョモドキ現象は2000年以降に頻発するようになった。その最大のイベントである2009/10年のエルニーニョモドキ現象の予測は、SINTEX-F1システムでは失敗したが、SINTEX-F2システムでは成功した(図(1)-33、図(1)-34)。2009年9月1日から予測を開始すると、2010年1月にエルニーニョモドキ指標が0.5度を超える(エルニーニョモドキ現象が発生していると思える)確率が、SINTEX-F1では約20%であったが、SINTEX-F2では約80%であった。しかし、2000-2013年の統計的なスキルを計算した結果、F1とF2ではほぼ同程度であった。

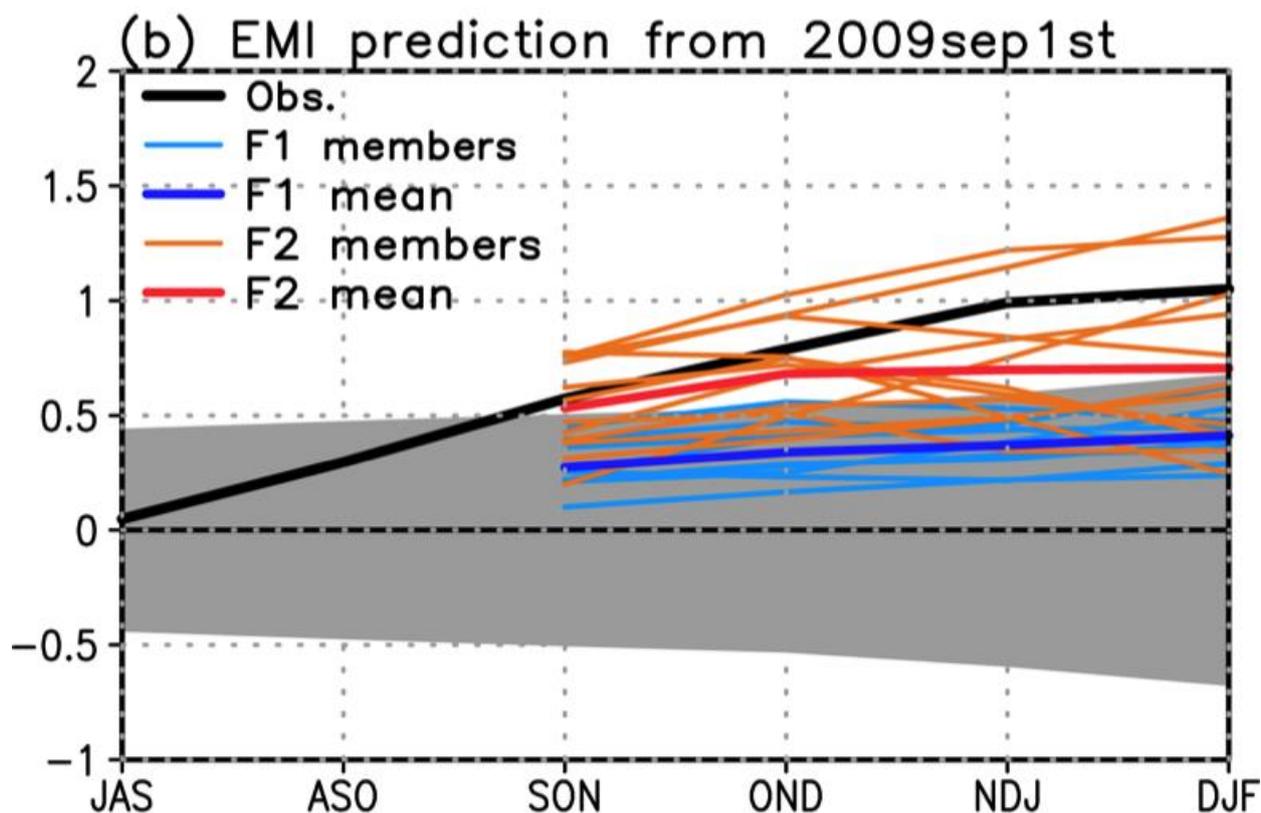
さらに、本課題で注目しているニンガルー・ニーニョ現象の予測精度も調べた(図(1)-35)。最大のイベントである2010/11年のニンガルー・ニーニョ現象の発生予測は、SINTEX-F1システムでは失敗したが、SINTEX-F2システムでは成功した(図(1)-36、図(1)-37)。2010年9月1日に予測を開始した場合、11月にニンガルー・ニーニョ指標が0.5度を超える(同現象が発生していると思える)確率が、SINTEX-F1ではほぼ0%であったが、SINTEX-F2では約80%であった(図(1)-36)。しかし、2000-2013年の統計的なスキルを計算した結果、F1とF2ではほぼ同程度であった。

カリフォルニアニーニョ・ニーニャ現象の予測精度も調べた(図(1)-38)。しかし、2000-2013年の統計的なスキルを計算した結果、F1とF2ではほぼ同程度であった。

EMI

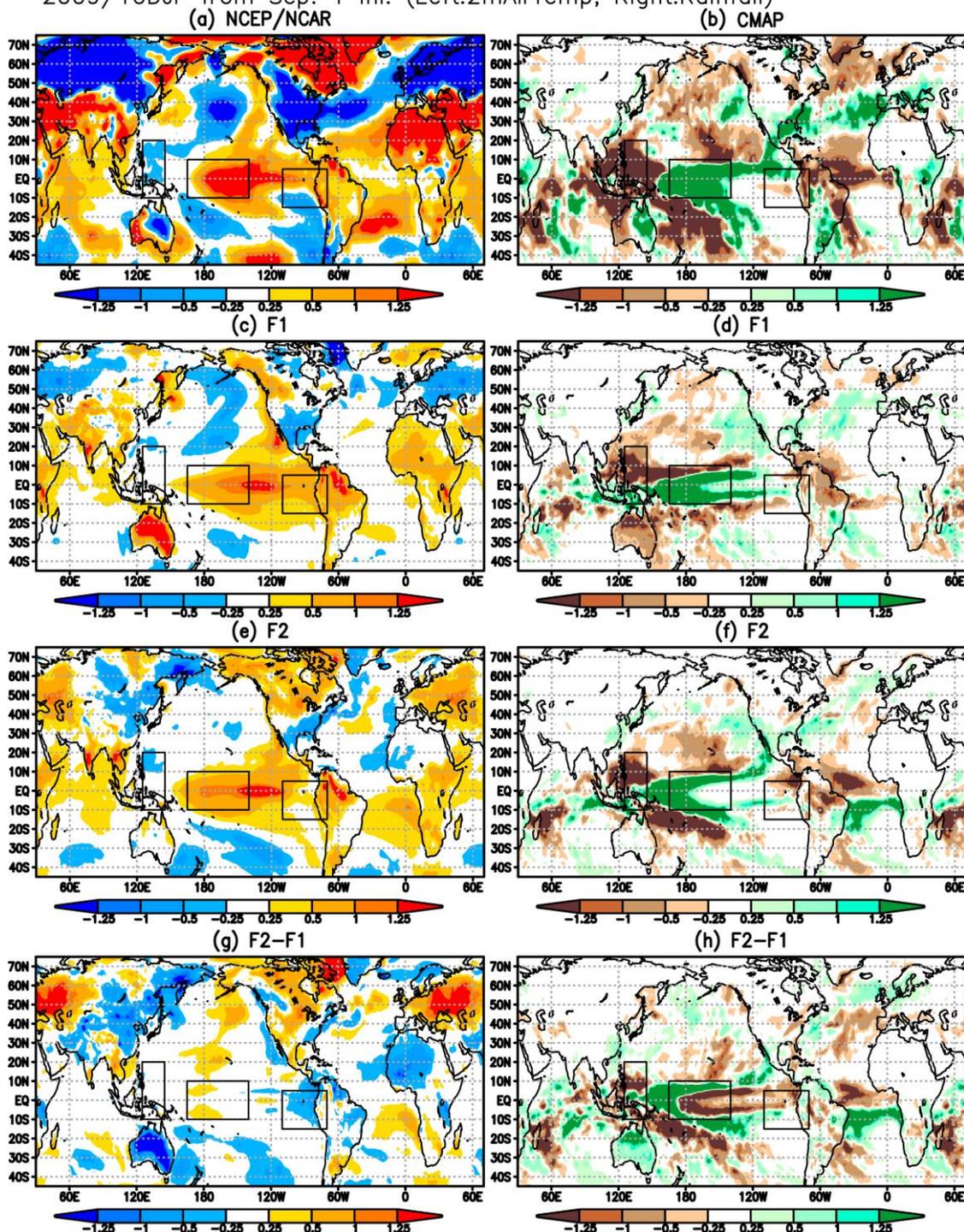


図(1)-32 図(1)-30と同様だが、エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象の指標EMIについて。



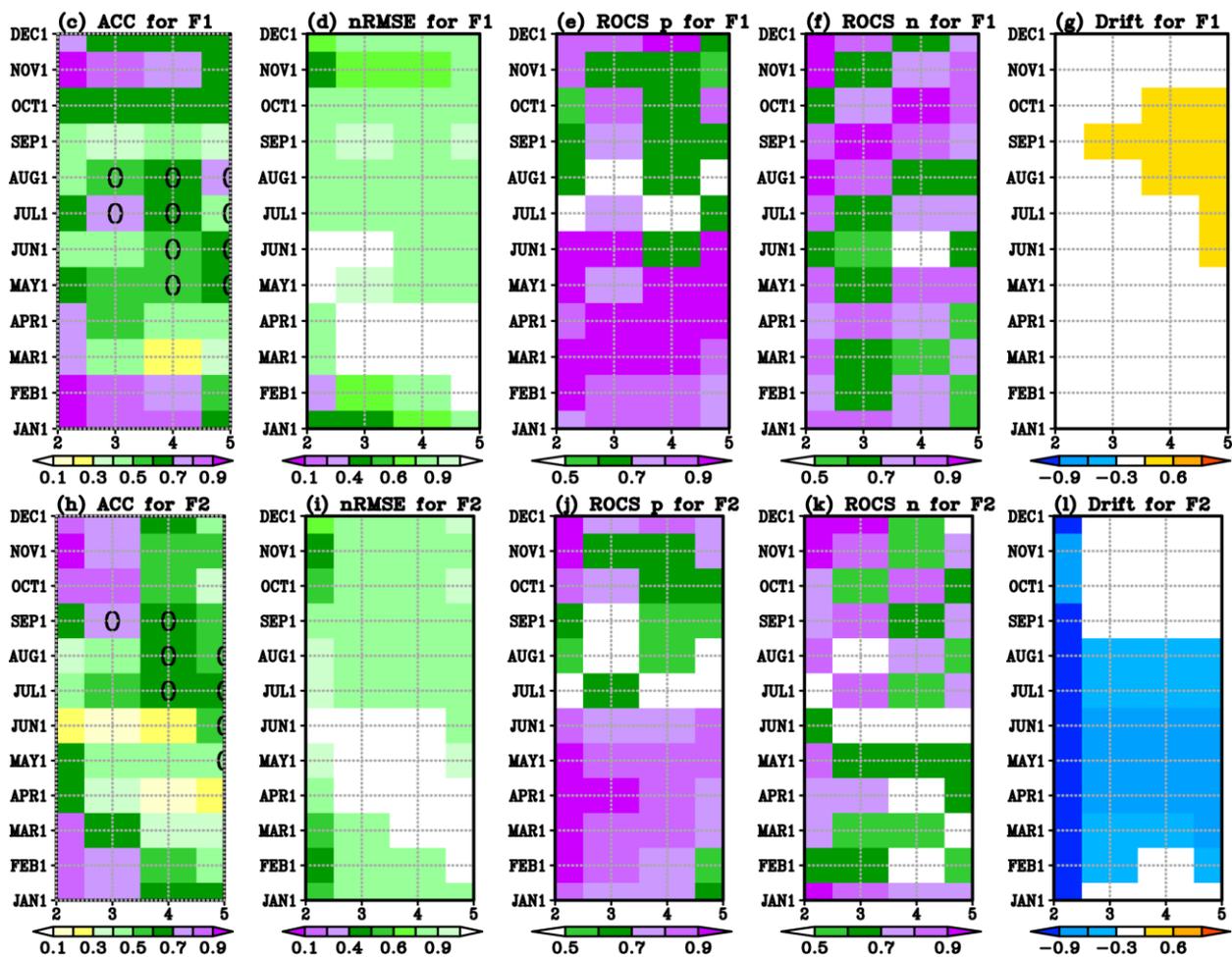
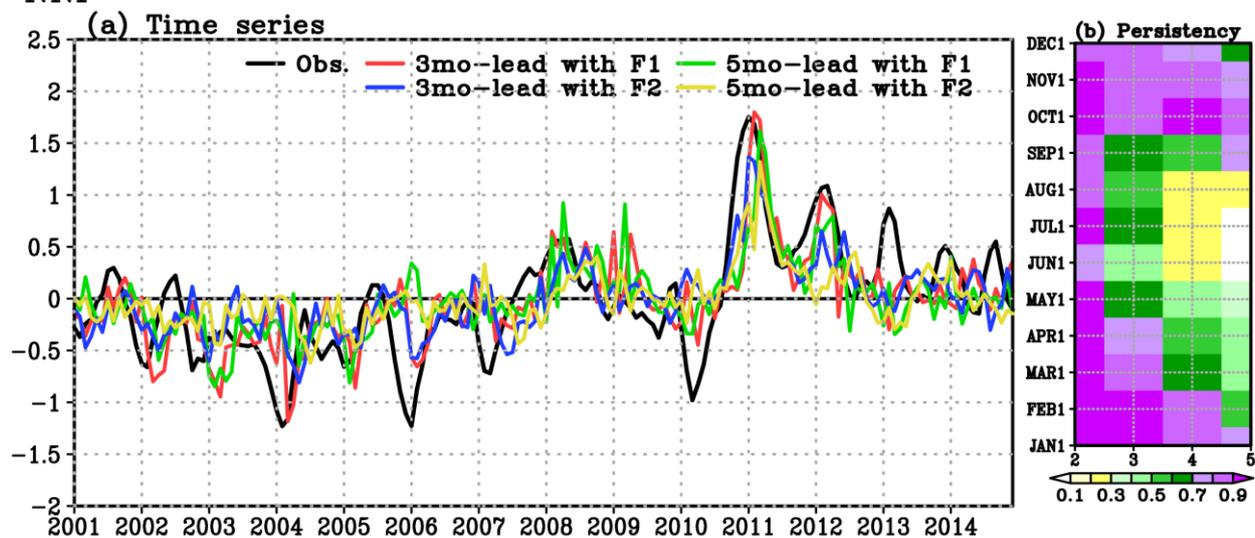
図(1)-33 2009/10年のエルニーニョモドキ指標 (Ashok et al. 2007; 領域A(165° E-140° W, 10° S-10° N)、B(110° W-70° W, 15° S-5° N)、C(125° E-145° E, 10° S-20° N)のそれぞれの領域平均した海面水温偏差を使って $A-0.5 \times (B+C)$ で定義)について。3ヶ月の移動平均値。単位は° C。
 黒:観測, 青:SINTEX-F1予測システムによる3ヶ月リード予測値(アンサンブル平均), 赤:青と同様だがF2の結果。

2009/10DJF from Sep. 1 ini. (Left:2mAirTemp, Right:Rainfall)



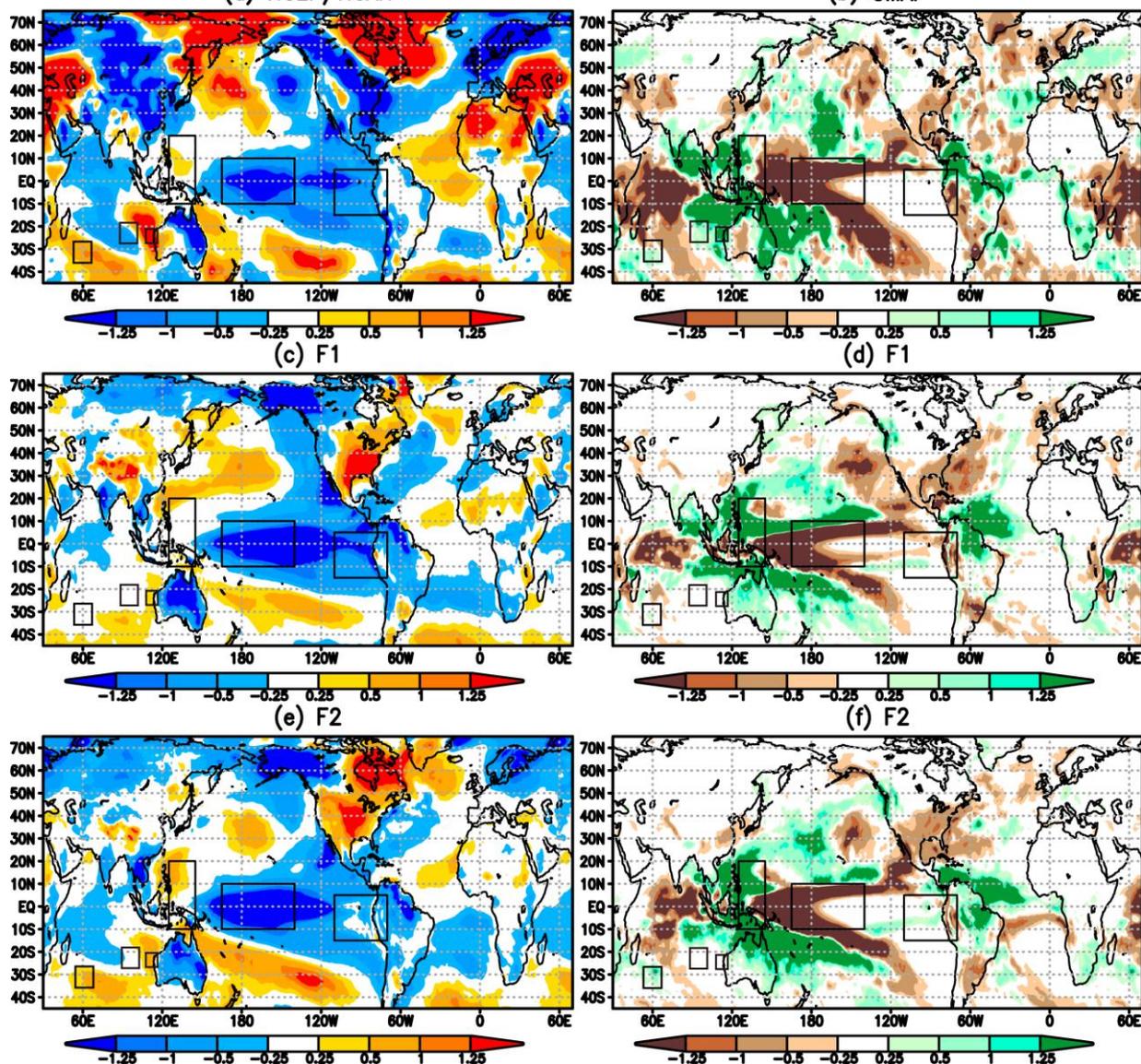
図(1)-34 (a)2009年12月から2010年2月で平均した海面水温/地表気温偏差の観測値(°C)。 (b) 2009年12月から2010年2月で平均した降水量偏差の観測値(mm/day)。 (c) 2009年12月から2010年2月で平均した海面水温/地表気温偏差を、SINTEX-F1システムにより、2009年10/1時点で予測した値(°C)。 (d) 2009年12月から2010年2月で平均した降水量偏差を、SINTEX-F1システムにより、2009年10/1時点で予測した値(mm/day)。 (e) (c)と同様だが、SINTEX-F2システムで予測した値。 (f) (d)と同様だが、SINTEX-F2システムで予測した値。 (g) (e)引く (c) (h) (f)引く (d)。

NNI

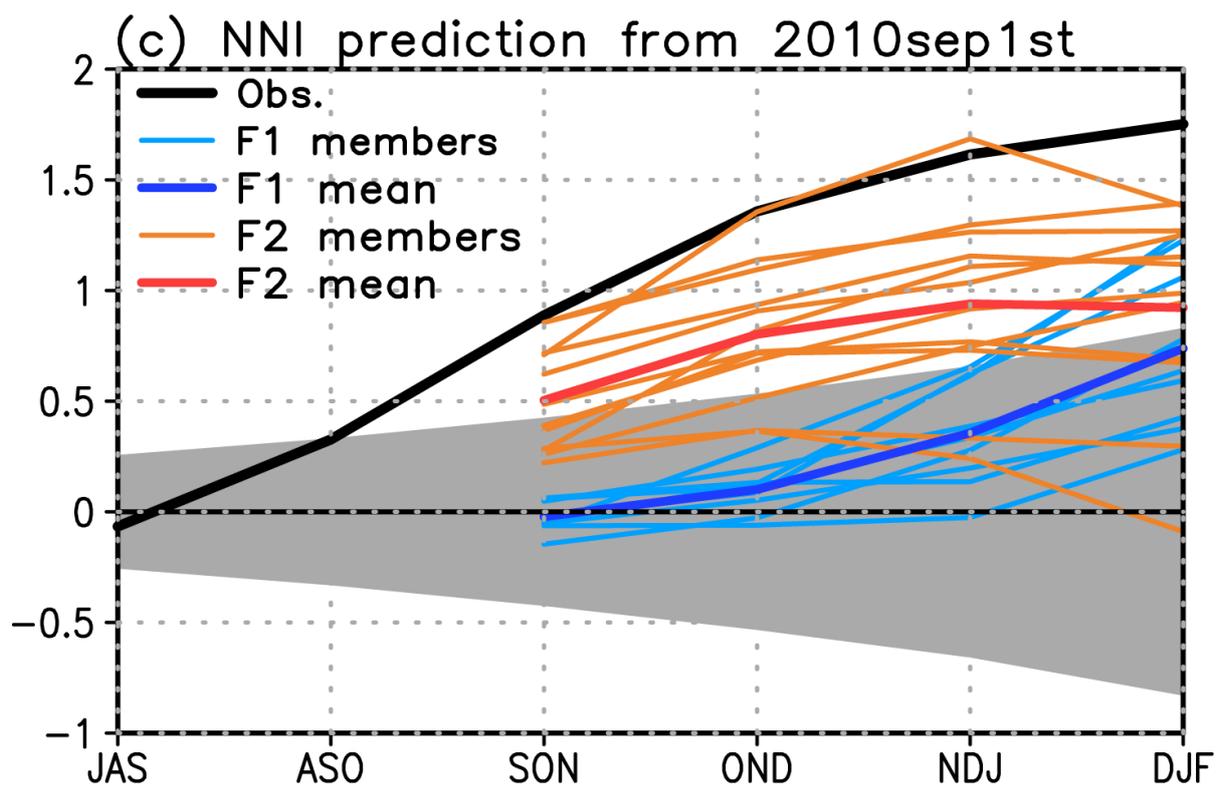


図(1)-35 図(1)-30と同様だが、ニンガルー・ニーニョ/ニーニャ現象の指標NNI (Kataoka et al. 2014で定義。南緯28度～南緯26度、東経108度～116度で領域平均した海面水温の平年値からの差で定義)について。

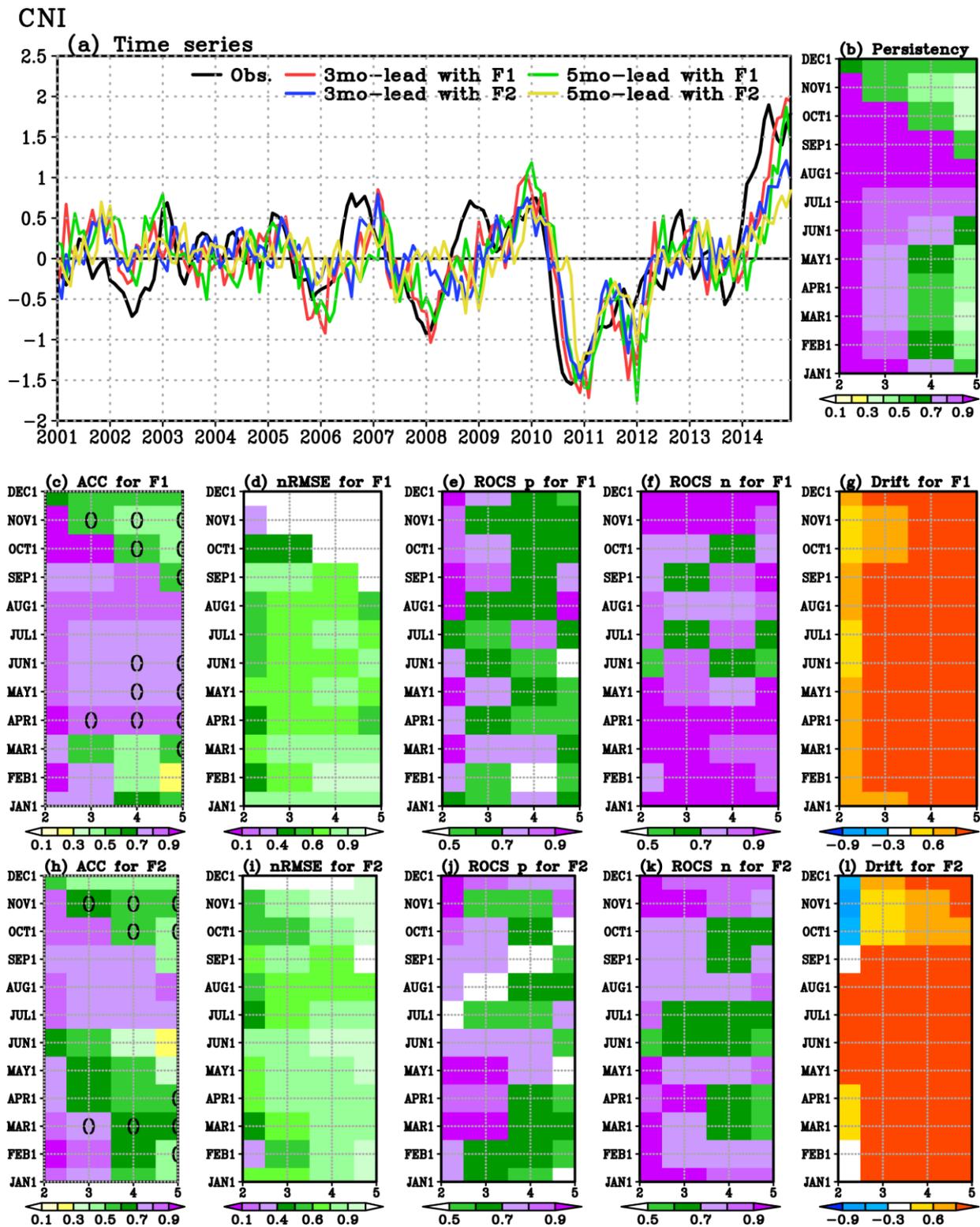
2010/11NDJ from Oct. 1 ini. (Left:2mAirTemp, Right:Rainfall)



図(1)-36 図(1)-34と同様だが、2010年11月から2011年1月平均について。予測値は2010年10月1日を初期値とする。



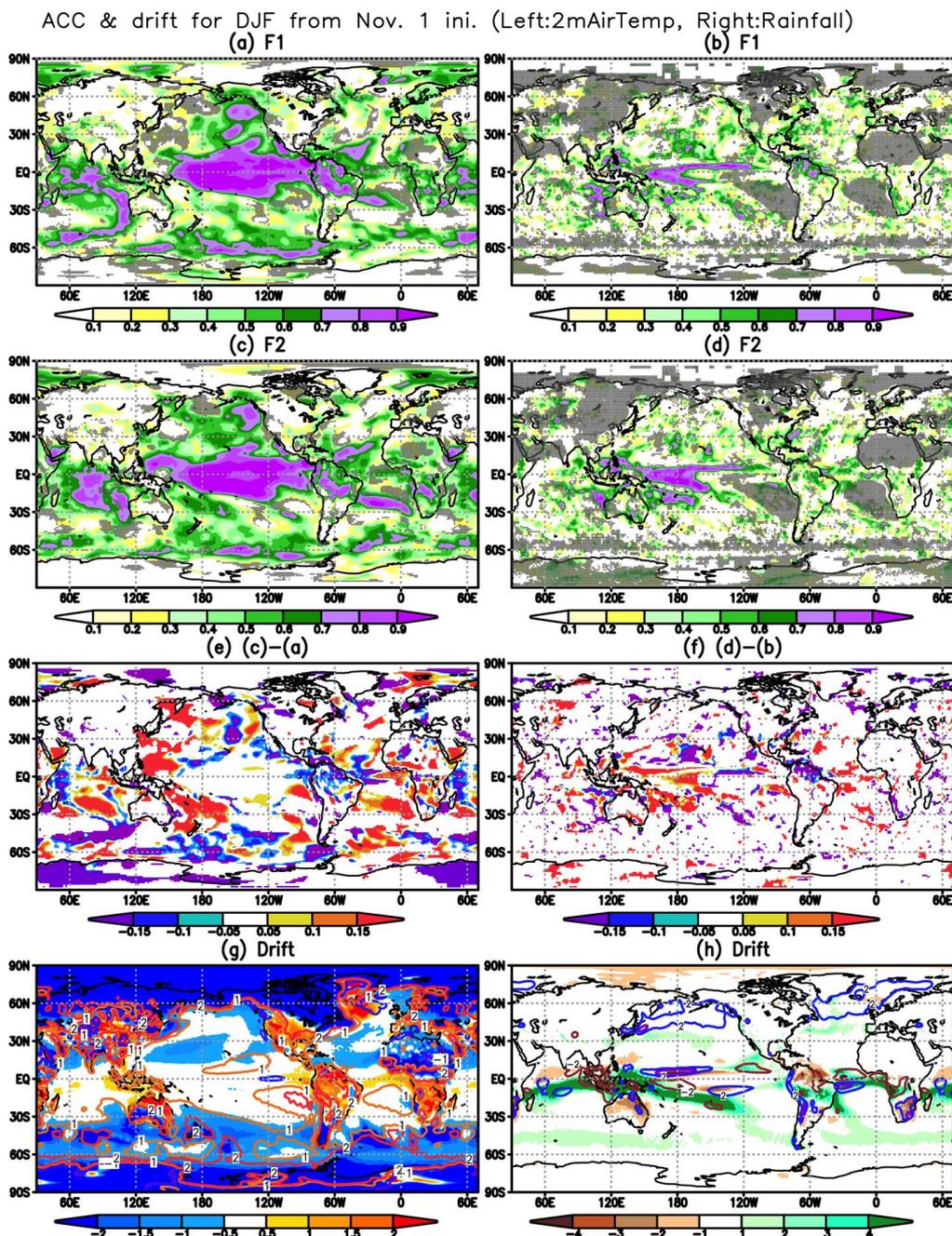
図(1)-37 図(1)-33と同様だが、2010年のニンガルー・ニーニョ指標NNIについて。予測値は2010年9/1を初期値としている。



図(1)-38 図(1)-30と同様だが カリフォルニーニョ・ニーニャ現象の指標CNIについて。

エルニーニョ現象、エルニーニョモドキ現象、ニンガルー・ニーニョ現象は、北半球の冬(12-2月平均)に最も成熟することが多い。そこで12-2月平均のSST偏差と地上気温偏差を11月1日から予測した時の予測精度マップをSINTEX-F1システムとF2システムで比較した(図(1)-39)。主に熱帯太平洋東部、亜熱帯太平洋西部、南インド洋亜熱帯の海水温の予測精度がF2で改善されている。また、降水量では、主に東南アジア諸国を含む海洋大陸やオーストラリア東岸での予測精度が向上している。他の季節において、SINTEX-F2システムではF1システムより、主に亜熱帯域の予測精度が向上していることが確認できる(図(1)-40, 41, 42)。

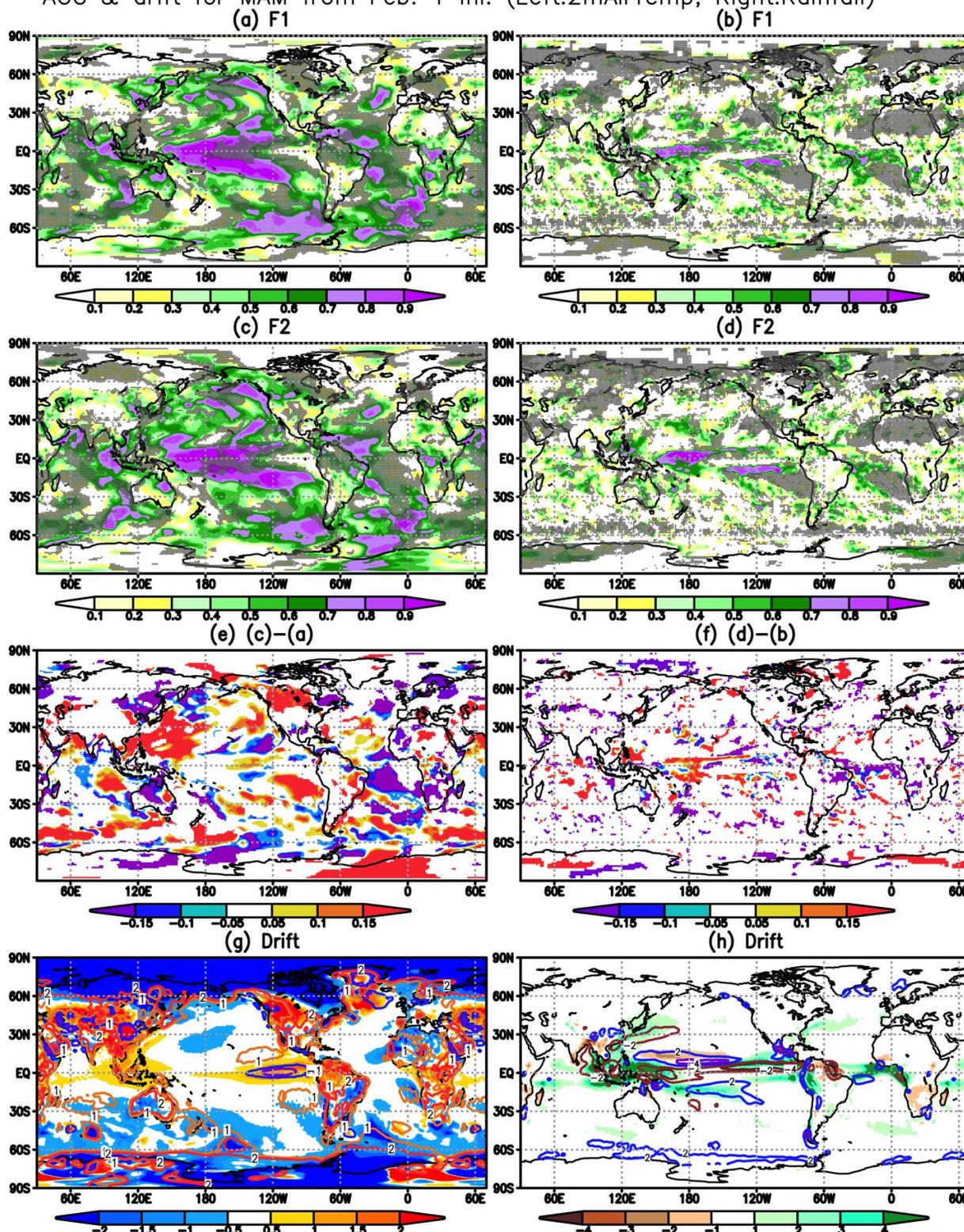
以上の成果は(Doi et al. 2016)として発表した。



図(1)-39 12-2月平均の地上気温偏差(陸上)及びSST偏差(海上)を11月1日から予測した場合の予測精度。観測と予測値(アンサンブル平均)の相関係数の水平図。値が1に近い程予測精度が高い。黒影は観測データのpersistent(偏差が将来そのまま続く)仮定よりも予測性能が高い領域。

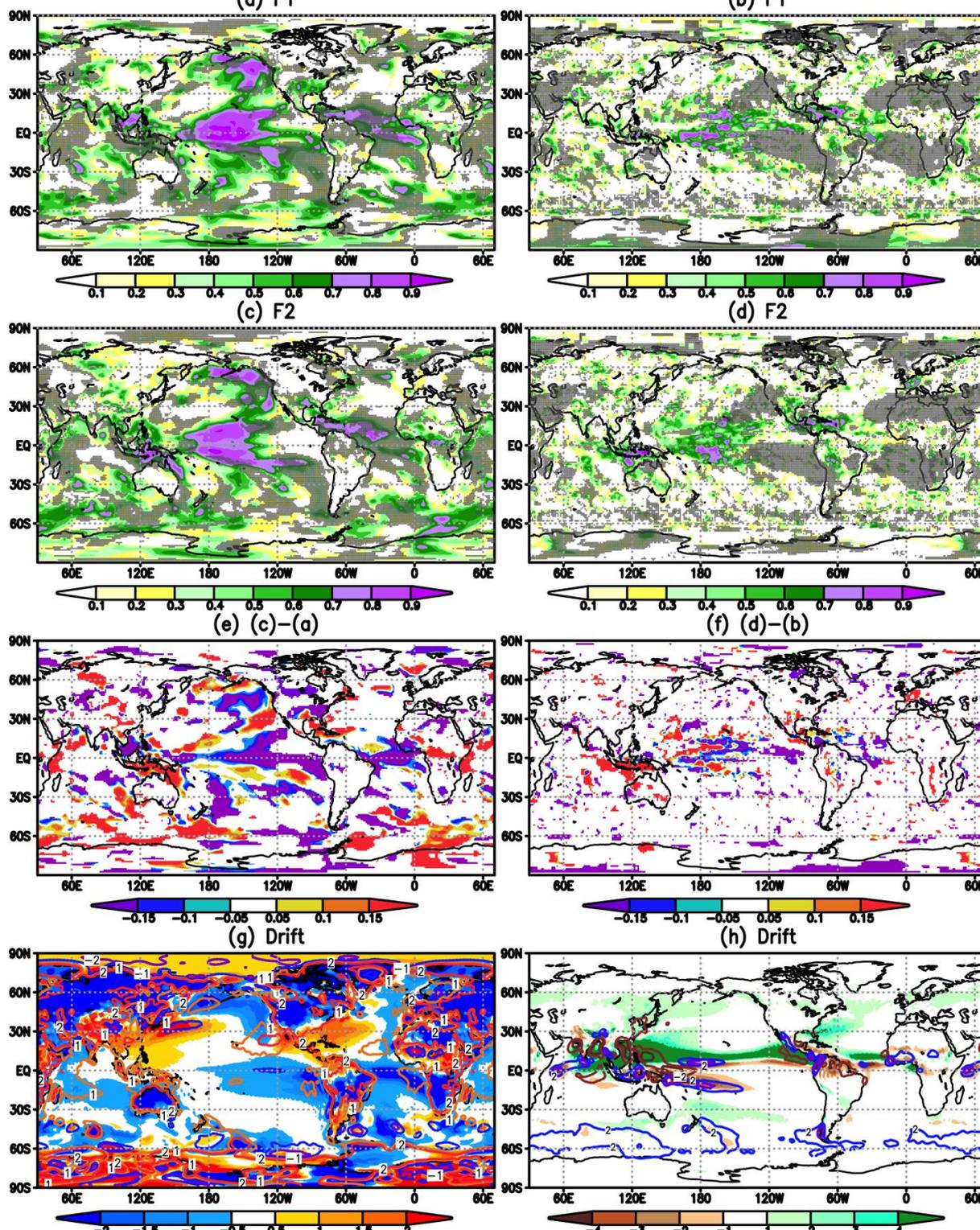
(a)SINTEX-F1, (c)SINTEX-F2システムより。(b), (d)は(a), (c)と同様だが、降水量偏差に対して。(e) (c)-(a)。(f) (d)-(b)。(g) 12-2月平均の地上気温偏差(陸上)及びSST偏差(海上)について、予測した気候値から観測した気候値を引いた値(°C)。コンターがF1で、色影がF2-F1。(h) 12-2月平均の降水量偏差について、予測した気候値から観測した気候値を引いた値(mm/day)。コンターがF1で、色影がF2-F1。

ACC & drift for MAM from Feb. 1 ini. (Left:2mAirTemp, Right:Rainfall)



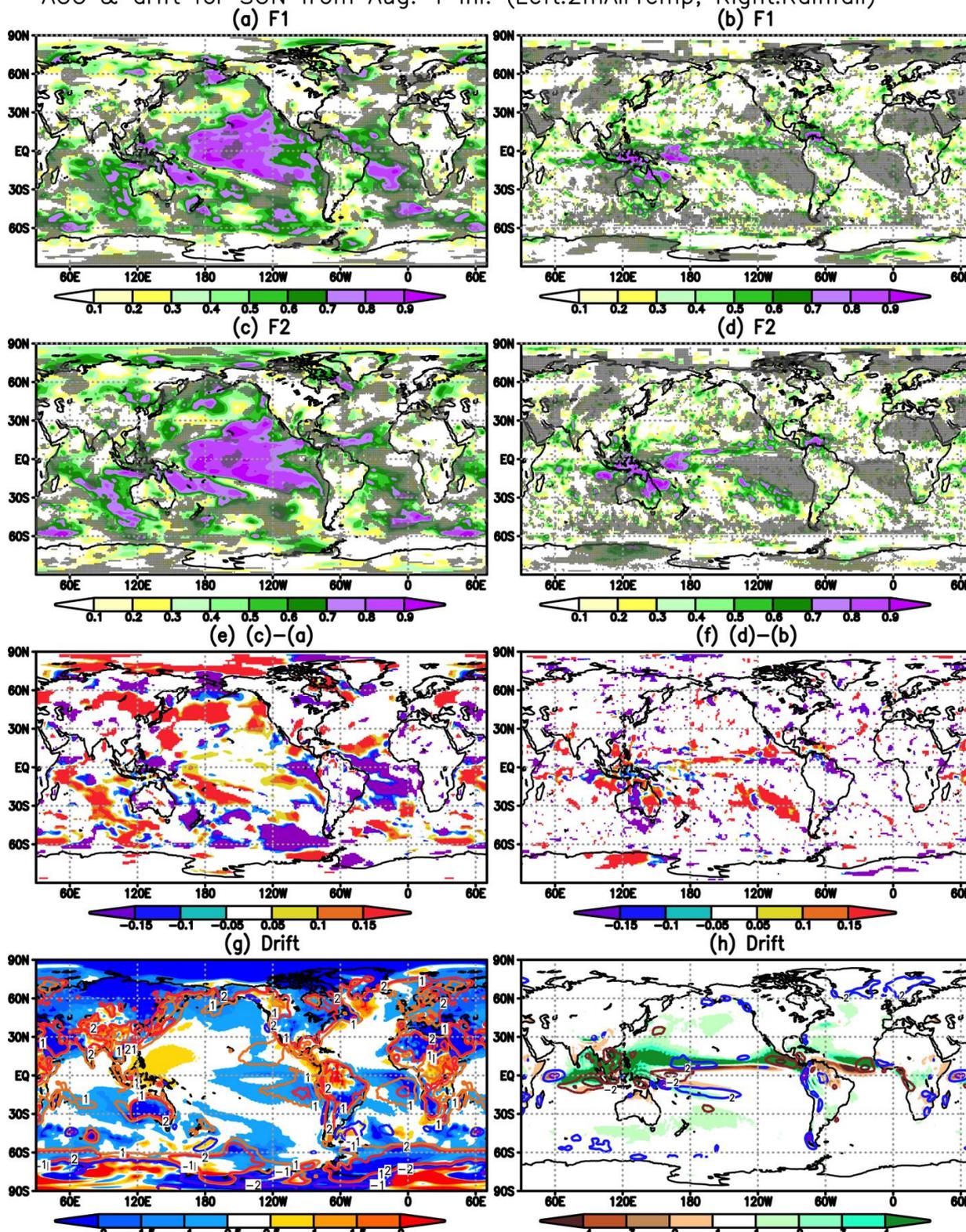
図(1)-40 図(1)-39と同様だが、3-5月平均を2月1日から予測した場合の予測精度。

ACC & drift for JJA from May 1 ini. (Left:2mAirTemp, Right:Rainfall)



図(1)-41 図(1)-39と同様だが、6-8月平均を5月1日から予測した場合の予測精度。

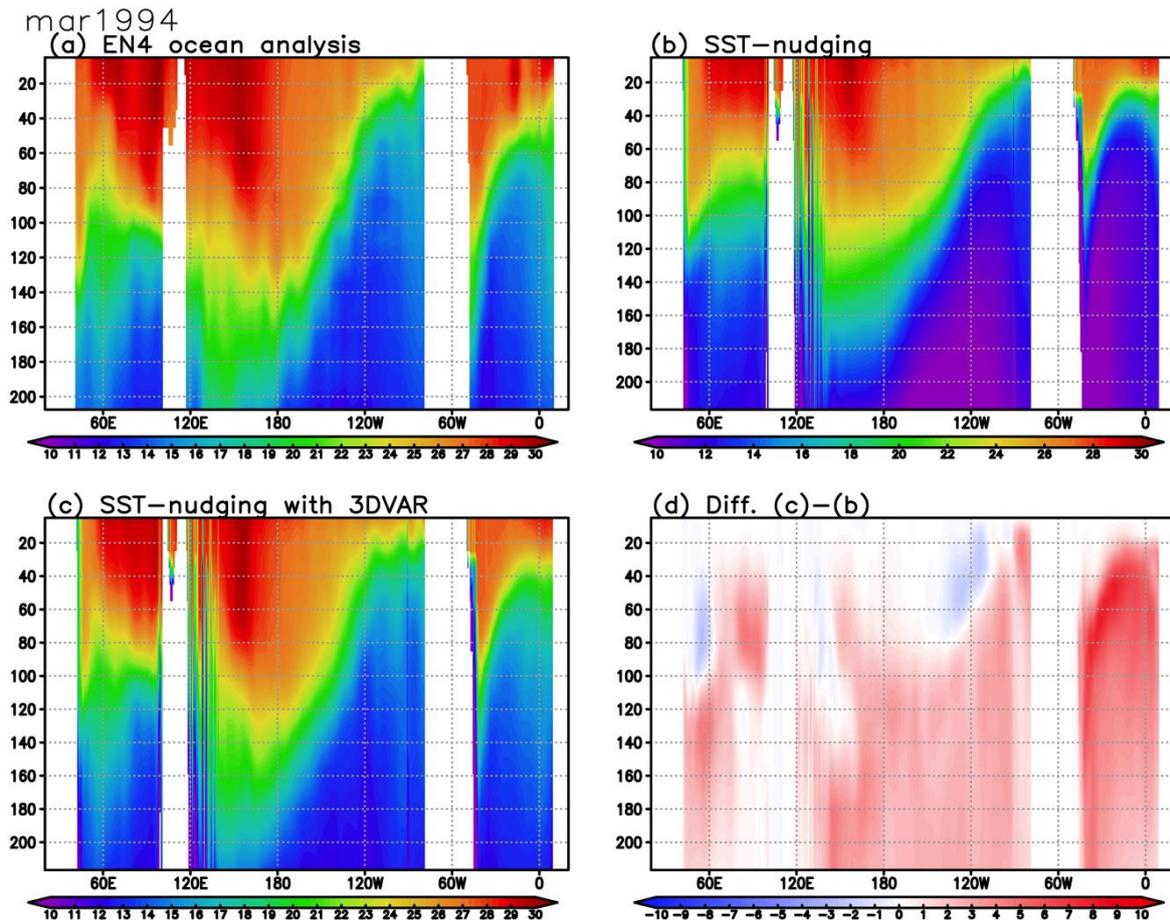
ACC & drift for SON from Aug. 1 ini. (Left:2mAirTemp, Right:Rainfall)



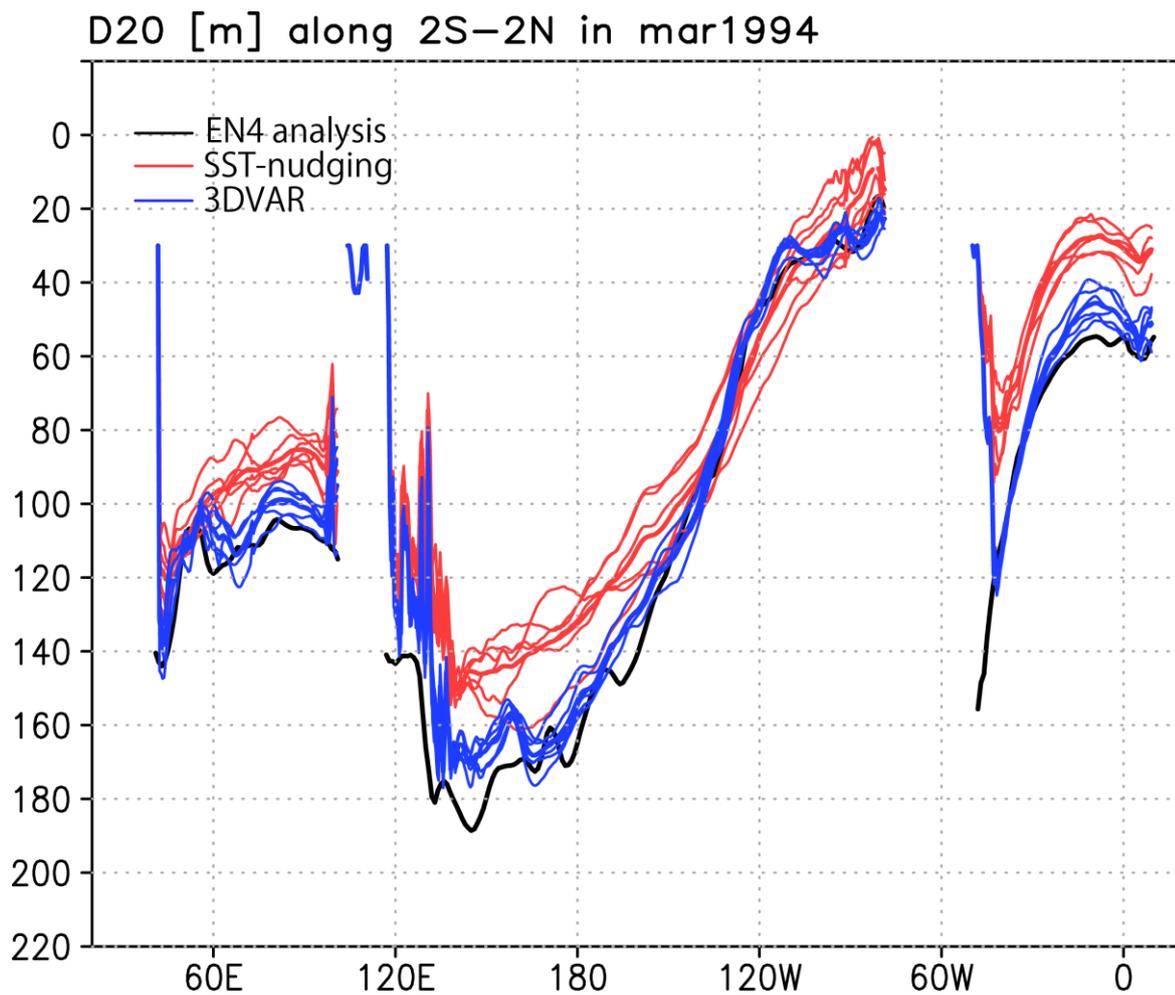
図(1)-42 図(1)-39と同様だが、9-11月平均を8月1日から予測した場合の予測精度。

b 初期値作成システムの高度化

過去最も強いインド洋ダイポールモード現象である1994年の正イベントのプレコンディショニングとして重要な1994年5月に注目して、新・旧スキームをそれぞれ比べた。赤道に沿った水温の鉛直断面図を見ると(図(1)-43)、旧スキームでは熱帯太平洋東部の深度100m付近や熱帯インド洋東部の50m付近が現実に比べて冷たいエラーがあるが、新スキームでは修正されており、3DVAR補正が効果的に働いていることを確認した。これは、20度等温線深度でも確認できる(図(1)-44)。

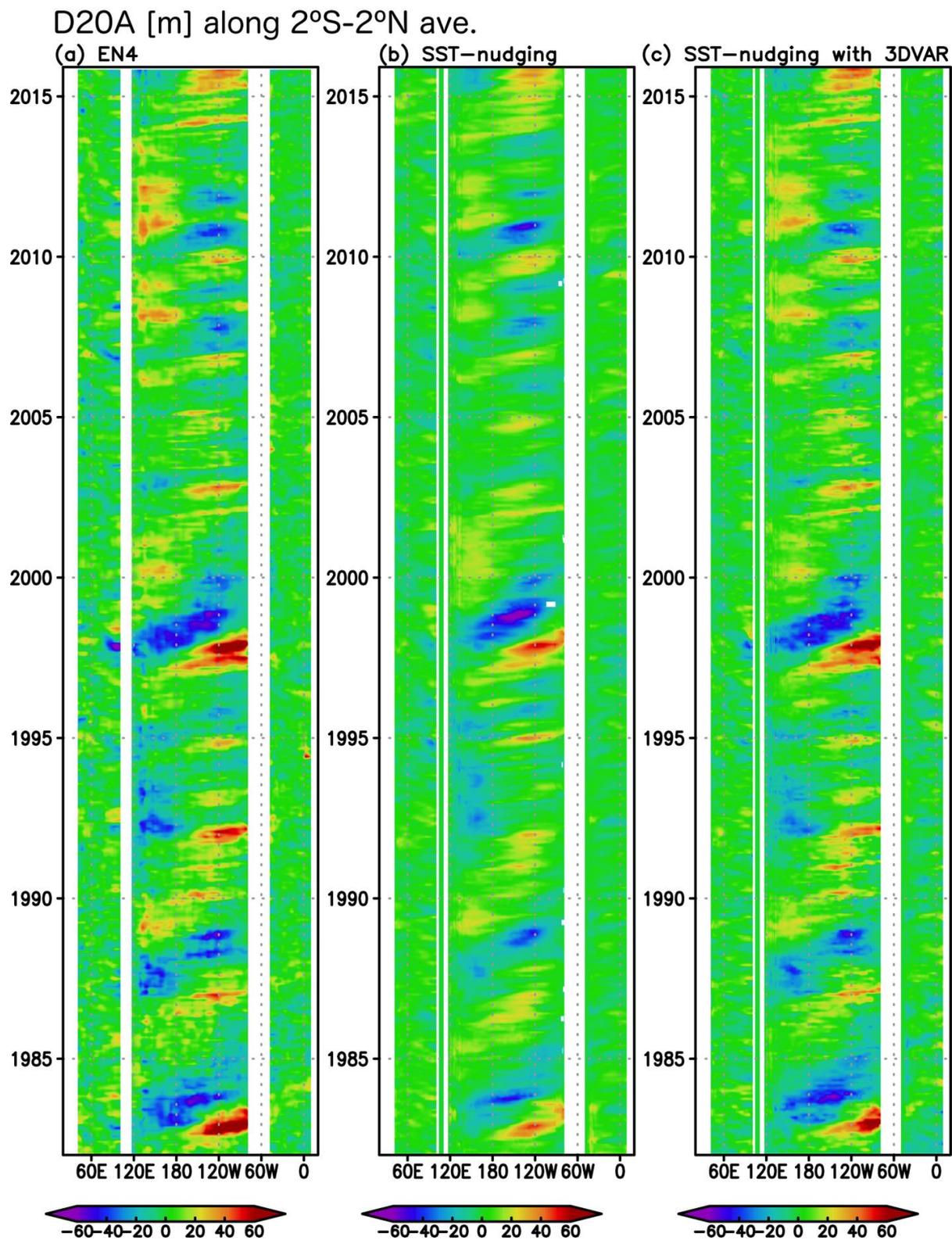


図(1)-43 1994年3月の月平均水温の赤道に沿った鉛直断面図(南北2度で平均) [°C]。(a):観測(EN4 gridded analysis data), (b):SINTEX-F2モデルによるSST-nudging計算(旧初期化スキーム), (c):3DVAR補正を導入した新初期化スキームの計算結果。(d) (c)から(b)を引いた差。



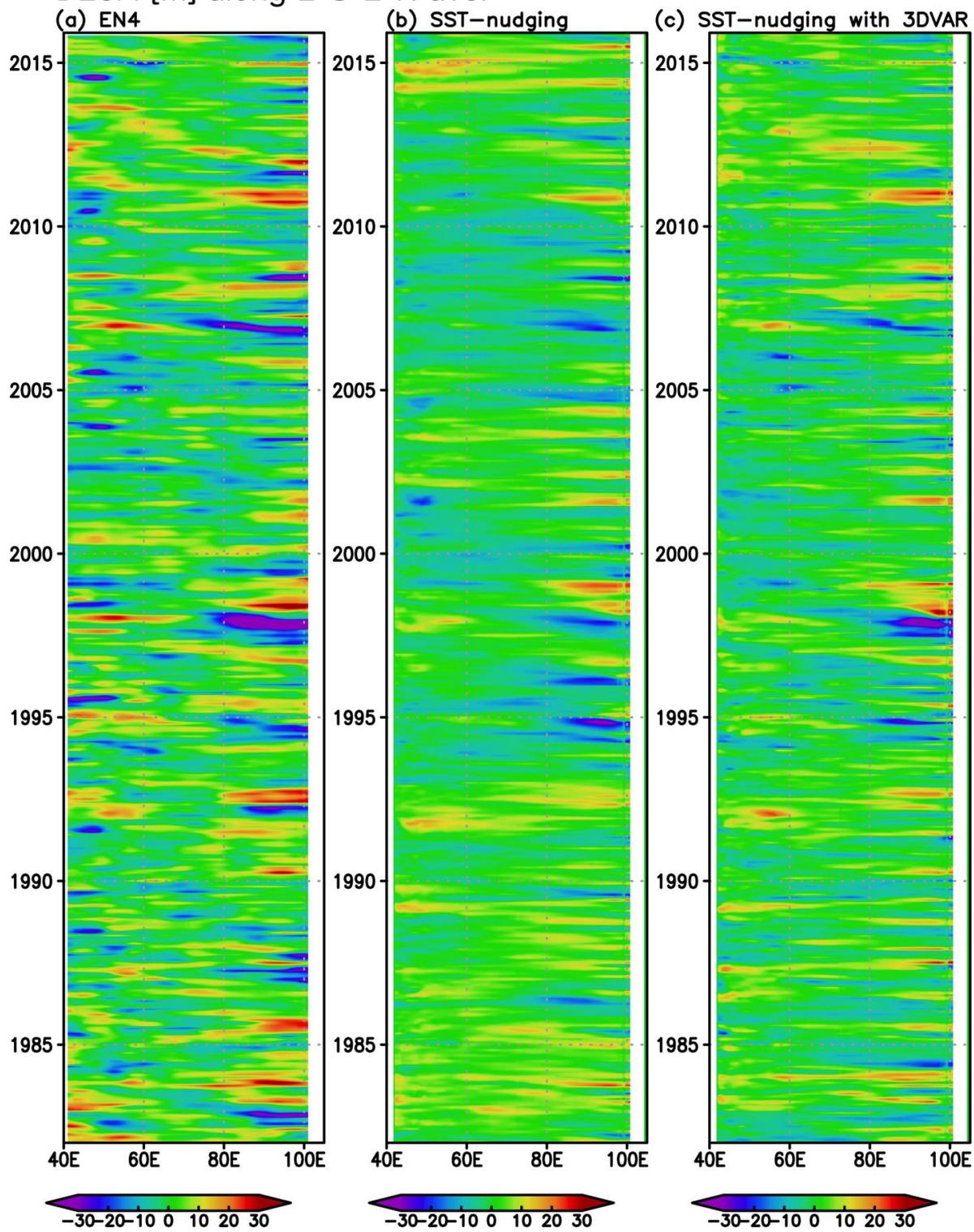
図(1)-44 1994年3月の赤道に沿った(南北2度で平均)20度等温線深度偏差(m)。黒:観測(EN4 gridded analysis data), 赤:SINTEX-F2モデルによるSST-nudging計算(旧初期化スキーム)の6アンサンブルメンバー, 青:3DVAR補正を導入した新初期化スキームの計算結果の6アンサンブルメンバー。

次に、赤道付近の20°C等温深偏差の時間経度図(全海盆: 図(1)-45、インド洋のみ: 図(1)-46)を比べてみると、エルニーニョ現象にとって重要な熱帯太平洋東部、インド洋熱帯域、大西洋熱帯域が効果的に補正されていることを確認した。



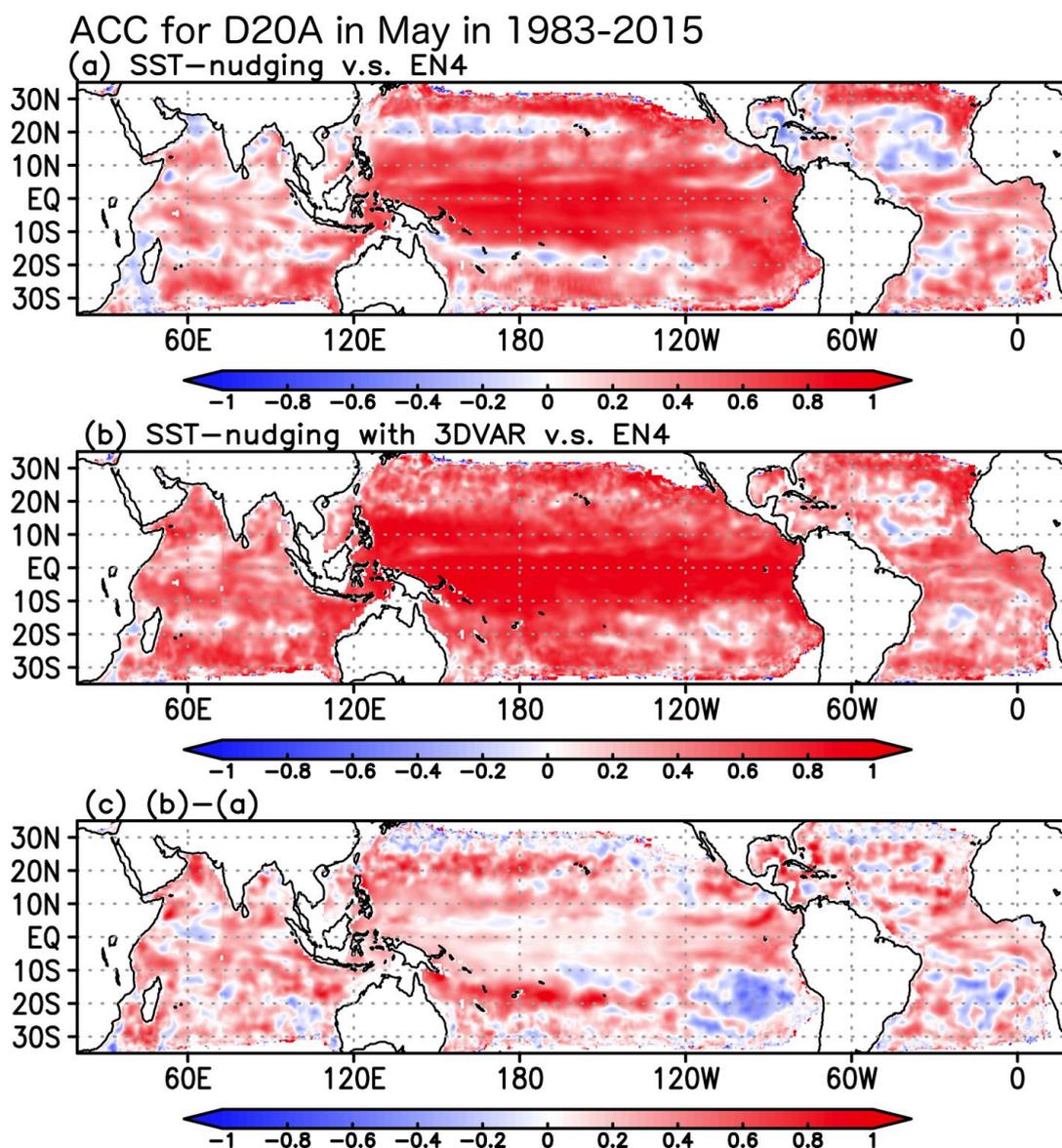
図(1)-45 赤道に沿った(南北2度で平均)20°C等温深偏差の時間経度図[m]。(a): EN4 analysis data, (b): SINTEX-F2モデルによるSST-nudging計算, (c): 3DVAR補正を導入した計算結果。

D20A [m] along 2°S-2°N ave.

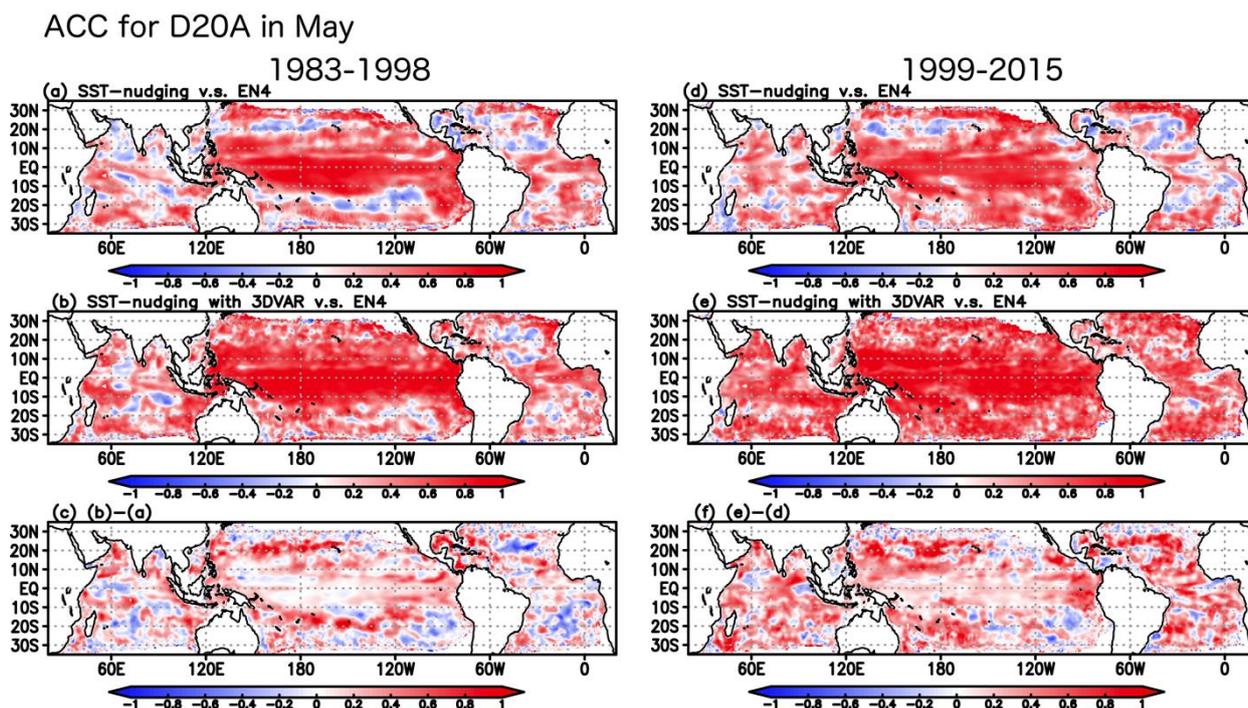


図(1)-46 図(1)-45と同様だが、インド洋について。

インド洋ダイポールモード現象は、北半球の初夏に発生し晩秋に成熟する。そのプレコンディションとして重要な5月に注目し、 20°C 等温深偏差の再現スキルを比較した(図(1)-47)。SSTナッジング法でも熱帯太平洋は概ねよく再現できている。3DVAR補正を導入することで、熱帯インド洋、熱帯大西洋の再現性が向上した。ニンガルー・ニーニョ現象に重要なオーストラリア西岸域、インド洋亜熱帯ダイポール現象が発生する南インド洋などの亜熱帯域も効果的に補正されていた。従って、これらの計算結果を初期値とする気候変動現象の予測精度も向上することが期待される。また新スキームの効果は、海洋亜表層の観測データが増え始める2000年以降で顕著になることも確認した(図(1)-48)。



図(1)-47 (a) 20°C 等温深偏差[m]のEN4 analysis dataとSINTEX-F2モデルによるSST-nudging計算の相関係数。1983-2015年の5月に注目。(b)EN4 analysis dataと3DVAR補正を導入した計算の相関係数。(c) (b)-(a)。



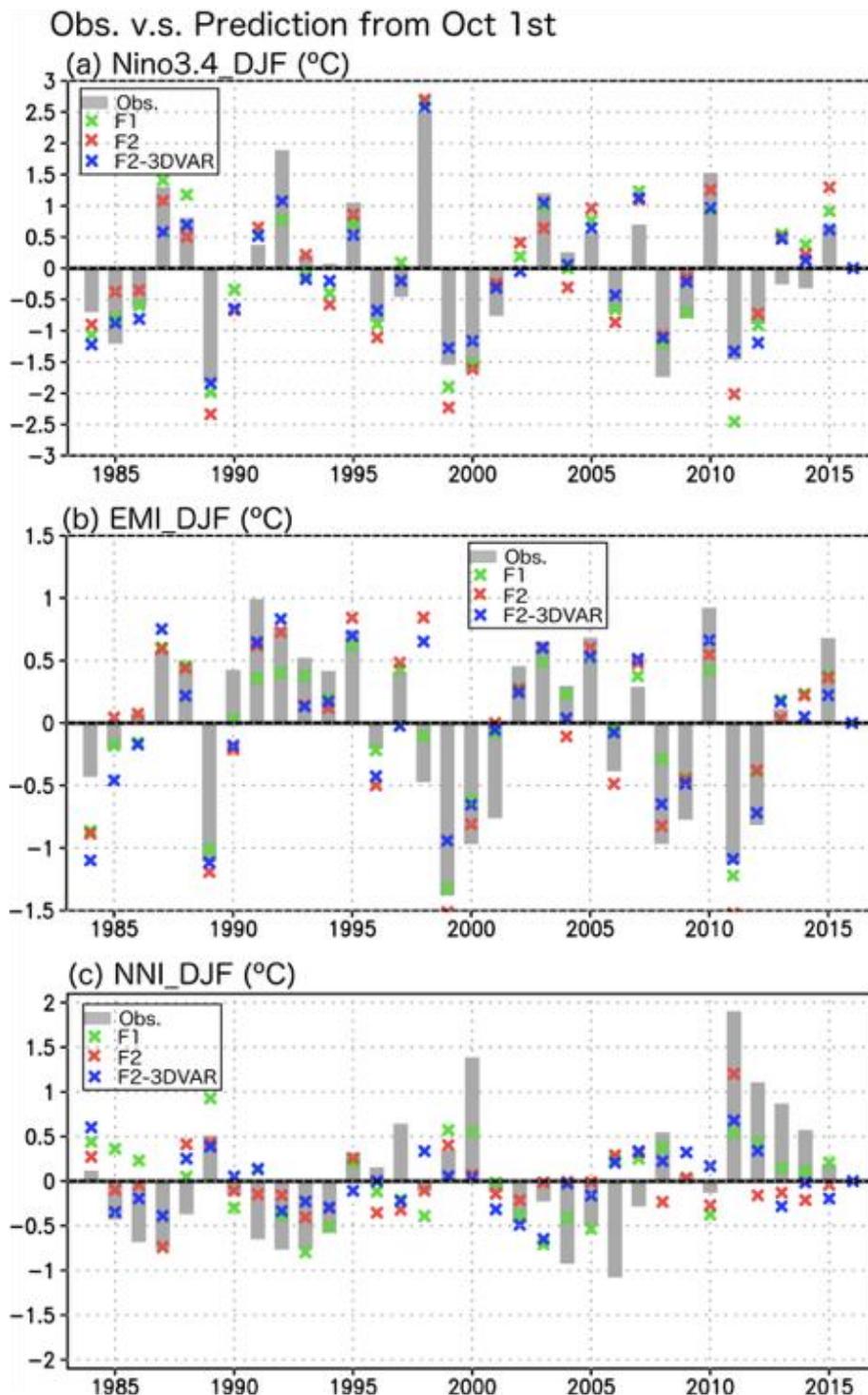
図(1)-48 図(1)-47と同様だが、左は解析期間が1983-1998年、右は解析期間が1999-2015年。

次にそれぞれの初期値化スキームを使うことで予測精度がどう変化するかを調べた。まず、季節予測にとって最も重要な現象の一つであるエルニーニョ現象の予測精度を調べた(図(1)-49a)。エルニーニョ現象の予測で世界最先端の精度を誇ったSINTEX-F1システムと同程度の予測精度をSINTEX-F2システムでも実現できた。

次に本課題で注目しているエルニーニョモドキ現象の予測精度を調べた(図(1)-49b)。エルニーニョモドキ現象は2000年以降に頻発するようになったが、その最大のイベントである2009/10年のエルニーニョモドキ現象の予測は、SINTEX-F1システムでは過小評価していたが、SINTEX-F2システムや3DVARを導入したシステムでは改善されている。

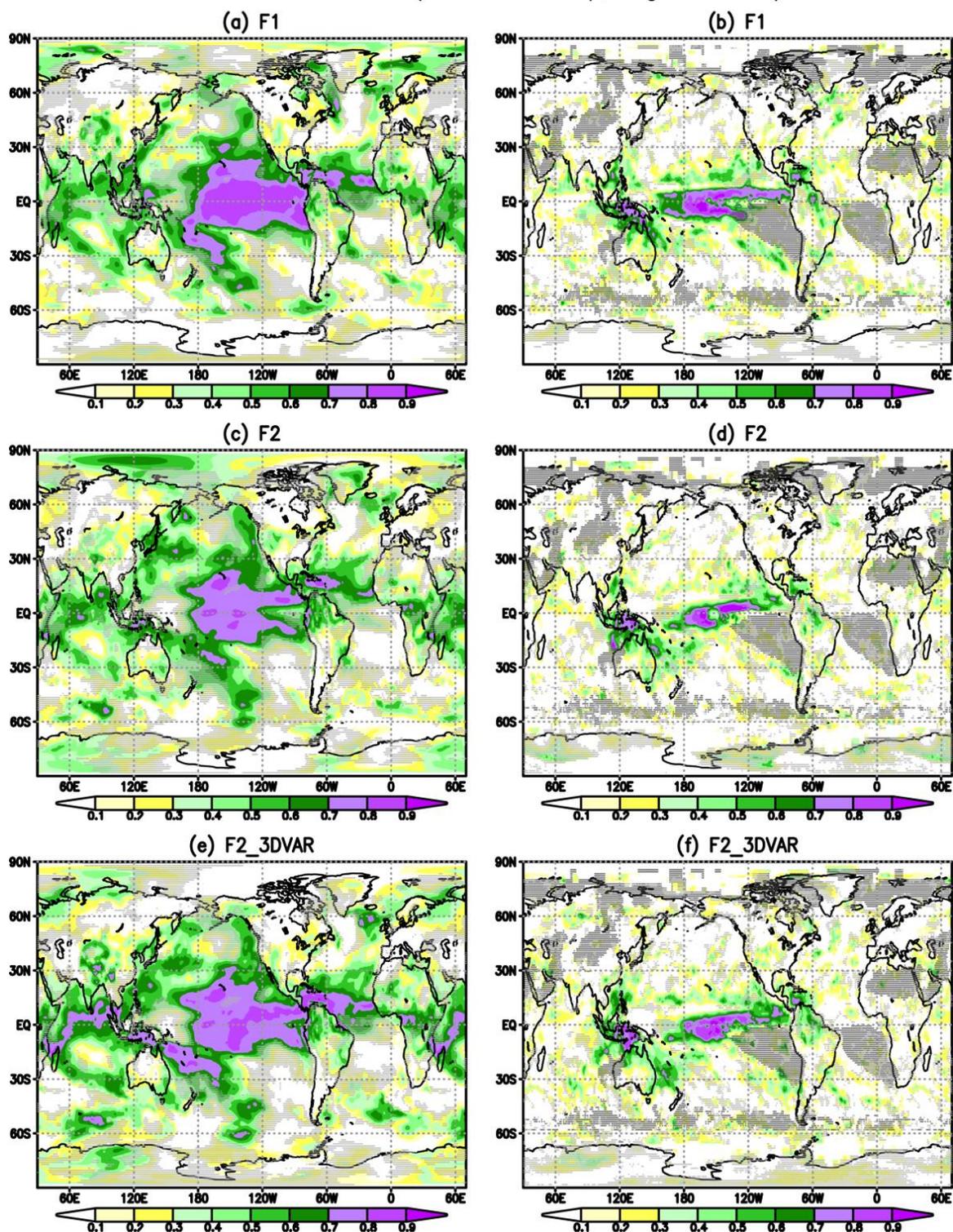
さらに、ニングルー・ニーニョ現象の予測精度も調べた(図(1)-49c)。最大のイベントである2010/11年のニングルー・ニーニョ現象の発生予測は、SINTEX-F1システムでは過小評価していたが、SINTEX-F2システムでは改善された。

予測精度の空間マップでは(図(1)-50)、従来エルニーニョ現象に比べて予測が潜在的に難しいとされていたインド洋ダイポールモード現象が、海洋観測の充実によって、飛躍的に予測しやすくなることわかる。この結果は、今後のインド洋観測網の発展に資することが期待される。



図(1)-49 a:エルニーニョ指標「Nino3.4」の年々変動。北緯5度～南緯5度、西経170度～120度で領域平均した海面水温の平年値からの差。12-2月平均に注目。単位は°C。灰:観測, 緑:F1予測システムによる10/1からの予測値(アンサンブル平均), 赤: SINTEX-F2の結果。青: SINTEX-F2に3DVARを導入した結果。b:aと同様だがエルニーニョモドキ指標(領域A(165° E-140° W, 10° S-10° N)、B(110° W-70° W, 15° S-5° N)、C(125° E-145° E, 10° S-20° N)のそれぞれの領域平均した海面水温偏差を使って $A-0.5 \times (B+C)$ で定義)について。c:aと同様だがニングルー・ニーニョ指標(28°S-26°S、108°E-116°Eで領域平均した海面水温の平年値からの差で定義)

ACC for SON from Jun. 1 ini. (Left:2mAirTemp, Right:Rainfall)



いて。

図(1)-50 (a)9-11月平均の地上2m気温偏差(右柱)と降水量偏差(左柱)を6月1日から予測した場合の偏差相関係数。1に近い程精度が高い。解析期間は1983-2015年。上段：初期値にSST-nudging法を用いたSINTEX-F1の結果。中段：初期値にSST-nudging法を用いたSINTEX-F2の結果。下段：3DVAR補正を導入した新しい初期化スキームを使ったSINTEX-F2の結果。

上述したように近年頻発してきた自然気候変動現象の予測は巨視的には改善されたと言える。しかし、予測の改善が見られないイベントもあった。更なる季節予測精度の向上のためには、それぞれの現象のイベント毎のメカニズムを観測とモデルを使って丁寧に検証し、その予測可能性のポテンシャルソースを明らかにする必要がある。また予測アンサンブルメンバーの多数化によって決定論的な予測から確率論的な予測システムの開発が重要になってくるであろう。

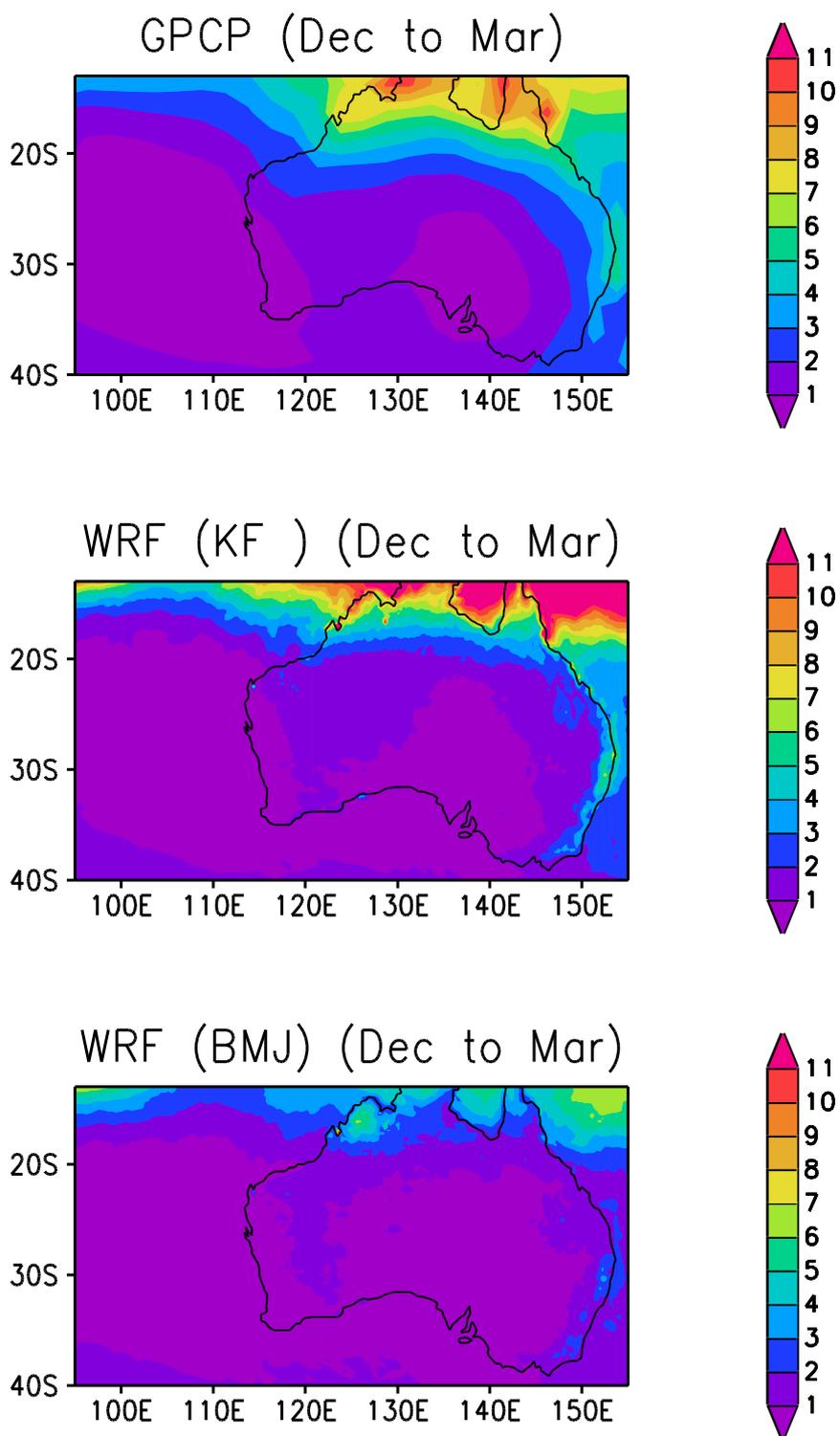
(2) アジア-オセアニア域へのダウンスケーリング

1) オーストラリアにおける力学的ダウンスケーリング技術開発

オーストラリア周辺域を対象とした力学的ダウンスケーリングに使用するWRF領域モデルの具体的な設定を決定するため、初期値や境界値として再解析データを使用し、テスト計算を繰り返し領域モデルの性能をファインチューンした。計算の設定は以下のとおりである。

- ・ 過去再現実験：1990年1月1日から2012年12月31日まで
- ・ 水平方向の境界条件：ERAinterim 6時間毎の再解析データ（水平解像度：0.75度）
- ・ 表面の境界条件：NOAA SSTOIV2 データ（水平解像度：1度）
- ・ 初期値：1990年1月1日におけるERAinterim 6時間毎の再解析データ

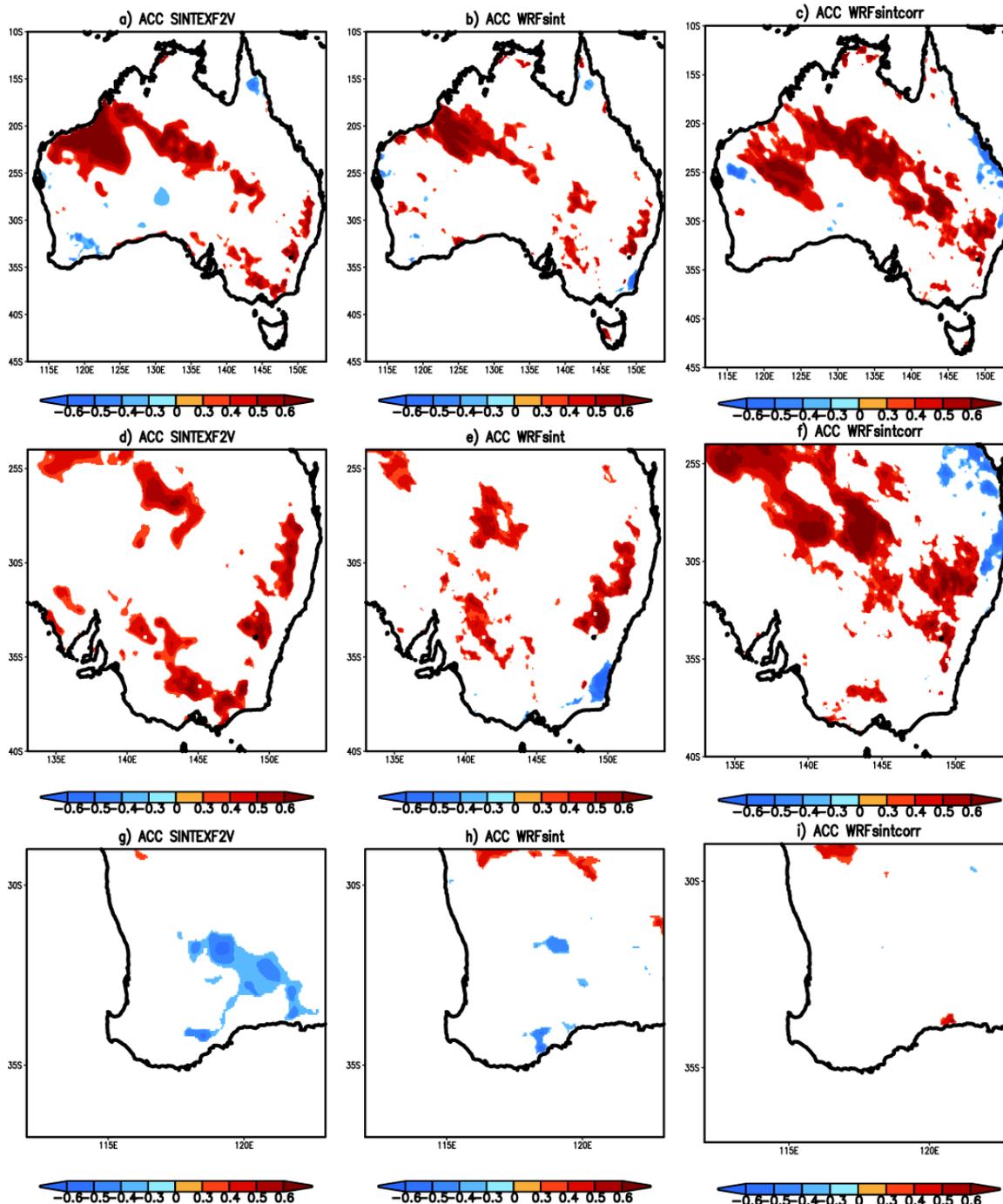
特に、積雲パラメタリゼーションに注目して上記の計算結果を比較したところ、BMJ法よりKF法を採用した方が、オーストラリアの降水量をより良く再現できることが解った(図(1)-51)。



図(1)-51 上段：観測データGPCPによる12-3月の平均降水量。中段：積雲パラメタリゼーションKF法を用いたWRF領域モデルにおける12-3月の平均降水量。下段：積雲パラメタリゼーションBMJ法を用いたWRF領域モデルにおける12-3月の平均降水量。

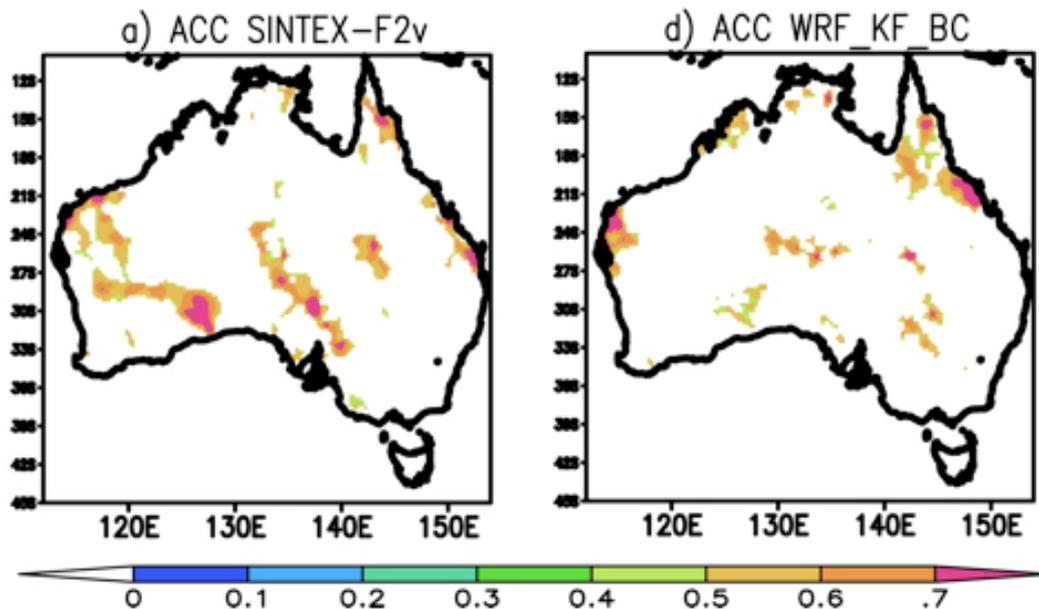
オーストラリアを対象とし、課題(1)で開発したSINTEX-F2季節予測システムのアウトプットを数10kmから数km間隔で、湿度、気温、日射量等を力学的にダウンスケーリングし、詳細な予測情報を作成した。オーストラリアにおける農作にとって重要な南半球の冬(6-8月平均)の降水量を5/1から予測した場合の予測スキルを、高解像度雨量観測データを用いて検証した(図(1)-52)。SINTEX-F2システムによる予測値(絶対値)をWRF大気領域モデルに代入し力学的ダウンスケーリング(WRFsint)しても、経年変動の予測スキルに大きな違いは見られなかった。一方で、SINTEX-F2システムによる予測値の気候値に見られるシステムティックなバイアス(気候ドリフト)を補正し、力学的ダウンスケーリング(WRFsintcorr)すると、多くの場所で予測スキルが向上することを確認した。特に降水量が多いオーストラリア南東域の予測精度が向上した。またオーストラリア南西部の降水量変動をSINTEX-F2システムで予測すると、観測の偏差と符合が逆になる傾向があったが、力学的ダウンスケーリングWRFsintcorrでは、そのエラーが改善された。

6-8月平均の降水量偏差の予測スキル (観測と5/1からの予測値との相関係数)



図(1)-52 南半球の冬(6-8月平均)の降水量を5/1から予測した場合の予測スキル。観測と予測値(アンサンブル平均)の相関係数の水平図。値が1に近い程予測精度が高い。上段がオーストラリア全域で水平27km間隔のスキル、中段がオーストラリア南東域の水平9km間隔のスキル、下段がオーストラリア南西域の水平9km間隔のスキル。左柱がSINTEX-F2システムの結果、中柱がSINTEX-F2システムによる予測値(絶対値)をWRF大気領域モデルに代入し力学的ダウンスケーリング(WRFsint)した結果、右柱がSINTEX-F2システムによる予測値の気候値に見られるシステムティックなバイアス(気候ドリフト)を補正し、力学的ダウンスケーリングした結果(WRFsintcorr)。

次に、オーストラリアの雨季に当たる南半球の夏(12-1月平均)の降水量を11/1から予測した場合の予測スキルを、観測データを用いて検証した(図(1)-53)。SINTEX-F2システムによる予測値の気候値に見られるシステムティックなバイアス(気候ドリフト)を補正し、力学的ダウンスケーリングすると、降水量が多いオーストラリア北東域の予測精度が向上した。この成果は(Ratnam et al. 2017)として発表した。



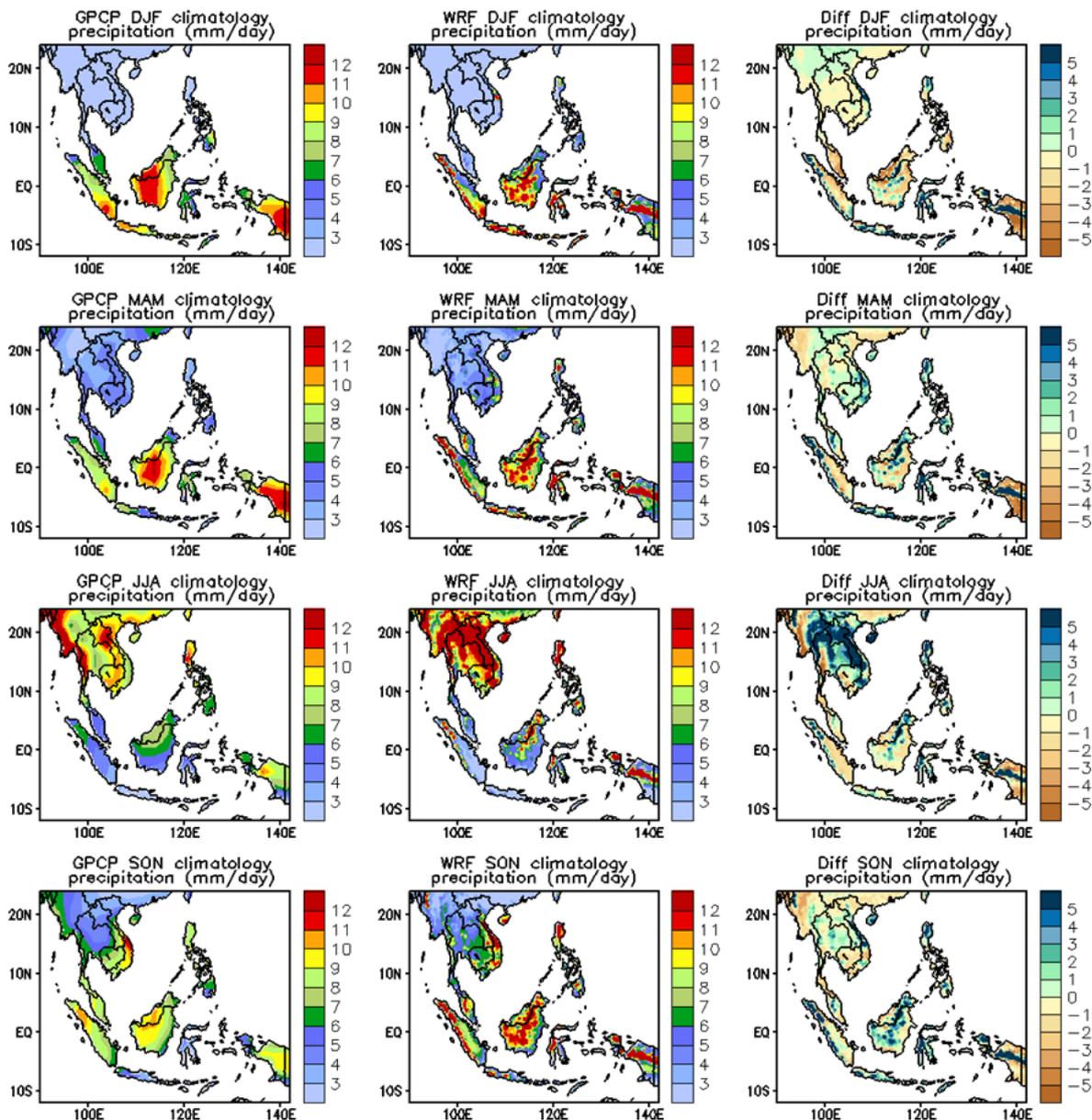
図(1)-53 南半球の夏(12-2月平均)の降水量を11/1から予測した場合の予測スキル。観測と予測値(アンサンブル平均)の相関係数の水平図。値が1に近い程予測精度が高い。左がSINTEX-F2システムの結果、右がSINTEX-F2システムによる予測値の気候値に見られるシステムティックなバイアス(気候ドリフト)を補正し、力学的ダウンスケーリングした結果。

2) 東南アジアにおける力学的ダウンスケーリング技術開発

東南アジアを対象とした力学的ダウンスケーリングに使用するWRF領域モデルの具体的な設定を決定するため、初期値や境界値として再解析データを使用し、テスト計算を繰り返し領域モデルの性能をファインチューンした。計算の設定は以下のとおりである。

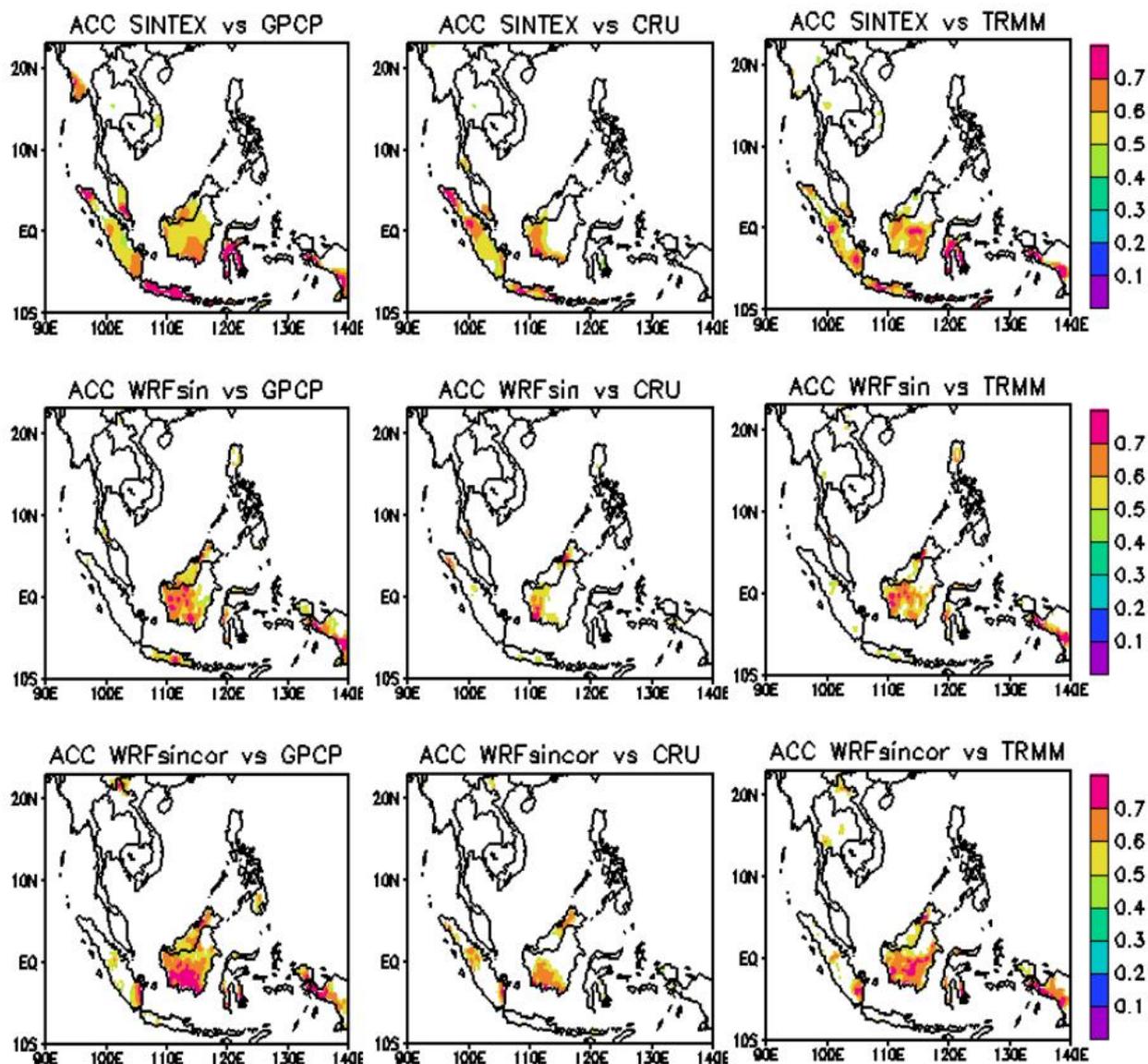
- ・ 過去再現実験：1990年1月1日から2013年1月1日まで
- ・ 水平方向の境界条件：ERAinterim 6時間毎の再解析データ(水平解像度：0.75度)
- ・ 表面の境界条件：NOAA SSTOIV2データ(水平解像度：1度)
- ・ 初期値：1990年1月1日におけるERAinterim 6時間毎の再解析データ

WRF領域モデルは東南アジアの降水量の季節変動を概ね良く再現できることが解った(図(1)-54)。しかし、インドネシアの地形が切り立った場所では、WRFモデルは降水量を過大評価する傾向にある。このようなモデルバイアスがあることは、力学的ダウンスケーリングを実施する際に注意する必要がある。本研究開発により、領域モデルの設定が決まり、力学的ダウンスケーリングの準備が整った。



図(1)-54 1991-2012年で平均した降水量の気候値(mm/day)。GPCP観測データ(左図),WRF領域モデル(中央),モデルバイアス(右図)。上段から冬、春、夏、秋について。

次に、東南アジアを対象とし、SINTEX-F2季節予測システムのアウトプットを数10km間隔で、湿度、気温、日射量等を力学的にダウンスケーリングし、詳細な予測情報を作成することに成功した。東南アジアの雨季にあたる北半球の夏(6-8月平均)の降水量を5/1から予測した場合の予測スキルを、観測データを用いて検証した(図(1)-55)。SINTEX-F2システムによる予測値の気候値に見られるシステムティックなバイアス(気候ドリフト)を補正し、力学的ダウンスケーリングすると、地形が複雑なボルネオ島の降水量の予測精度が向上した。



図(1)-55 北半球の夏(6-8月平均)の降水量を5/1から予測した場合の予測スキル。観測と予測値(アンサンブル平均)の相関係数の水平図。値が1に近い程予測精度が高い。上段がSINTEX-F2システムの結果、中段がSINTEX-F2システムによる予測値を力学的ダウンスケーリングした結果、下段がSINTEX-F2システムによる予測値の気候値に見られるシステムティックなバイアス(気候ドリフト)を補正し、力学的ダウンスケーリングした結果。左柱、中央柱、右柱はそれぞれ異なる観測データをリファレンスとした場合。

以上の成果は(Ratna et al. 2017)として発表した。

本成果により、アジア-オセアニア域のそれぞれについて力学的ダウンスケーリング技術を開発し、その有効性を示した。今後は大気海洋結合プロセスをより精緻に解像する領域結合モデルを使うことで、更なる精度向上が期待される。

(3) アジア-オセアニア域の気候予測情報の社会応用研究

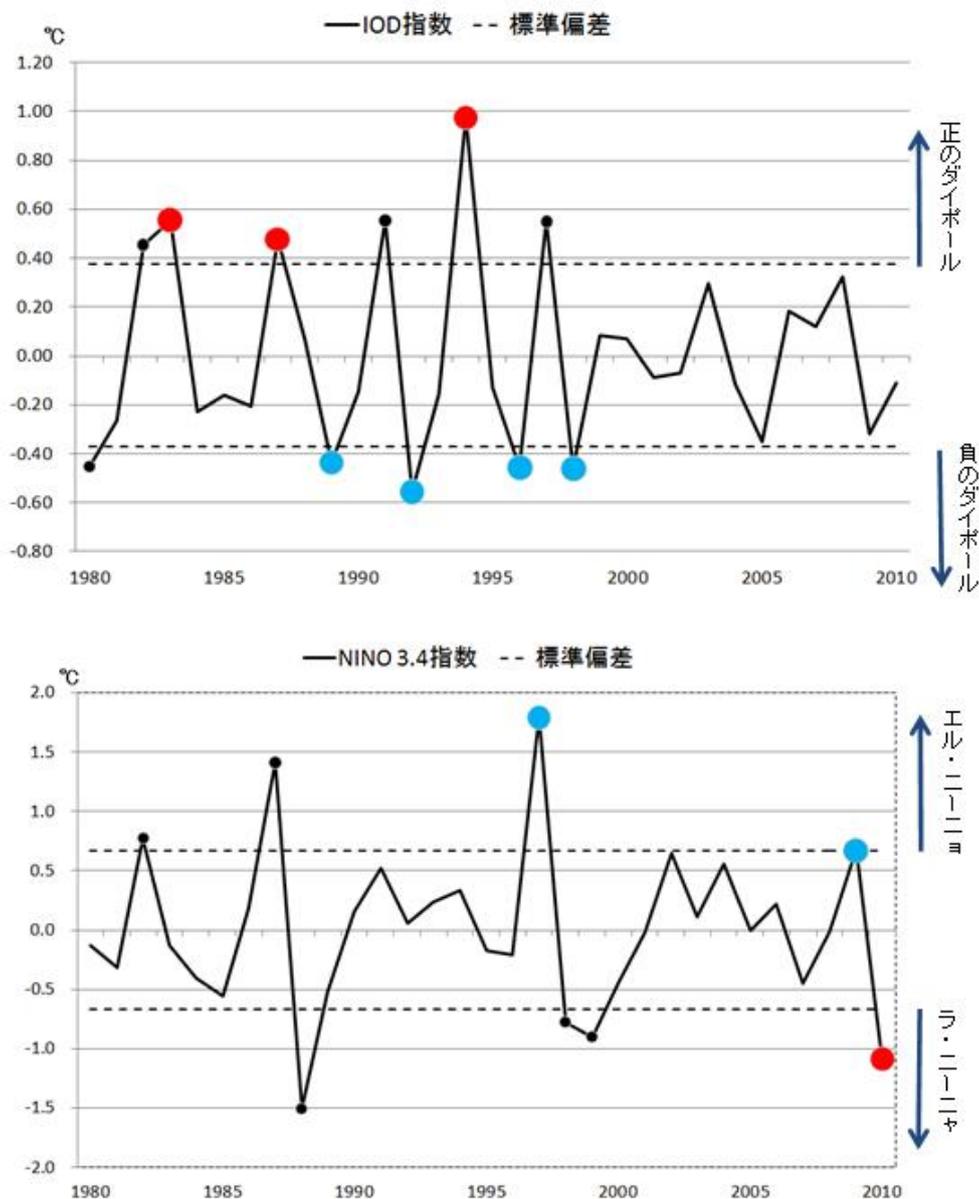
アジア-オセアニア域の気候予測情報を社会応用するために、農業、水管理、健康分野の専門家と連携し、気候サービスとして実現可能性が高いものが何かを調べた。

水管理問題では、Delhi大学のDr. Netrananda Sahuと連携している。同研究者は、気候モデルによる季節予測情報からインドネシアのCitarum川の流量を予測する技術開発を進めている。その技術をSINTEX-F1季節予測システムと連携させ、Citarum川の流量に対する過去再予測実験の準備を進めた。しかし、河川流量の予測より、後述する農作物予測の方が気候サービスの可能性が高いことがわかった。

感染症分野では、ベトナムのデング熱に対する気候ベースの流行予測の可能性を探った。デング熱を媒介する蚊は気候変動の影響を受ける可能性が高いと考えたからである。現地の病院から得られた過去15年のデング熱患者数のデータ(データ公開不可)と現地の気温、降水量、土壌水分との関係を調べたが、有意な相関を得ることはできなかった。これは、気候予測情報からデング熱流行を予測することは極めて難しいことを示唆している。

健康分野では、関東地方における熱中症の死亡者数と気候変動現象の関係について調べた。その結果、死亡者数の変動と日最高気温が 35°C を越える猛暑日数の変動が強く関係しているとともに、猛暑日数の変動には熱帯域のエルニーニョ現象やインド洋ダイポールモード現象が関わっていることが明らかになった(図(1)-56)。本成果は、熱中症の発生に熱帯域の気候変動現象が間接的に関わっていることを示唆するものであり、SINTEX-F1季節予測システムによって、これらの気候変動現象を精度良く予測することで、熱中症による被害が予防できる。

一連の成果は(Takaya et al. 2015)で発表した。



図(1)-56 1980年から2010年までの7-8月のインド洋ダイポールモード指数（上段）とエルニーニョ指数Nino3.4（下段）の時系列。赤丸と青丸はそれぞれ、関東地方における熱中症による死亡者が平年に比べて増加、減少した年に対応する。

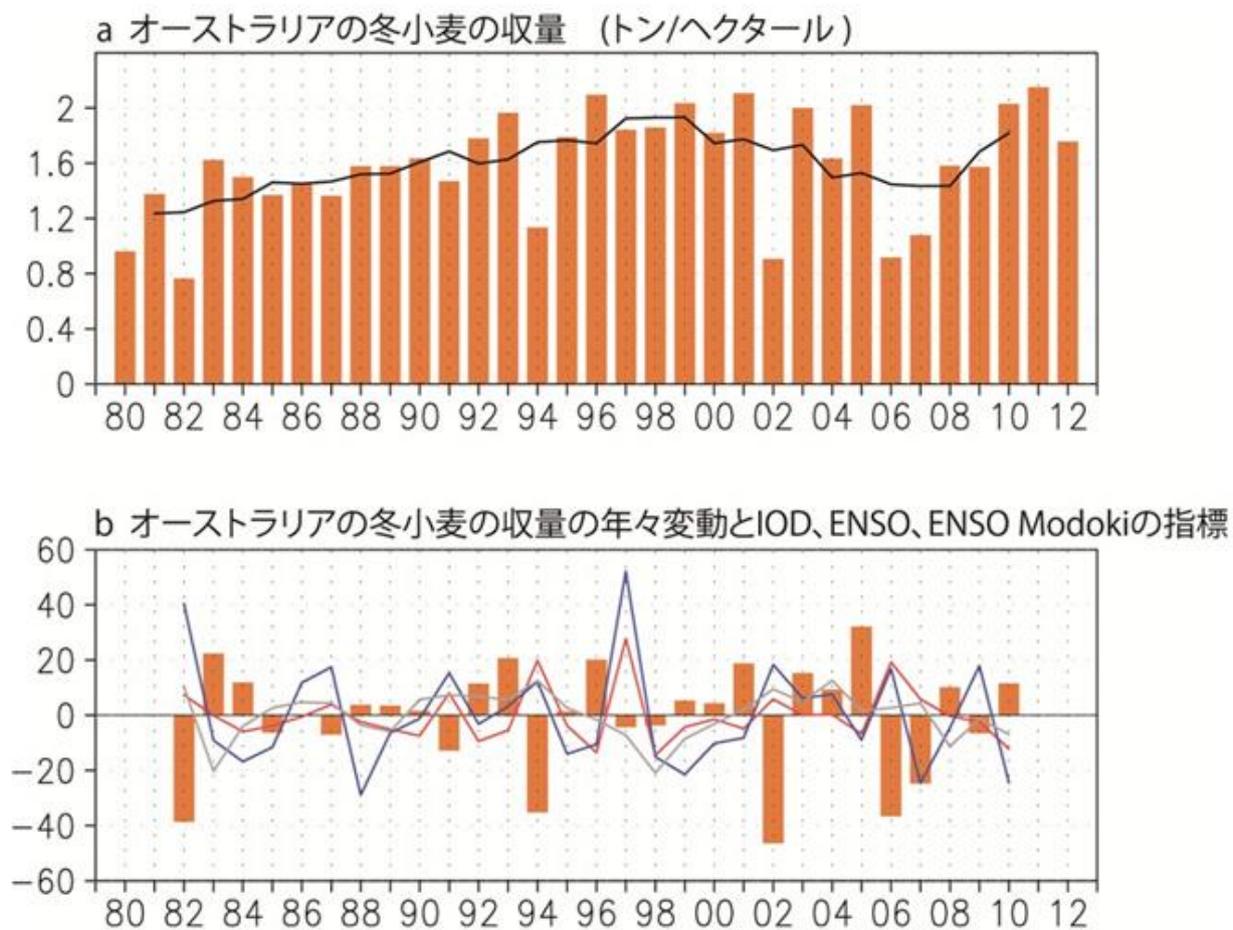
1) オーストラリアの小麦の豊凶予測

農業分野は、アジア-オセアニア域の気候サービスとして実現可能性が最も高い。特にオーストラリアの小麦の豊凶予測の可能性が非常に高いことを発見した。

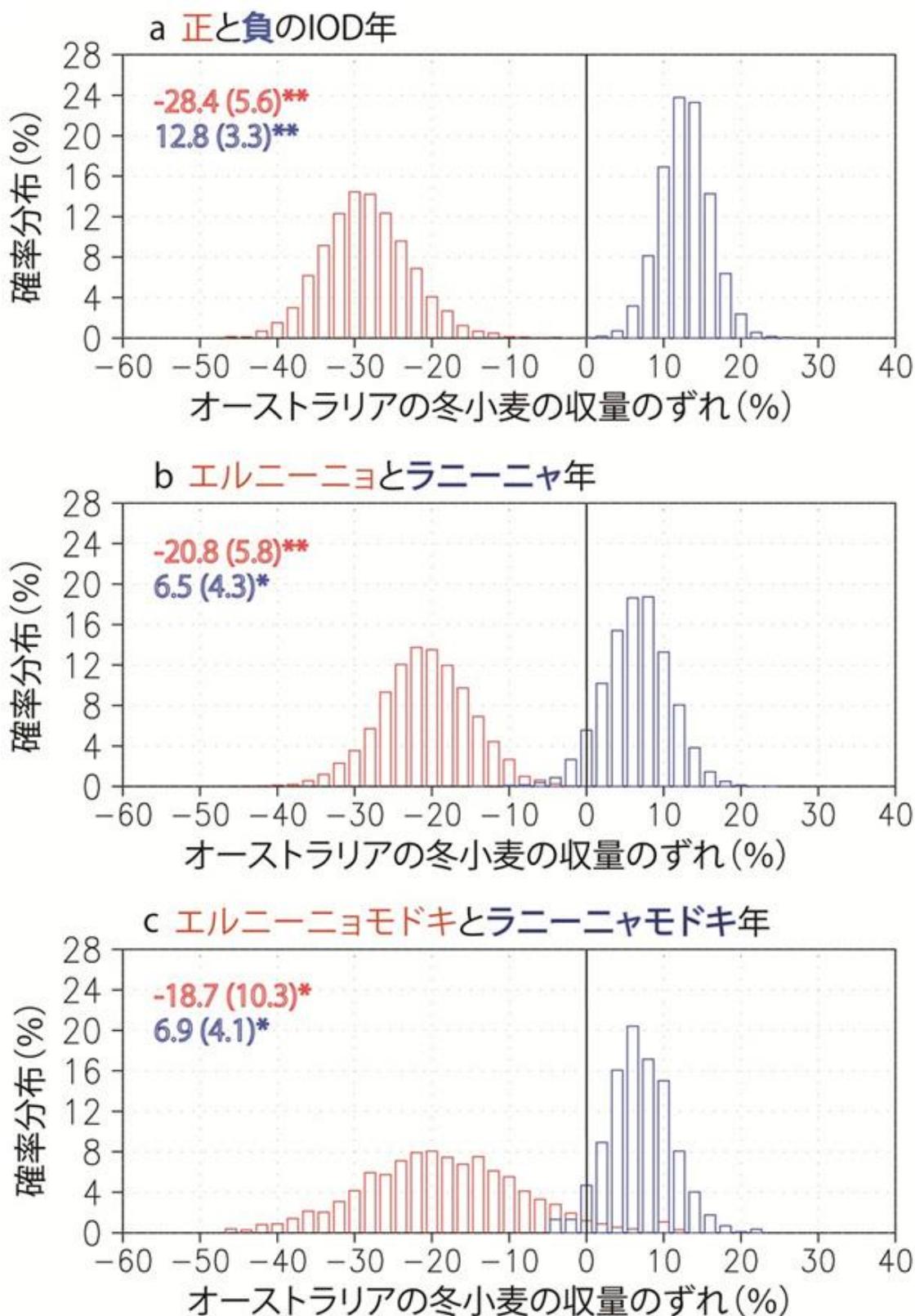
図(1)-57aは1980年から2012年まで33年間のオーストラリアの冬小麦の収量を示す。農業技術の発展に伴って、収量は徐々に増加しているが、一方で年ごとに大きな変動もする。経年的な気候変動による収量変動を取り出すために、以下では5年の移動平均からのずれを収量の年々変動と定義した。5年程度では農業技術は大幅には変化しないと仮定すれば、5年移動平均からのずれはほとんど気候変動によるものと考えてよいであろう。こうして得た収量の年々変動とインド洋ダイ

ポールモード現象 (IOD)、エルニーニョ南方振動現象 (ENSO)、エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象 (ENSO Modoki) の指標 {本研究でIOD指標は熱帯インド洋における西側の極(東経50-70度、南緯10度-北緯10度)と東側の極(東経90-110度、南緯10度-赤道)の9-11月季節平均の海面水温の平年値からのずれの差で定義する。なお、このIODは、研究代表者らが発見し、1999年にNature誌に発表した現象である(Saji et al. 1999)。ENSO指標は熱帯太平洋におけるNiño3海域(西経90-150度、南緯5度-北緯5度)の12-2月季節平均の海面水温の平年値からのずれで定義している。ENSO Modoki指標は熱帯太平洋に三つの極A(東経165度-西経140度、南緯10度-北緯10度)、B(西経110-70度、南緯15度-北緯5度)、C(東経125-145度、南緯10度-北緯20度)の6-8月季節平均の海面水温の平年値からのずれを式「 $A-0.5B-0.5C$ 」に代入して計算する。}との線形相関係数はそれぞれ-0.64、-0.49、-0.39となる(図(1)-57)。

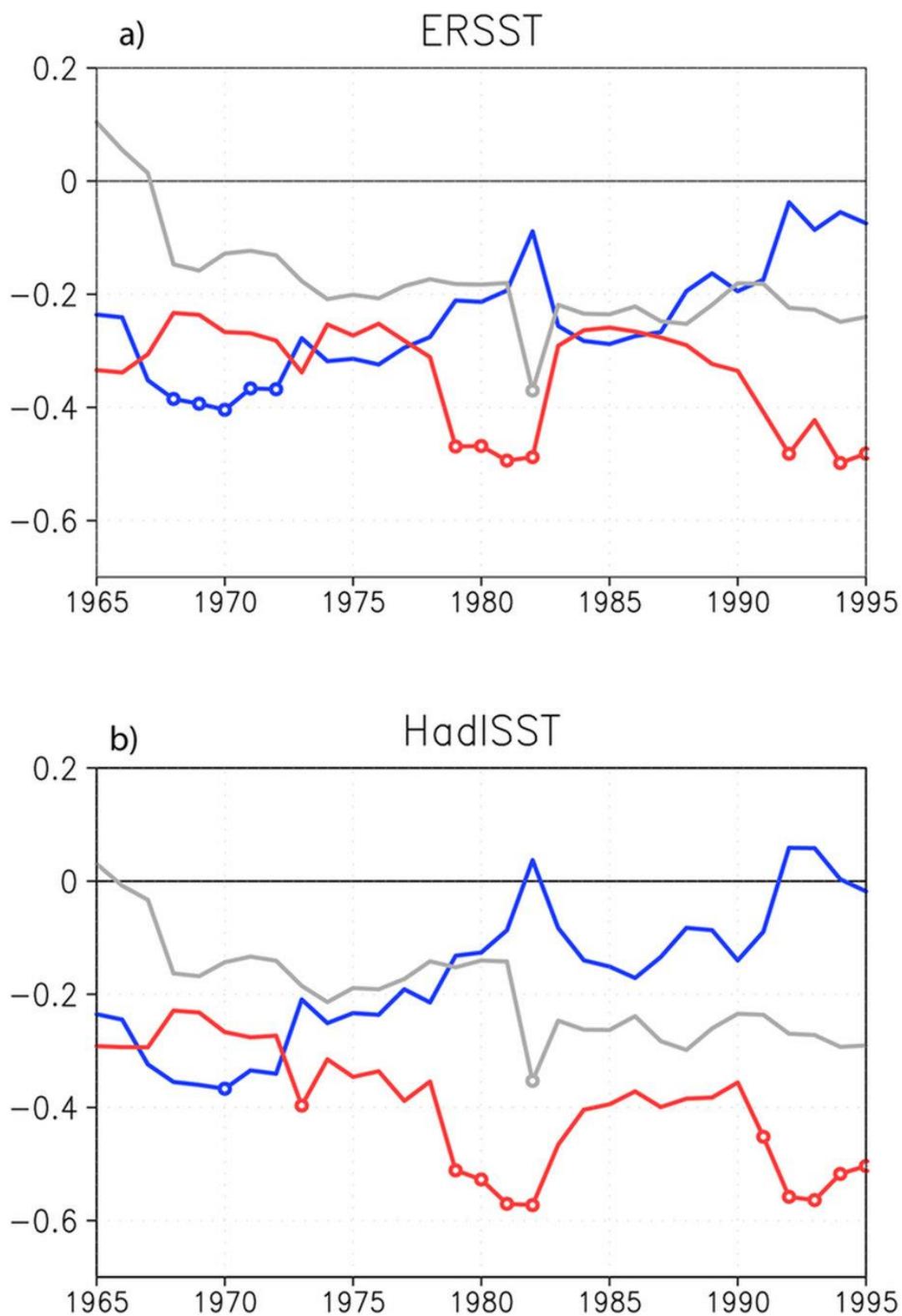
正のIODが発生する年に、冬小麦の収量は平均して28.4%減少し、逆に負のIODが発生する年に平均して12.8%増加する。エルニーニョの場合は20.8%が減少するが、ラニーニャの場合は6.5%増加する。エルニーニョモドキの場合は18.7%減少するが、ラニーニャモドキの場合は6.9%増加する(図(1)-58)。これはIOD、ENSO、ENSO Modokiの全てがオーストラリアの冬小麦収量に影響することを示唆するが(図(1)-59)、太平洋の気候変動とインド洋の気候変動現象は同じ年に発生することがあるので、それぞれが冬小麦の収量に及ぼす影響は独立ではないと考えられる。例えば、過去の30年間、正のIODは7回発生し、そのうち6回がエルニーニョと同じ年、4回がエルニーニョモドキと同じ年に発生した(表(1)-3)。IOD指標からENSO指標との共同変動部分を除くと、収量の年々変動との線形相関係数は-0.41になる(有意性99%)。一方、ENSO指標からIOD指標との共同変動部分を除くと収量の年々変動との線形相関係数は-0.08まで下がるので、ENSO指標は収量変動とほとんど線形相関関係を持たないといえる。これはこれまで一般に想定されてきたことを完全に覆す結果である。IODの指標からENSO Modokiの指標との共同変動を除いた場合、収量の年々変動との線形相関係数は-0.56になる(有意性は99%)。ENSO Modokiの指標からIOD指標との共同変動部分を除くと収量の年々変動との線形相関係数は-0.18に下がる。ENSO Modokiの指標との線形相関関係は極めて弱くなることがわかった。



図(1)-57 (a)過去33年のオーストラリアの冬小麦の収量(オレンジ色の棒グラフ)とその5年移動平均(黒線)。(b)オーストラリアの冬小麦の収量の年々変動のパーセンテージ(オレンジ色の棒グラフ)とIOD(赤線)、ENSO(青線)、ENSO Modoki(灰色線)の指標。比較を見やすくするために、図ではIOD(赤線)、ENSO(青線)、ENSO Modoki(灰線)の指標値は15倍にしている。



図(1)-58 (a)IOD、(b)ENSO、(c)ENSO Modoki 現象が発生した年のオーストラリアの冬小麦の収量変動の確率分布。赤いバー：正のIOD、エルニーニョ、エルニーニョモドキ年の収量の年々変動。青いバー：負のIOD、ラニーニャ、ラニーニャモドキ年の収量の年々変動。

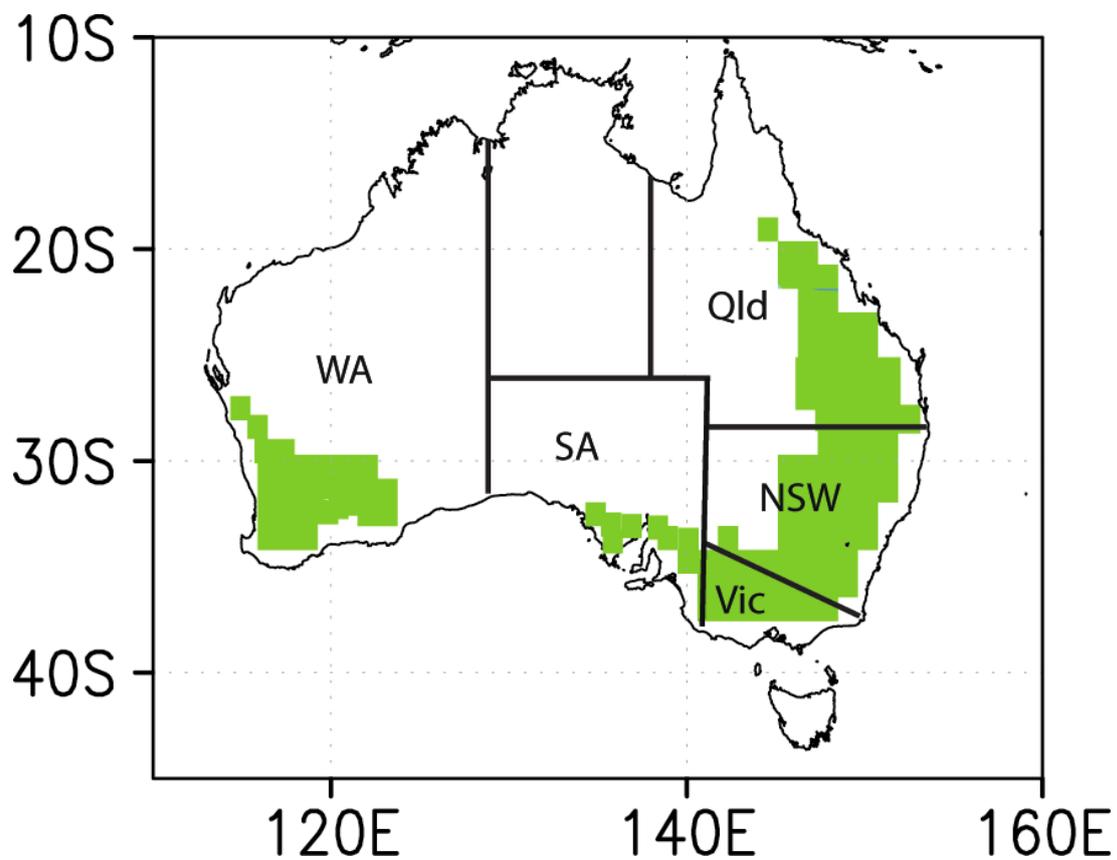


図(1)-59 31年間でスライドさせて計算したオーストラリア冬小麦と9-11月平均のDMI(赤), 11-1月平均のNino3(青), 6-8月平均のEMI(灰)との多重回帰係数。(a)はERSST観測データ、(b)はHadISST観測データを使用。.95%で有意な値は丸マーク。X軸は31年の中央年。

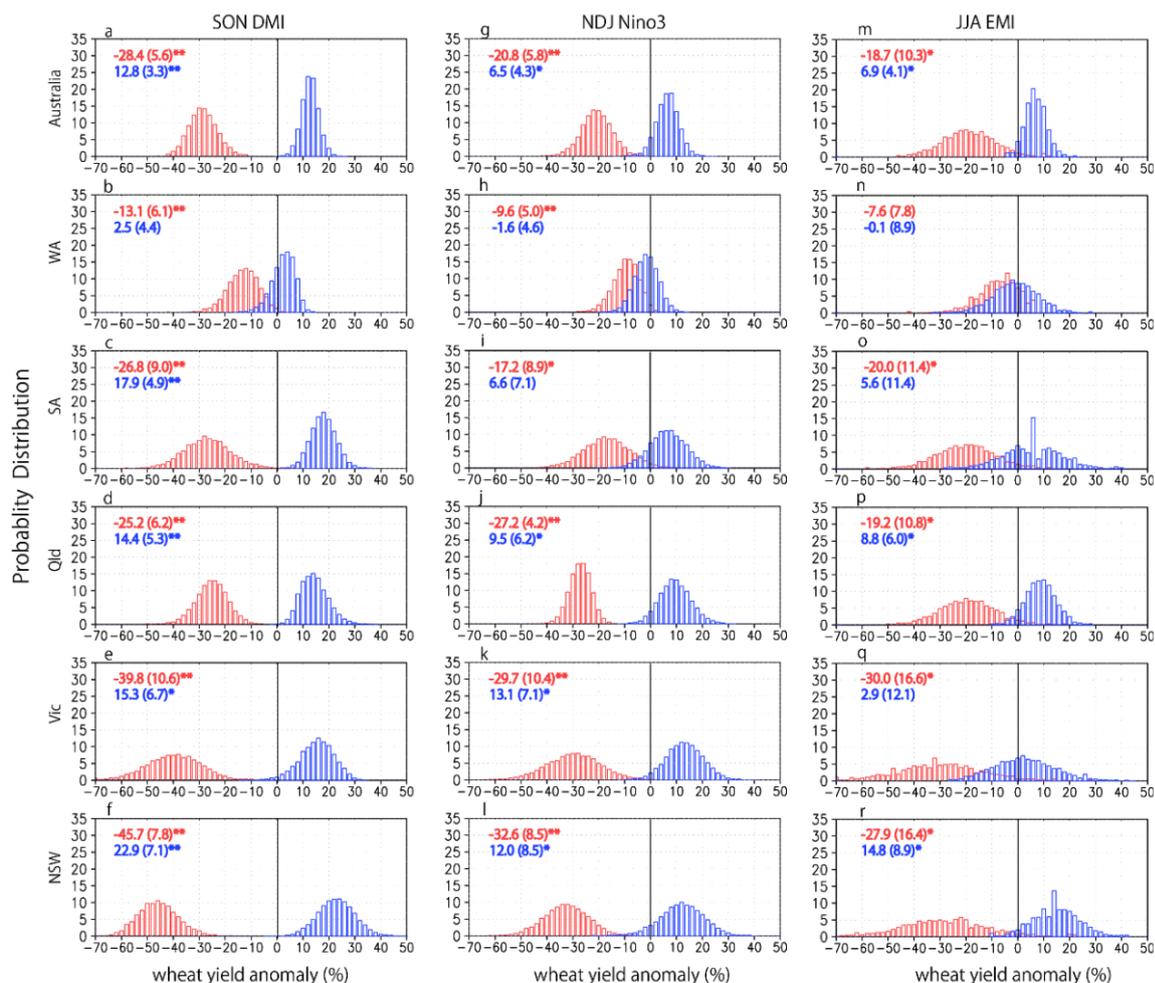
表(1)-3：インド洋ダイポールモード現象（IOD）とエルニーニョ南方振動現象(ENSO)、エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象（ENSO Modoki）の正負のイベントの発生年。下線は、同符号のIODとの同時発生年。

	Positive	Negative
IOD	1982, 1991, 1994, 1997, 2002, 2006, 2007	1984, 1989, 1990, 1992, 1993, 1996, 1998, 2001, 2005, 2010
ENSO	<u>1982</u> , 1986, 1987, <u>1991</u> , <u>1994</u> , <u>1997</u> , <u>2002</u> , <u>2006</u> , 2009	1983, <u>1984</u> , 1985, 1988, 1995, <u>1996</u> , 1998, 1999, 2000, <u>2005</u> , 2007, <u>2010</u>
ENSO Modoki	<u>1982</u> , <u>1991</u> , 1992, <u>1994</u> , <u>2002</u> , 2004	1983, 1997, 1998, 1999, 2008, <u>2010</u>

またオーストラリアの各地域New South Wales(NSW), Victoria(Vic), Queensland(Qld), South Australia (SA), Western Australia(WA), Tasmania(TA)の小麦に対して、同様の解析を実施した(図(1)-60)。多少の地域性はあるものの、オーストラリア全体の小麦収量変動の解析とよく似ていることが確認できた(図(1)-61)。



図(1)-60 オーストラリアの各地域New South Wales(NSW), Victoria(Vic), Queensland(Qld), South Australia (SA), Western Australia(WA), Tasmania(TA)の小麦栽培地域(緑)。



図(1)-61 図(1)-58と同様だが、オーストラリアの各地域New South Wales (NSW), Victoria (Vic), Queensland (Qld), South Australia (SA), Western Australia (WA), Tasmania (TA) の小麦に対して、同様の解析。9-11月平均のDMI (左柱), 11-1月平均のNino3 (中央柱), 6-8月平均のEMI (右柱)。

これらの統計解析をベースに、エルニーニョ指標Nino3、エルニーニョモドキ指標Modoki、インド洋ダイポールモード指標IODからオーストラリア全体の小麦の収穫量 y' を重回帰で計算する式を導出した(決定係数 $R^2=44$)。

$$y' = -0.55 \times IOD - 0.01 \times Nino3 - 0.22 \times Modoki$$

またオーストラリアの各地域New South Wales (NSW), Victoria (Vic), Queensland (Qld), South Australia (SA), Western Australia (WA), Tasmania (TA) の小麦に対して、上記の式のそれぞれの係数や決定係数 R^2 は以下の様になる(表(1)-4)。

表(1)-4 オーストラリアの各地域New South Wales(NSW), Victoria(Vic), Queensland(Qld), South Australia (SA), Western Australia(WA), Tasmania(TA)の小麦に対して、上記の式のそれぞれの係数や決定係数 R^2 。

	Aus	NSW	Vic	Qld	SA	WA	Tas
SON IOD	-0.55**	-0.61**	-0.33	-0.39	-0.51**	-0.34	-0.63**
DJF ENSO	-0.01	0.04	-0.23	-0.18	0.14	0.15	0.40
JJA Modoki	-0.23	-0.21	-0.13	-0.22	-0.26	-0.06	-0.23
R^2	44.3%	46.0%	33.7%	40.1%	29.1%	7.5%	27.7%

三つの気候変動現象の指標を用いて多重線形回帰分析を行った結果では収量の年々変動の約44%を説明できるが、IODの指標だけを使用しても収量の年々変動の約39%を説明できる。従って、IOD指標はENSOとModoki指標に比べて、オーストラリアの冬小麦収量に圧倒的に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。

大気海洋結合大循環モデルSINTEX-Fを用いた「SINTEX-F季節予測システム」は国際比較によりIOD指標を予測する最高のシステムの一つであることが認められている。この季節予測システムが過去30年において毎年4月1日に予測したIOD指標を用いて、オーストラリアの冬小麦の収量の年々変動をどの程度事前に予測されていたかを調べたところ、約15%を予測できていたことがわかった。SINTEX-F季節予測システムは負のダイポールモード現象の予測精度が正のダイポールモード現象よりも低いことから、冬小麦の収量の予測精度を更に上げるには、特に負のダイポールモード現象の予測精度向上に努める必要があることもわかった。

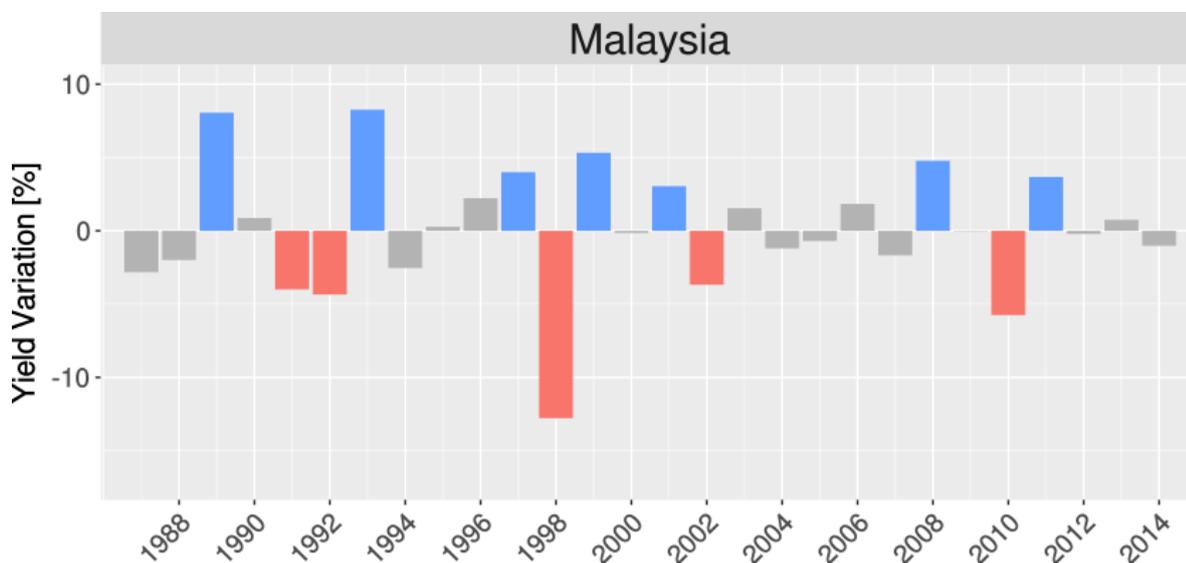
本研究はオーストラリアの冬小麦収量と熱帯の気候変動現象との関係を明らかにしたものだが、より一般的に気候変動現象の予測可能性の視点から食糧安全保障戦略に新たな光を当てたものと言える。国際連合による持続可能な開発のための2030アジェンダが2016年から新たに実施されるが、その基盤技術として地球観測データに基づく季節変動予測とその予測情報の農業をはじめとする産業応用が極めて重要になっているといえる。

また、オーストラリアの気候は熱帯海洋に発生する気候変動現象だけではなく、中高緯度の気候変動や南極振動などにも影響される。今後は、こうした中高緯度の気候変動からの影響も検討する必要がある。

一連の成果は季節予測モデルが食糧安全保障において重要な役割を担えることを実証したことになる。(Yuan and Yamagata 2015)としてNature社のScientific Reportsで発表した。

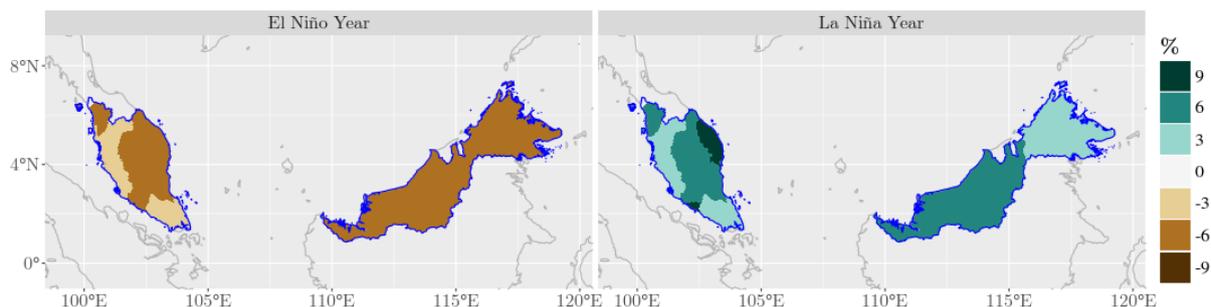
2) マレーシアのパーム油生産予測

パーム油の生産量はオイルパーム生産(Fresh fruit bunch (FFB) yields)の経年変動に伴い大きく変動する(図(1)-62)。



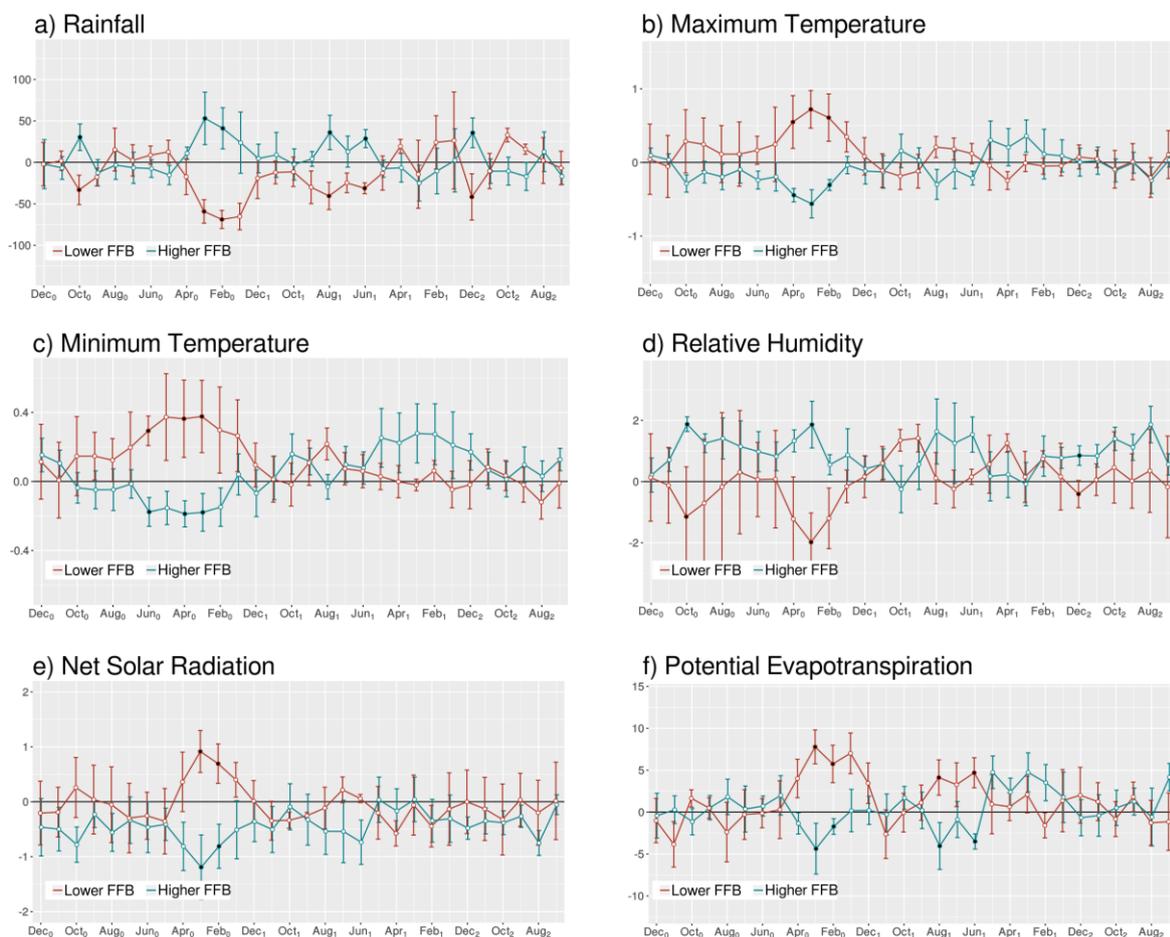
図(1)-62 マレーシアのオイルパーム生産(Fresh fruit bunch (FFB) yields)の経年変動(%)

この生産量はエルニーニョ現象の発生と強い相関があることがわかった。コンポジット解析の結果、エルニーニョ現象が発生するとマレーシアのパーム油の生産量は約6%減少する(図(1)-63)。一方でエルニーニョ現象とは逆のラニーニャ現象が発生すると、生産量が約7%増加する。これはエルニーニョ(ラニーニャ)現象の発生に伴い、マレーシアの降水量が平年より少なく(多く)なるからだと考えられる。また2010/11年のケースでは、極めて強いニンガルー・ニーニョ現象の影響も示唆された。

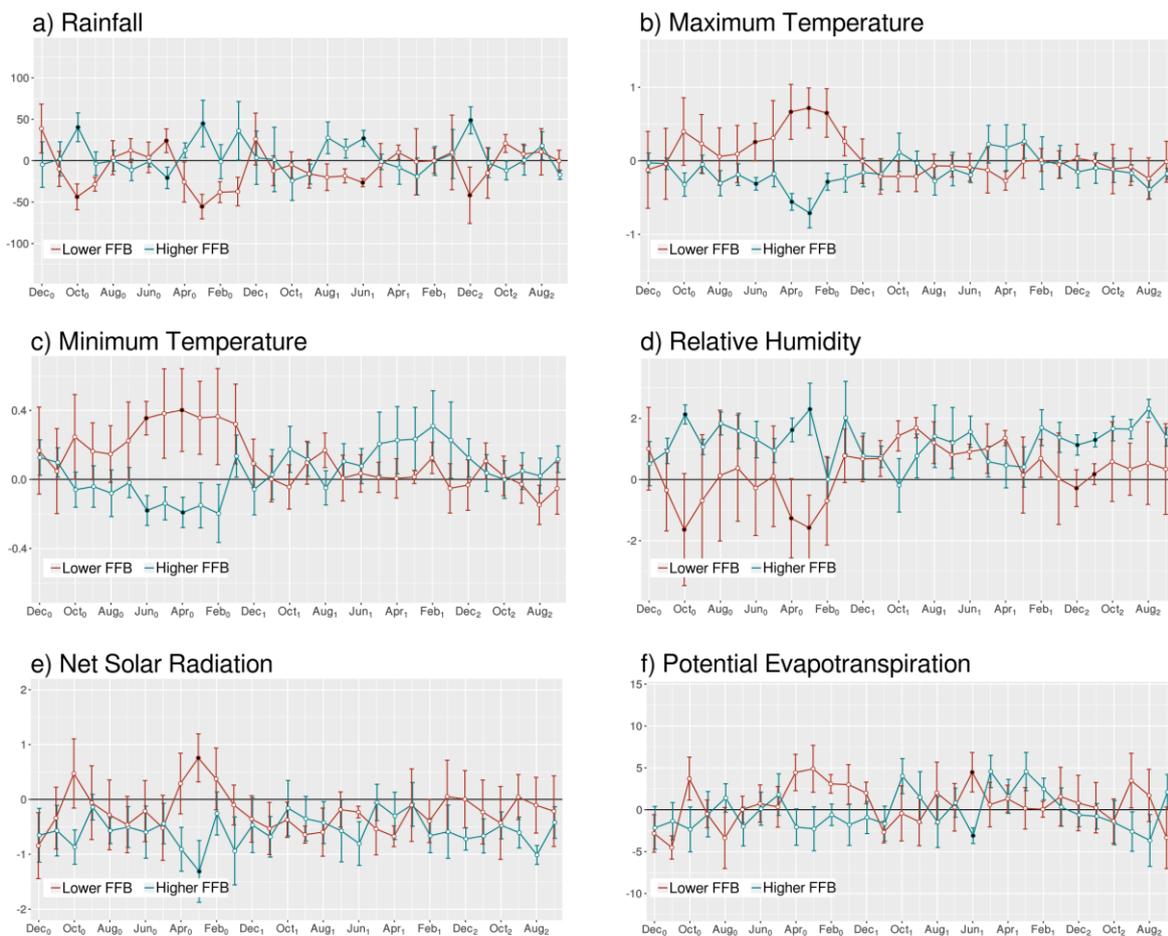


図(1)-63 オイルパーム生産量(Fresh fruit bunch (FFB) yields)の経年変動(%)をエルニーニョ現象発生年(左)とラニーニャ現象発生年(右)でコンポジット解析した結果。

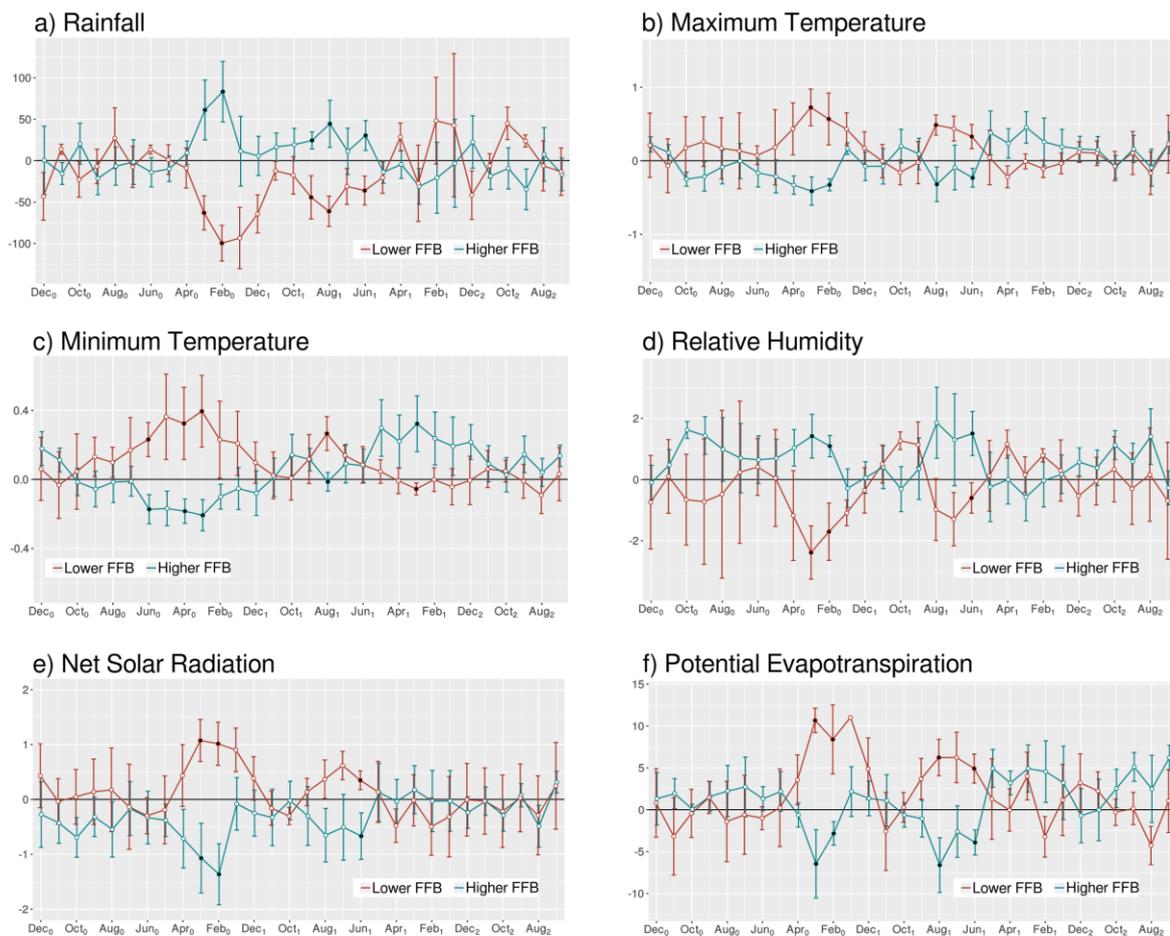
また、オイルパーム生産量と局地的な天候との関係をコンポジット解析で調べた(図(1)-64, 65, 66)。雨が少なく、日最低気温、日最高気温が高く、蒸発散が多く、相対湿度が低く、日射が多いと生産量が下がることがわかった。



図(1)-64 マレーシアにおけるオイルパーム生産量(Fresh fruit bunch (FFB) yields)の不作(赤)、豊作(青)年で合成したa)降水量、b)地上2mの日最高気温、c)日最低気温、d)相対湿度、e)日射、f)ポテンシャル蒸発散の推移。



図(1)-65 図(1)-64と同様だが、マレーシア半島について。

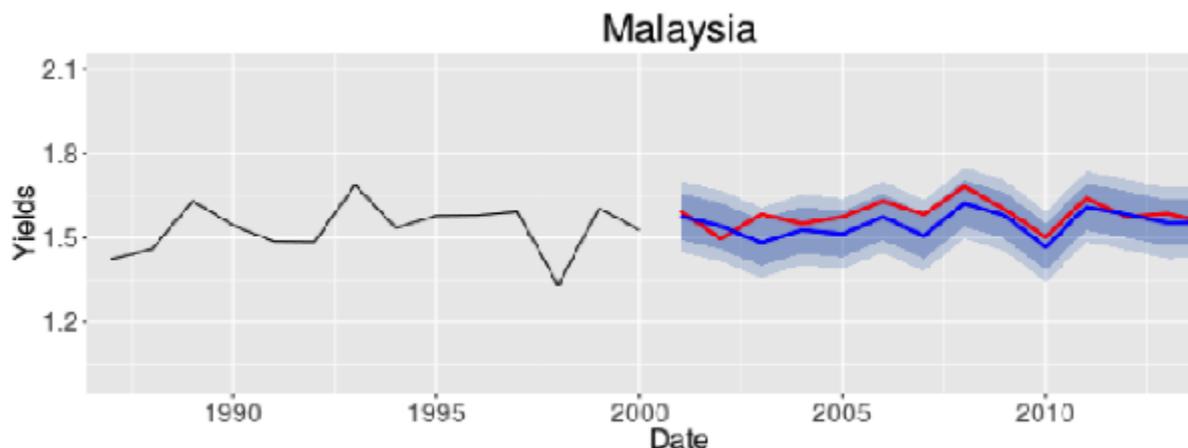


図(1)-66 図(1)-64と同様だが、東マレーシアについて。

上記の解析をもとに、ある年のパーム油の生産量変動 y' を、その前年の12月からその年の2月で平均したエルニーニョ指標Nino3(Nino3_{DJF})を使って予測する統計モデル

$$y' = 1.54 - 0.047 \times \text{Nino3}_{\text{DJF}}$$

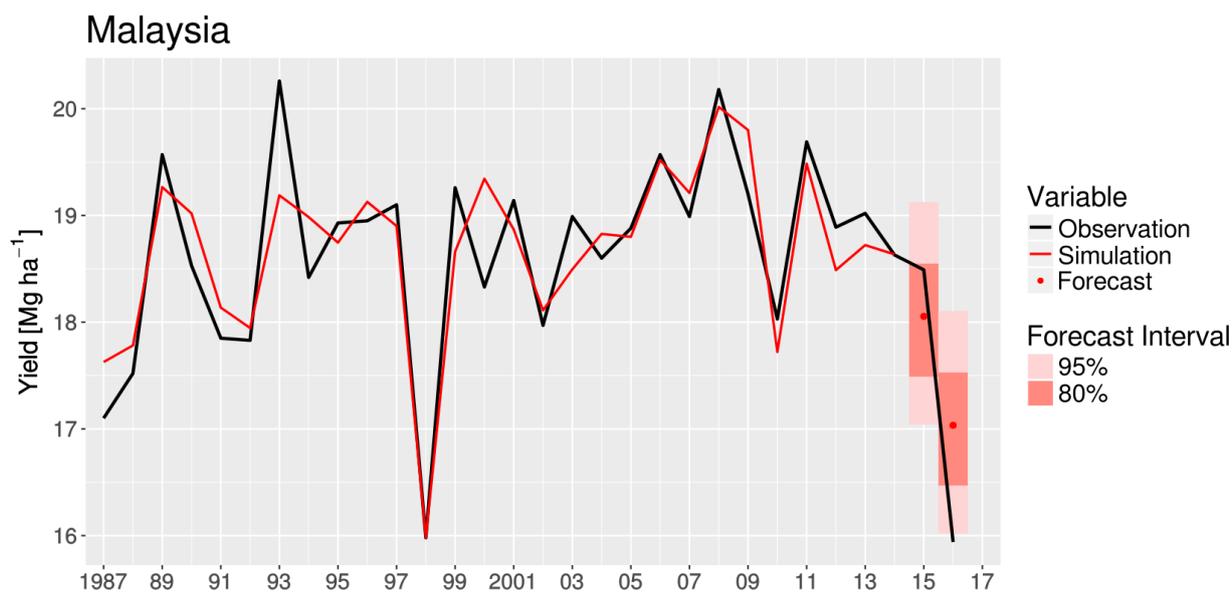
を開発した。回帰係数は1987-2000年のデータから算出した。上記のモデルで、2000年以降のパーム油生産量変動をエルニーニョ指標で非常によく予測できた(図(1)-67)。



図(1)-67 パーム油の生産量(Mg/ha)の時系列。観測データは、回帰係数を算出した期間(1987-2000年)を黒線、2000年以降の予測期間を赤線で示す。青線は上記の式で予測した値。影は99.95%の信頼区間。

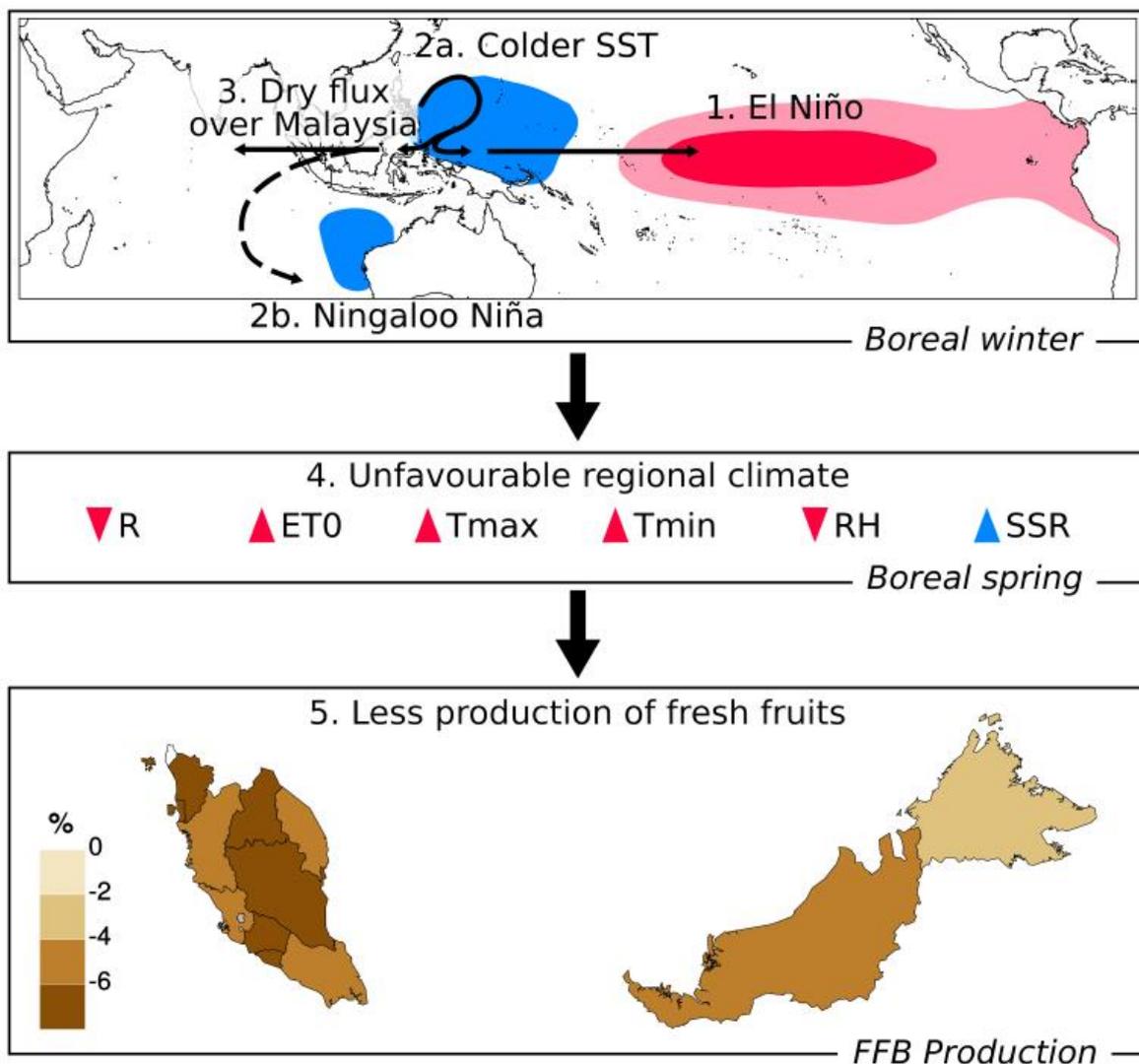
一連の研究からマレーシアのパーム油の生産量予測にはエルニーニョ現象の発生予測の成功が鍵であることがわかった。SINTEX-F季節予測システムではエルニーニョ現象の発生を最大で24ヶ月先から予測する性能があり、パーム油生産量の2年予測にも期待できる。

更に、ある年のパーム油の生産量変動を、その前年の12月からその年の2月で平均したエルニーニョ指標Nino3(Nino3_{DJF})、マレーシアの降水量変動、更にニンガルー・ニーニョ指標NNIを使って予測する統計モデルを開発した。このモデルで、パーム油生産量の経年変動をよく捉えることができる(図(1)-68)。この予測モデルを使って、2015年、2016年のパーム油生産が激減することを正しく予測できた。



図(1)-68 パーム油の生産量(Mg/ha)の時系列。観測データは黒線、統計モデルの結果を赤線で示す。2015/16年の赤色の点は統計モデルで予測した値で、色影は95%, 80%の信頼度区間。

マレーシアのパーム油生産を、気候変動現象の予測をベースに、数ヶ月前から予測可能であることを明らかにした(図(1)-69)。これらを社会応用する素地は整ってきたが、社会実装するためには、行政との更に密な連携が不可欠である。



図(1)-69 マレーシアのオイルパーム生産と気候変動現象との関わりを模式的に図示。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象には数十年スケール (interdecadal) で変動する成分があることを発見した。その位相逆転は1970年代後半から1990年代後半までの地球温暖化の見かけ上の強化や1990年代後半から最近までの地球温暖化の見かけ上の停滞と深く関連している。更に、1990年代後半からの熱帯太平洋南東部(エルニーニョモドキ現象の東の極)の大気海洋相互作用の不活性にも関連している。また、東南アジアの降水量を予測するためには、古典的なエルニーニョ現象の発生を予測することに加えて、エルニーニョモドキ現象の発生も予測する必要性があることを明らかにした。

ニンガルー・ニーニョ現象が最近になって頻発している理由を明らかにした。近年の地球温暖化傾向と太平洋数十年規模変動の負位相によって、オーストラリア西岸の海水の平均水温や海洋表層の蓄熱量が1990年代後半から急激に上昇している。それに伴い、オーストラリア西岸は緯度的に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・ニーニョの振幅を増幅させやすくなった。太平洋数十年規模変動の負位相が継続すれば、今後も極端に強いニンガルー・ニーニョが、極端な降水量増加を伴って頻繁に発生する可能性が高い。一方、皮肉なことに、西オーストラリアの降水量はこのニンガルー・ニーニョからの直接的な影響が支配的になったので、1990年以降の極端な西オーストラリアの多雨傾向を数理的に予測し易くなった。

北太平洋西部亜熱帯域に発生する沿岸ニーニョ/ニーニャ現象であるカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャの予測可能性を調べたところ、エルニーニョ/ラニーニャ現象が同時発生し、それらがカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャ現象の発達に寄与しているイベントは予測可能であることを見出した。

西アフリカのダカール沖合の新たな沿岸ニーニョ現象を見出すことに成功した。ダカール・ニーニョと名付けられたその現象は、北西オーストラリア沿岸のニンガルー・ニーニョ/ニーニャやカリフォルニア沿岸のカリフォルニア・ニーニョ/ニーニャなどと同様に局所的な大気海洋相互作用を伴って発達するため、近隣諸国の季節予測に影響を与えうることを世界で初めて指摘した。

3月から6月の間、インドでは2種類の熱波が発生する。第1のタイプの熱波は北部および中部インドで発生し、北大西洋上空のブロッキングと関連していることがわかった。一方で、インド東部の沿岸域上空での第2のタイプの熱波は、太平洋の低温偏差に対する、大気の松野-ギル型応答に起因することが分かった。松野-ギル型応答は大陸上で北西風の偏差を生じ、海陸風を弱めることで熱波をもたらす。

SINTEX-F1季節予測システムでは、エルニーニョモドキ/ラニーニャモドキ現象、ニンガルー・ニーニョ/ニーニャ現象の発生を約半年前から高い精度で予測可能であることを明らかにした。従来のシステムを高度化(海氷モデルの導入、高解像度化、物理スキームの改善等)したSINTEX-F2季節予測システムを開発し、季節予測精度を向上させることに成功した。特に、亜熱帯域で発生する大気海洋相互作用現象の予測精度が向上したことで、実社会に貢献する季節予測技術開発において新たな扉を開いた。

季節予測の精度を更に向上させるために、従来のSSTナッジング法に、海洋観測に基づいた3次元の水温/塩分データを同化する修正法(3DVAR補正)を加えた新たな初期値作成システムを開発し、初期化の精度を向上させた。その恩恵を受けインド洋や太平洋で季節予測精度が向上した。

アジア-オセアニア域を対象として、SINTEX-F2季節予測システムで得られた気候予測情報を数10km-数km間隔で、力学的にダウンスケーリングする技術を開発し、過去再予測実験を実施した。システムティックなバイアス補正をして力学的ダウンスケーリングすることで降水量の予測精度を向上させることに成功した。

農業、水管理、健康分野の専門家と連携し、アジア-オセアニア域の気候サービスとして実現可能性が高いものが何かを調べた。結果、オーストラリアの小麦の豊凶予測とマレーシアのパーム油生産量予測が実現可能性が高いことがわかった。

過去約30年間の熱帯インド洋と熱帯太平洋に起きる著しい気候変動現象とオーストラリアの冬小麦の収量変動関係を調べた。その結果、インド洋のダイポールモード現象がエルニーニョ現象や新たに発見されたエルニーニョモドキ現象よりも、オーストラリアの冬小麦の収量に圧倒的に大きな影響を及ぼすことを初めて明らかにした。更にSINTEX-F季節予測システムにより、インド洋ダイポールモード現象の指標をはじめとする気候変動指標を種まき前に予測できることから、穀物収量を事前にある程度予測可能であることも示した。今後は特に負のダイポールモード現象の予測精度向上に注力する必要があることが明らかになった。一連の成果は季節予測モデルが食糧安全保障において重要な役割を担えることを実証したことになる。

マレーシアのパーム油生産量は、全世界生産の39%および世界の輸出量の44%を占めるため、その生産量を予測することがマレーシアだけでなく全世界にとって重要である。ある年のマレーシアのパーム油の生産量変動を、その前年の12月からその年の2月で平均したエルニーニョ指標を使って予測する統計モデルを開発した。更に、ある年のマレーシアのパーム油の生産量変動を、地域の降水量、エルニーニョ指標、ニンガルー・ニーニョ指標を使って予測できることを明らかにした。

また、関東地方における熱中症の防止に熱帯域の気候変動現象予測が間接的に利用できる可能性を示唆した。

一連の成果はいずれも科学的に最先端の知見であり、Nature社のオープンアクセス誌、アメリカ地球科学連合の国際学術誌、アメリカ気象学会の国際学術誌など、国際的に評価の高い学術誌で発表した(計12本)。また、国内外の学会やシンポジウムで積極的に発表した(50件以上)。さらに、本課題に対する「国民との科学・技術対話」に資するため、一般公開シンポジウムやWebを通じた成果・情報発信、プレスリリース、一般向け講義なども積極的に行った。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

ICSU(国際科学会議)のROAP(アジア太平洋地域事務所)と連携し、Future Earth計画の一環として推進中のSustainability Initiative in the Marginal Seas of South and East Asia (SIMSEA)計画において、本課題の成果の一つである気候予測とその社会応用を紹介した。SIMSEAはFuture Earthのアジア太平洋地域公式プロジェクトとして認定されている。その結果、フィリピン大学、海洋科学研究所(ケソン市)に設置したSIMSEAプロジェクトオフィスのサイトから本課題の成果物

である季節予測情報を世界に配信中である。アジア太平洋地域環境政策へ大きく貢献した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

内閣府宇宙戦略室 宇宙システム海外展開戦略の策定調査 ブラジル検討会においても本研究が進める季節予測が世界各地の防災対策などに有効なことを示した。その他、政策関係者が参加した会議で、プロジェクト成果の発表を多数実施し、今後の発展が期待される。特に、オーストラリア小麦の収量予測は食料安全保障に貢献できることが期待される。例えば、本プロジェクトで開発された予測システムでは2017年の不作が懸念される。更に、マレーシアのパーム油の生産予測が気候サービスとして展開可能であることを世界で初めて示した。国際的に権威ある学会やシンポジウムなどの基調講演、招待講演などで、プロジェクト成果の発表を多数実施した。上記の、ICSU(国際科学会議)のROAP(アジア太平洋地域事務所)と連携した、Future Earth計画の一環として推進中のSIMSEA計画にも、更なる貢献が期待できる。

6. 国際共同研究等の状況

ICSU(国際科学会議)のROAP(アジア太平洋地域事務所)と連携し、Future Earth計画の一環として推進中のSustainability Initiative in the Marginal Seas of South and East Asia (SIMSEA)計画に参画した。SIMSEAは、国際科学会議アジア太平洋地域委員会 (ICSU RCAP) が、西太平洋の縁辺海の安定化に貢献することを目的に立ち上げた国際プログラムで、今後、関係各国の研究者やステークホルダーの協働を促し、アジアにおけるFuture Earthの重要な取組みとして発展していくことが期待される。

研究代表者がScience Steering Committeeとして参画し、日本からは主に海洋研究開発機構(JAMSTEC)や東京大学大気海洋研究所(AORI)、海外からはマレーシアの Institute of Oceanography and Environment (INOS), University Malaysia Terengganu (UMT) や、Research Unit for Ethnography and Development, Faculty of Humanities Arts and Heritage, Universiti Malaysia Sabah、フィリピンのThe Marine Science Institute, University of the Philippines-DilimanやニュージーランドのInstitute of Marine Science, University of Aucklandが参画している。

Science Steering Committeeは以下の通りである。

Prof. Emeritus Dr. Lourdes J. Cruz
Member & Immediate Past-President
Department of Science & Technology
National Research Council of the Philippines
General Santos Avenue,
Taguig City 1631, PHILIPPINES

Prof. Dr. Marie Antonette Juinio-Meñez
Professor
The Marine Science Institute
University of the Philippines
Diliman, Quezon City 1101, PHILIPPINES

Prof. Dr. Fadzilah Majid-Cooke
Professor
Faculty of Arts, Humanities and Heritage
University Malaysia Sabah
Jalan UMS
Kota Kinabalu 88400, Sabah, MALAYSIA

Prof. Emeritus Dr. Toshio Yamagata
Director
Application Laboratory
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)
3173-25, Showa-machi, Kanazawa-ku
Yokohama, Kanagawa 236-0001, JAPAN

Prof. Emeritus Dr. Mohr. Nordic Hasan
Director
ICSU Regional Office for Asia & the Pacific
902-4, JalanTun Ismail 50480,
Kuala Lumpur, MALAYSIA

Dr. Annadel S. Cabanban
Programme Executive
Sustainability Initiative in the Marginal Seas of
South and East Asia (SIMSEA)
The Marine Science Institute, University of the Philippines
Diliman, Quezon City 1101, PHILIPPINES

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) A. Takaya, Y. Morioka and S. K. Behera: Scientific Reports, 5655, (2015) “Role of climate variability in the heatstroke death rates of Kanto region in Japan”
- 2) C. Tsai, S. K. Behera, and T. Waseda: Scientific Reports, 8107, (2015) “Indo-China Monsoon Indices”
- 3) T. Doi, S. K. Behera, and T. Yamagata: J. Geophys. Res. Oceans, 120, 1388-1396 (2015) “An interdecadal regime shift in rainfall predictability related to the Ningaloo Niño in the late 1990s”
- 4) C. Yuan, and T. Yamagata: Scientific Reports, 17252, (2015) “Impacts of IOD, ENSO and ENSO Modoki on the Australian Winter Wheat Yields in Recent Decades”
- 5) T. Doi, C. Yuan, S. K. Behera, and T. Yamagata: Journal of Climate, 28, 7237-7249 (2015) “Predictability of the California Niño/Niña”
- 6) P. Oettli, Y. Morioka, and T. Yamagata: Scientific Reports, 18782, (2016) “A Regional Climate Mode Discovered in the North Atlantic: Dakar Niño/Niña”
- 7) T. Doi, S. K. Behera, and T. Yamagata: Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 8, 1847-1867 (2016) “Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model”
- 8) J. V. Ratnam, S.K. Behera, S.B. Ratna, M. Rajeevan and T. Yamagata: Scientific Reports, 24395, (2016) “Anatomy of Indian heatwaves”
- 9) J. V. Ratnam, S.K. Behera, H. Annamalai, S.B. Ratna, M. Rajeevan and T. Yamagata: Scientific Reports, 37657, (2016) “ENSO’s far reaching connection to Indian cold waves”
- 10) S. B. Ratna, J.V. Ratnam, S.K. Behera, F.T. Tangang and T. Yamagata: Climate Research, 71, 263-280 (2017) “Validation of the WRF regional climate model over the subregions of Southeast Asia: climatology and inter annual variability”
- 11) J. V. Ratnam, T. Doi and SK Behera: J. Climate, 30, 3219-3235 (2017) “Dynamical downscaling of SINTEX-F2v CGCM seasonal retrospective austral summer forecasts over Australia”
- 12) C. Tanizaki, T. Tozuka, T. Doi, and T. Yamagata: Climate Dynamics (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” (in press)

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 山形俊男: JAMSTEC APLコラム, (2014年7月) 「気候変化の下での気候変動」
(<http://www.jamstec.go.jp/apl/j/column/20140731/>)
- 2) 土井威志: Science Window2014年夏号, (2014年7月) 「エルニーニョと南の海の1°Cの温度変化」
- 3) 安藤健太郎, 土井威志: JAMSTECニュースコラム, (2014年7月) 「2014年エルニーニョ -現実と予測の不確実-」 (http://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20140730/)
- 4) 土井威志: 世界気象カレンダー2015 日宣テクノ・コムズ株式会社, (2014年10月) 「ニンガルーニーニョ現象」
- 5) 山形俊男: JAMSTEC APLコラム, (2015年2月) 「今年の冬はエルニーニョ現象というのに、どうしてこんなに寒いのでしょうか？」 (<http://www.jamstec.go.jp/apl/j/column/20150223/>)
- 6) 土井威志: JAMSTEC APLコラム, (2015年2月) 「ニンガルー・ニーニョ研究の最先端」
(<http://www.jamstec.go.jp/apl/j/column/20150213/>)
- 7) 土井威志: JAMSTECコラム, (2015年7月) 「予測通りにインド洋ダイポールモード現象が発生か? -これからの季節はどうなる?-」
(http://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20150724/)
- 8) 土井威志: JAMSTEC APLコラム, (2015年10月) 「沿岸ニーニョ現象が切り開く季節予測の新展開」
(<http://www.jamstec.go.jp/apl/j/column/20151009/>)
- 9) 土井威志: JAMSTECコラム, (2015年11月) 「スーパーエルニーニョ現象のこれから～2016年後半にはラニーニャ現象が発生か～」 (http://www.jamstec.go.jp/j/jamstec_news/20151104/)
- 10) 土井威志: 世界気象カレンダー2016 日宣テクノ・コムズ株式会社, (2015年10月) 「エルニーニョ予測」
- 11) 土井威志: 世界気象カレンダー2017 日宣テクノ・コムズ株式会社, (2016年10月) 「エルニーニョ予測」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) C. Tsai, S. Behera and T. Waseda: Asia Oceania Geosciences Society 2014, Sapporo, Japan, 2014 “The Role of ENSO, IOD and EMI in South East Asia’s Precipitation”
- 2) T. Doi, S. Behera and T. Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2014, Sapporo, Japan, 2014 “A Drastic Change in Predictability of Precipitation Off the West Coast of Australia After Late 1990s”
- 3) Y. Morioka, K. Takaya, S. Behera and Y. Masumoto: Asia Oceania Geosciences Society 2014, Sapporo, Japan, 2014 “Local SST Impacts on the Summertime Mascarene High variability”
- 4) T. Yamagata: The World Weather Open Science Conference 2014, Montreal, Canada, 2014 “New climate modes and their predictability”
- 5) 土井 威志, Swadhin Behera, 山形 俊男: 日本海洋学会 2014年秋季大会, “ニンガルーニーニョ域での降水量の予測可能性が1990年代後半から劇的に変化している”
- 6) T. Doi, S. Behera and T. Yamagata: American Geophysical Union Fall meeting 2014, San Francisco, U.S., 2014 “A Dramatic Regime Shift in Rainfall Predictability Related to the Ningaloo Niño/Niña in the Late 1990s”

- 7) S. Behera, C. Tsai, Y. Morioka, T. Doi, V. Ratnam and T. Yamagata: American Geophysical Union Fall meeting 2014, San Francisco, U.S., 2014 “The Non-Linear Interplay Among ENSO, ENSO Modoki, IOD and Monsoon”
- 8) C. Tsai, S. Behera, T. Waseda and F. Tangang: American Geophysical Union Fall meeting 2014, San Francisco, U.S., 2014 “The Relative Influences of ENSO Conventional, ENSO Modoki and Indian Ocean Dipole on Mindanao and Northeastern Borneo Precipitation Anomaly”
- 9) C. Yuan and T. Yamagata: American Geophysical Union Fall meeting 2014, San Francisco, U.S., 2014 “A Regional Air-Sea Coupled Mode in the Coastal Ocean Off California and Baja California”
- 10) P. Oettli, Y. Morioka, T. Doi and T. Yamagata: American Geophysical Union Fall meeting 2014, San Francisco, U.S., 2014 “A Coastal Niño/Niña Phenomenon Off the Coast of Senegal (West Africa)”
- 11) V. J. Ratnam, S. Behera, T. Doi, P. Oettli and T. Yamagata: Japan Geoscience Union 2015 Meeting, Makuhari, Japan, 2015 “High resolution WRF downscaling of the SINTEX-F1 CGCM seasonal forecasts over the Kanto region”
- 12) T. Doi, S. K. Behera, and T. Yamagata: Japan Geoscience Union 2015 Meeting, Makuhari, Japan, 2015 “2014年エルニーニョの急激な衰退と予測について” (招待講演)
- 13) T. Yamagata, International Symposium on Tropical Ocean and Climate, Qingdao, China, 2015 “Coastal Niño/Niña and its predictability” (Invited)
- 14) T. Yamagata, and Collaborators, Prince Albert I Memorial Lecture, IAPSO General Assembly, 26thIUGG, Prague, Czech, 2015 “New Climate Modes and Their Predictability”
- 15) J.V. Ratnam, Takeshi Doi, Swadhin K. Behera, S.B. Ratna, Toshio Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2014, Singapore, 2015 “Value addition of WRF downscaling to SINTEX-F2 forecasts” (Invited)
- 16) J.V. Ratnam, Takeshi Doi, S.K. Behera, S.B. Ratna and Toshio Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2015, Singapore, 2015 “Improvements to the SINTEX-F2 Seasonal Hindcasts Over Australia by WRF Downscaling”
- 17) S. B. Ratna, J. V. Ratnam, S. K. Behera, Fredolin T. Tangang, T. Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2015, Singapore, 2015 “Downscaling climate variability over Southeast Asia using WRF model”
- 18) S. B. Ratna, J. V. Ratnam, S. K. Behera, T. Yamagata: Tropical Precipitation System Workshop 2015, Yokohama, Japan, 2015 “Downscaling seasonal climate variability over Southeast Asia and its association with the large-scale climate modes”
- 19) T. Yamagata: 11th Association of Pacific Rim Universities - Multi-Hazards around the Pacific Rim, Quezon, Philippines, 2015 “Prediction of Indo-Pacific Climate Modes for Mitigation and Preparedness of the Multi-Hazards” (Keynote)
- 20) T. Yamagata: Seminar at Mae Fah Luang University, Chiang Rai, Thailand, 2015 “Challenges

for a Sustainable World under a Planetary Boundary”

- 21) T. Doi, S. K. Behera, and T. Yamagata: Ocean Sciences Meeting 2016, New Orleans, U.S., 2016 “An interdecadal regime shift in rainfall predictability related to the Ningaloo Niño in the late 1990s”
- 22) P. Oettli, Y. Morioka, and T. Yamagata: Ocean Sciences Meeting 2016, New Orleans, U.S., 2016 “A Regional Climate Mode Discovered in the North Atlantic: Dakar Niño/Niña”
- 23) Y. Morioka, F. Engelbrecht, S. K. Behera: Ocean Sciences Meeting 2016, New Orleans, U.S., 2016 “Role of Antarctic Circumpolar Current in Decadal Climate Variability over Southern Africa”
- 24) Ratna, S. B., J. V. Ratnam, S. K. Behera, Fredolin T. Tangang, T. Yamagata: The International Science Conference on Monsoon Asian Hydro-Atmosphere Scientific Research and Prediction Initiative, Tokyo, Japan, 2016 “Downscaling Southeast Asian Summer Monsoon climate using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model”
- 25) 土井威志, Swadhin K. Behera, 山形俊男: 日本海洋学会2016年度春季大会, 2016 “SINTEX-F2 季節予測システムについて”
- 26) 山形俊男: 日本学術会議第23第6回地球・人間圏分科会, 2016年 “SIMSEAについて”
- 27) T. Yamagata and Collaborators: OCEANS 16 MTS/IEEE, Shanghai, China, 2016 “New Climate Modes and Rich Applicability of Seasonal Climate Prediction” (Keynote)
- 28) T. Yamagata: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Makuhari, Japan, 2016 “Geoscience and Society – The Era of Mega-Disaster: What We Can Do for the Society” (Panelist)
- 29) T. Doi, S.K. Behera, T. Yamagata: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Makuhari, Japan, 2016 “SINTEX-F2 seasonal prediction system”
- 30) T. Doi, C. Yuan, S.K. Behera, T. Yamagata: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Makuhari, Japan, 2016 “Predictability of the California Niño/Niña”
- 31) T. Yamagata: 21st Century Trilateral Maritime Cooperation –US-Japan-Australia Maritime Security Conference–, Canberra, Australia, 2016 “Challenges for Sustainable World under Recent Advancement in Ocean and Climate Prediction”
- 32) T. Doi, S.K. Behera, T. Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2016, Beijing, China, 2016 “The SINTEX-F2 seasonal prediction system” (Invited)
- 33) T. Doi, S.K. Behera, T. Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2016, Beijing, China, 2016 “Coastal Niño prediction”
- 34) J. V. Ratnam, T. Doi, S.K. Behera, S.B. Ratna and T. Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2016, Beijing, China, 2016 “Improvements to SINTEX-F2 seasonal retrospective forecasts using WRF model”
- 35) S. B. Ratna, J. V. Ratnam, S. K. Behera, T. Doi, T. Yamagata: Asia Oceania Geosciences Society 2016, Beijing, China, 2016 “Downscaling SINTEX-F2 Retrospective Seasonal Forecast over Southeast Asia Using WRF Regional Model”
- 36) 東塚 知己, 谷崎 知穂, 土井 威志: Asia Oceania Geosciences Society 2016, Beijing, China, 2016 “Is predictability of Indian Ocean Dipole events dependent on the developing

mechanism?”

- 37) T. Doi, A. Storto, S.K. Behera, T. Yamagata: 2016年度海洋学会秋季大会, 2016 “海洋垂表層観測データを用いた初期値補正とインド洋ダイポールモード現象の予測精度向上について”
- 38) T. Yamagata: SIMSEA Regional Symposium 2016, Diliman Quezon City, Philippines, 2016 “Asia-Pacific Challenge for a Sustainable World under a Planetary Boundary (Keynote)”
- 39) T. Yamagata: AASSA-NAST PHL Workshop on the Role of Science Academies in Sustainable Development in conjunction with the 2016 Climate Conference on Addressing Climate Risk for Sustainable Development, Tagaytay City, Philippines, 2016 “Prediction of Climate Variation and its Rich Application to Societies for Sustainable Development” (Keynote)
- 40) S. B. Ratna, J. V. Ratnam, S. K. Behera, T. Doi, T. Yamagata: Techno-Ocean 2016, Kobe, Japan, 2016 “Downscaled Prediction of Extreme Seasonal Climate over Southeast Asia using a Regional Climate Model”
- 41) T. Yamagata: Workshop for modeling and prediction of climate variability and change and its social applications, Aizu, Japan, 2016 “Necessity of Network-Based Marine Crisis Watch and Prediction for Knowledge to Operate”
- 42) T. Yamagata: Workshop on Western Pacific Ocean Circulation and Climate—Past, Present, and Future, Qingdao, China, 2016 “Prediction of Climate Variation and its Rich Application to Societies for Sustainable Development”
- 43) 土井威志: 全球降水システム研究会2016, Japan, 2016 “Prediction of Indian Ocean Dipole Mode and its teleconnections”
- 44) 山形俊男: 温暖化・海洋酸性化の研究と対策に関する国際会議～西太平洋におけるネットワーク構築に向けて～, 2017 “Future Earth/SIMSEAと海洋危機ウォッチ”
- 45) T. Yamagata: Symposium on “Past, Present, Future of Predicting Ocean and Climate Variability” Organized by Application Laboratory, Tokyo, Japan, 2017 “Ocean, climate and society”
- 46) T. Doi, A. Storto, S.K. Behera, T. Yamagata: Workshop on Application of Ocean and Climate Predictions, Tokyo, Japan, 2017 “Improved seasonal prediction of the Indian Ocean Dipole Mode”
- 47) T. Tozuka, Tanizaki C., Takeshi Doi, and Toshio Yamagata: Workshop on Application of Ocean and Climate Predictions, Tokyo, Japan, 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”
- 48) Ratna, S. B., J. V. Ratnam, S. K. Behera, T. Doi, T. Yamagata: Workshop on Application of Ocean and Climate Predictions, Tokyo, Japan, 2017 “Validation of the regional climate model for the seasonal forecast over Southeast Asia”
- 49) O. Pascal, Behera S. K. and T. Yamagata: Workshop on Application of Ocean and Climate Predictions, Tokyo, Japan, 2017 “Palm oil in Malaysia: Climate control and potential yield”

- 50) 山形俊男：宇宙学セミナー、京都大学宇宙総合学研究ユニット, 2017 “気候変動予測と持続可能な開発に向けた社会応用”
- 51) 山形俊男：東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「陸と海と人と一里海」, 2017 “Future EarthとSIMSEA:アジア太平洋地域の人間安全保障への貢献”
- 52) T. Doi, A. Storto, S.K. Behera, T. Yamagata: 8th OFES International Workshop, Japan, 2017 “Improved seasonal prediction of the Indian Ocean Dipole Mode”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 本課題に関するホームページを開設した。本課題の活動状況及び成果を社会に配信し、国民の理解や支持を得るためのツールとして利用している。(平成26年度に開設し現在も実施中)
日本語版：<http://www.jamstec.go.jp/apl/ertdf2-1405/>
英語版：http://www.jamstec.go.jp/apl/ertdf2-1405/index_en.html
- 2) 一般公開シンポジウム「季節を読む -予測科学の最前線-」(共催:環境省、海洋研究開発機構 2015年5月9日、東京大学山上会館、観客約100名)にて講演
<http://www.jamstec.go.jp/apl/j/topics/sympo201505/>
- 3) 鎌倉市生涯学習講座「地球環境変動研究の最前線」で講義(主催:鎌倉市教育委員会, 平成27年6月18日、大船学習センター、約30名)
- 4) 山形俊男：地球観測衛星データ利用シンポジウム(主催:宇宙航空研究開発機構、後援:内閣府宇宙戦略室、文部科学省、経済産業省、環境省、六本木 アカデミーヒルズ、2015年11月2日) 惑星境界のもとで持続可能な世界の実現をめざして”(基調講演)
- 5) 山形俊男：国際シンポジウム「海洋における温暖化と酸性化～現状と今後の対応策～, 笹川平和財団海洋政策研究, 2016 “予測と情報基盤の必要性”
- 6) 山形俊男, 袁潮霞, Pascal Oettli, 土井威志, Swadhin Behera:日本学術会議公開シンポジウム「気候変動下の気象災害の動向と農業災害リスクマネジメント」, 2016 “気象災害マネジメントにおける気候変動予測の重要性”
- 7) 山形俊男:総合海洋政策本部参与会議第3回 海洋観測強化PT, 2016 “海洋・宇宙の連携による人間安全保障への貢献”
- 8) 山形俊男:水産ジャーナリストの会 7月研究会, 三会堂ビルディング大日本水産8F大会議室 2016年7月7日 “気候の変化・変動の海”
- 9) 山形俊男: 第132回海洋フォーラム, 笹川平和財団ビル11階国際会議場, 2016年7月12日 “新しい気候変動現象の発見と最近の異常気象”
- 10) 本課題で扱った最近頻発し始めた自然気候変動現象であるエルニーニョモドキ現象やニンガルーニーニョ現象などについて、世界で唯一予測情報を配信。(平成27年度に既存のサイトを改良。現在も実施中。サイトは国内外から平均して毎月8000以上のアクセスがある)
<http://www.jamstec.go.jp/frcg/research/d1/iod/seasonal/outlook.html>
- 11) 一般向けに毎月の季節予測情報を解説する”季節ウォッチ”を開設(平成28年度に開設し、現在も実施中。サイトは国内外から平均して毎月2000以上のアクセスがある)

<http://www.jamstec.go.jp/aplinfo/climate/>

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) プレスリリース、関東地方における熱中症と気候変動の関係を解明
(http://www.jamstec.go.jp/j/about/press_release/20140710/)
- 2) JAMSTEC記者説明会「異常気象をもたらす気候変動現象～予測と観測の最前線～」(主催：JAMSTEC, 平成27年8月6日、海洋研究開発機構SIP連絡室、約20名)
- 3) Oettli et al. 2016に関してプレスリリース
- 4) メディア取材多数(NHKニュースウォッチ9、テレビ朝日、テレビ愛知、JAL国際線番組 Sacred Eco Journey (7月から2ヶ月放映；MX TV 1 8月9日19:00-19:40)、日経新聞、読売新聞、Newton、ナショナルジオグラフィック、日経ヴェリタス、日刊ゲンダイ、西日本新聞、ニッポンドットコム、日本海事新聞など)
- 5) H28.5.13 [affaritaliani.it](http://www.affaritaliani.it)(イタリアのメディア) SINTEX-Fによる近夏のイタリアの気象予測についてMeteo, estate 2016 fresca e piovosa sull' Italia. La previsione choc
<http://www.affaritaliani.it/cronache/meteo-estate-2016-estate-2016-fresca-previsioni-meteo-estate-estate-fresca-piovosa-come-sara-estate-meteo-422323.html>
- 6) H28.5.26 朝日新聞 スーパーエルニーニョのまとめ、解説、この夏の見通し
- 7) H28.5.22 TBS インドの熱波の原因と日本との関係について
- 8) H28.5.25 NHK メガディザスター異常気象 この夏の異常気象の予測(エルニーニョの終息、ラニーニャの発達、インド洋の状況など)、温暖化のハイエイタスの終了の見込みなど
- 9) H28.5.25 日経新聞 インド洋の海水温上昇のメカニズムや日本の天気を与える影響など
- 10) H28.5.28 日経新聞 エルニーニョとインドの猛暑との関係、日本への影響について
- 11) H28.6.1 Bangor Daily News (アメリカのサイト) A Look Ahead At Summer And What To Expect In The Tropics
<http://checkinwithcharlie.bangordailynews.com/2016/06/01/home/a-look-ahead-at-summer-and-what-to-expect-in-the-tropics/>
- 12) H28.6.6 天際新聞(中国のサイト) 著名海洋、気候学家 Toshio Yamagata受聘为我校荣誉教授(山形俊男教授、南京信息工程大学の荣誉教授に)
- 13) H28.6.6 天際新聞(中国のサイト) 协同创新中心特邀JAMSTEC应用研究所 山形俊男教授(Toshio Yamagata)作报告
- 14) H28.8.2 日経新聞 「旬の人・時の人 熱帯の海から日本の気象を長期予測」
- 15) H28.7.12 フジテレビ 「海洋フォーラム」での講演、「新しい気候変動現象の発見と最近の異常気象」の取材
- 16) H28.8.4 WLKY.com(アメリカ、ルイビル 사이트) The greatest below normal temp. forecast this winter on earth 冬季気候、通常より大幅に下回ると予測
- 17) H28.8.18 読売新聞 東大チーム 温暖化「一休み」確認 海面温低下で0.3度抑制
- 18) H28.8.23 Meteo Giornale 4) Prime previsioni per la stagione invernale 2016-17(primaparte): il freddo inverno previsto da JAMSTEC! 2016-2017 冬 早期

予測:JAMSTECによれば、冬は寒い!

<http://freddofili.it/14314-prime-previsioni-la-stagione-invernale-2016-17-part-e-freddo-inverno-previsto-jamstec/>

- 19) H28. 9. 27 日経新聞 台風とエルニーニョ・ラニーニャとの関係について
- 20) H28. 9. 30 農業新聞 1今冬のラニーニャ現象の勢力について、エルニーニョと同じくらいの規模になるのでしょうか2日本への影響について3世界への影響について
- 21) H28. 10. 11 じゃかるた新聞 ・ダイポールモード現象(以下、同現象)の発生を確認しているか・確認しているのであれば、同現象の発生原因・ことしの同現象はいつまで続くか・同現象のインドネシアへの影響(インドネシアはこれから雨期に入ります)・ラニーニャ現象と同現象が発生した際に考えられるインドネシアへの影響・季節風 や貿易風など、インドネシアで同現象による影響を拡大させる要因は何か・同現象の日本への影響・同現象の概要(端的に説明する場合) (記事掲載)
<http://www.jakartashimbun.com/free/detail/31897.html>
- 22) H28. 10. 28 日本経済新聞 台風異変の夏 大きな被害に14個中10個が日本に上陸・接近

(6) その他

- 1) 山形俊男、2015 Prince Albert I Medal、国際海洋物理科学協会 (IAPS0) 2015年6月29日にプラハで行われた国際海洋物理科学協会 (IAPS0)総会時の受賞記念講演<New climate modes and Their Predictability>において本プロジェクト成果を発表
- 2) Chaoxia Yuan、JAMSTEC 2014年度 業績表彰 研究開発功績賞、海洋研究開発機構
- 3) Venkata Ratnam Jayanthi, JAMSTEC 2016年度 業績表彰 研究開発功績賞、海洋研究開発機構 (インド社会に強く影響する熱波や寒波と太平洋熱帯域の海水温変動との関係を初めて解明し、今後の発生予測への道筋を拓いた。Nature社のオープンアクセス誌 Scientific Reportsで2016年4月に発表された論文” Anatomy of Indian heatwaves” には既に48,000以上のアクセス数がある。)
- 4) 土井威志, 2017年度日本海洋学会岡田賞 (本研究の成果を含む熱帯と沿岸域の湧昇現象の変動とその予測の研究による受賞)

8. 引用文献

- 1) Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata, 2007 : El Nino Modoki and its possible teleconnection. J. Geophys. Res., 112, C11007, doi:10.1029/2006JC003798.
- 2) Ashok, K., and T. Yamagata, 2009 : The El Nino with a difference. Nature. 461, 481-484.
- 3) Weng, H., K. Ashok, S. K. Behera, S. A. Rao, and T. Yamagata, 2007 : Impacts of recent El Nino Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. Climate Dynamics, 29, 113-129. (PDF file)
- 4) Weng, H., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2009a: Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Nino Modoki and El Nino events. Climate Dynamics, 32, 663-674.

- 5) Weng, H., G. Wu, Y. Liu, S. K. Behera, and T. Yamagata, 2009b: Anomalous summer climate in China influenced by the tropical Indo-Pacific Oceans. *Climate Dynamics*. DOI 10.1007/s00382-009-0658-9.
- 6) Feng, M., M. J. McPhaden, S.-P. Xie, and J. Hafner (2013), La Nina forces unprecedented Leeuwin Current warming in 2011, *Sci. Rep.*, 3, doi:10.1038/srep01277.
- 7) Kataoka, T., T. Tozuka, S. K. Behera, and T. Yamagata (2014), On the Ningaloo Nino/Nina, *Clim Dyn.*, doi:10.1007/s00382-013-1961-z.
- 8) Florenchie, P., J. R. E. Lutjeharms, C. J. C. Reason, S. Masson, and M. Rouault (2003), The source of Benguela Niños in the South Atlantic Ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 30, 1505, doi:10.1029/2003GL017172, 10.
- 9) Richter, I., S. K. Behera, Y. Masumoto, B. Taguchi, N. Komori, and T. Yamagata (2010), On the triggering of Benguela Niños: Remote equatorial versus local influences, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L20604, doi:10.1029/2010GL044461.
- 10) Yuan, C. and T. Yamagata, 2014: California Niño/Niña. *Scientific reports*, 4.
- 11) Oettli, P., Y. Morioka, and T. Yamagata, 2016: A Regional Climate Mode Discovered in the North Atlantic: Dakar Niño/Niña. *Scientific reports*, 6.
- 12) 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. Climate*, 18, 4474-4494
- 13) Doi, T., S. K. Behera, and T. Yamagata, 2013: Predictability of the Ningaloo Nino/Nina. *Sci. Rep.*, 3, 2892; DOI:10.1038/srep028
- 14) Luo, J.-J., S. Masson, S. Behera, and T. Yamagata 2007: Experimental forecasts of Indian Ocean Dipole using a coupled OAGCM. *J. Climate*, 20(10), 2178-2190.
- 15) Luo, J.-J., S. Masson, S. Behera, and T. Yamagata 2008: Extended ENSO predictions using a fully coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, 21(1), 84-93.
- 16) Jin, E. K., and coauthors, 2008: Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere models, *Clim. Dyn.*, 31, 647-664.
- 17) Morioka, Y., K. Takaya, S. K. Behera, and Y. Masumoto, 2015: Local SST impacts on the summertime Mascarene high variability. *J. Climate*, 28, 678-694
- 18) Sasaki, W., K. J. Richards, and J.-J. Luo, 2012: 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.*
- 19) Ratnam, J. V., and Coauthors, 2013: Dynamical downscaling of austral summer climate forecasts over southern Africa using a regional coupled model. *J. Climate*, 26, 6015-6032
- 20) Tollefson, J. 2014: Climate change: The case of the missing heat, *Nature* 505, 276-278
- 21) Kosaka and Xie 2013: Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature* Vol. 501, pp. 403-407

- 22) Torrence, C. and G. P. Compo, 1998: A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 61-78.
- 23) C. Tsai, S. K. Behera, and T. Waseda: *Scientific Reports*, 5, 8107, doi:10.1038/srep08107 (2015) "Indo-China Monsoon Indices"
- 24) T. Doi, S. K. Behera, and T. Yamagata: *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, doi:10.1002/2014JC010562 (2015a) "An interdecadal regime shift in rainfall predictability related to the Ningaloo Niño in the late 1990s"
- 25) T. Doi, C. Yuan, S. K. Behera, and T. Yamagata: *Journal of Climate*, 28, 7237-7249 (2015b) "Predictability of the California Niño/Niña"
- 26) P. Oettli, Y. Morioka, and T. Yamagata: *Scientific Reports*, 18782 (2016) "A Regional Climate Mode Discovered in the North Atlantic: Dakar Niño/Niña"
- 27) Ratnam J. V., S.K. Behera, S.B. Ratna, M. Rajeevan and T. Yamagata: *Scientific Reports* 6, 24395 (2016a) "Anatomy of Indian heatwaves"
- 28) Ratnam J. V., S.K. Behera, H. Annamalai, S.B. Ratna, M. Rajeevan and T. Yamagata: *Scientific Reports* 6, 37657(2016b) "ENSO's far reaching connection to Indian cold waves"
- 29) Doi T., S. K. Behera, and T. Yamagata: *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 8, 4, 1847-1867 (2016) "Improved seasonal prediction using the SINTEX-F2 coupled model"
- 30) Ratnam J. V., T. Doi and SK Behera: *J. Climate* 30, 3219-3235, (2017) "Dynamical downscaling of SINTEX-F2v CGCM seasonal retrospective austral summer forecasts over Australia"

- 31) Ratna S.B., J.V. Ratnam, S.K. Behera, F.T. Tangang and T. Yamagata: *Climate Research*, 71, 263-280 (2017) "Validation of the WRF regional climate model over the subregions of Southeast Asia: climatology and inter annual variability"
- 32) A. Takaya, Y. Morioka and S. K. Behera: *Scientific Reports*, 4, 5655, doi:10.1038/srep05655 (2014) "Role of climate variability in the heatstroke death rates of Kanto region in Japan"
- 33) 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.
- 34) C. Yuan, and T. Yamagata: *Scientific Reports*, 17252 (2015) "Impacts of IOD, ENSO and ENSO Modoki on the Australian Winter Wheat Yields in Recent Decades"

Prediction of Climate Variability with a Focus on Newly Discovered Modes and its Application

Principal Investigator: Toshio YAMAGATA

Institution: Application Laboratory/JAMSTEC
3173-25 Showa-machi, Kanazawa-ku,
Yokohama, Kanagawa, 236-0001, JAPAN
Tel: +81-45-778-5502 / Fax: +81-45-778-5707
E-mail: yamagata@jamstec.go.jp

[Abstract]

Key Words: El Niño Modoki, Coastal Niño, Asia, Oceania, Possibility of Climate Service

Recent observations are starting to lead to the identification of new modes of interannual climate variability, some of which may play important roles in governing regional and global climate extremes. One such new mode examined was the proposed ENSO Modoki, a coupled ocean-atmosphere phenomenon in the tropical Pacific Ocean. It is quite different from the canonical ENSO in terms of its spatial characteristics, timescale, and teleconnection patterns—it shows a warm sea surface temperature (SST) anomaly in the central Pacific flanked by cold anomalies on both sides of the tropical Pacific. Several studies have shown that the ENSO Modoki has become more prominent in the past 15 years. Another new climate mode is the Ningaloo Niño/Niña, which was identified recently as warm SST anomalies off the west coast of Australia (Niño) cycling with cold anomalies in the same region (Niña). This regional climate variation is developed by local air-sea feedback and remote influences from La Niña in the tropical Pacific. The Ningaloo Niño/Niña profoundly affects the marine ecosystem, as well as the climate conditions of Australia. In this project, we challenge to predict the newly found climate modes such as the ENSO Modoki and the Ningaloo Niño/Niña by the SINTEX-F seasonal prediction system, and explore possibilities of climate services on agriculture, disease, and water management over Asia-Oceania, using dynamical downscaling from global seasonal forecast to regional forecast.

The global warming and the Interdecadal Pacific Oscillation (IPO) started influencing the coastal ocean off Western Australia, leading to a dramatic change in the regional climate predictability. The warmer ocean started driving rainfall variability regionally there after the late 1990s, and increase Ningaloo Niño/Niña events.

The new seasonal prediction system, a high-resolution version with a dynamical sea-ice model, is more skillful in predicting the subtropics, particularly, the Ningaloo

Niño. The improvement may contribute to enhancing prediction skills of the regional rainfall distributions and encourage us to develop an early warning system that may be applied for societal and industrial activities.

We also developed dynamical downscaling techniques from global seasonal forecast to regional forecast over Asia and Oceania, and explored possibilities of climate services there. We successfully developed prediction systems for wheat yield variations in Australia and palm oil fresh fruit bunches total yields in Malaysia in advance by use of simple climate mode indices.