

# 気候モデルを用いた短期気候変動予測研究および 極端気象に対する温暖化寄与推定の研究

—2019年度正野賞受賞記念講演—

今 田 由紀子\*

## 1. はじめに

この度、正野賞という栄えある賞を頂くことができましたことは身に余る光栄でございます。ここに至るまでに大変多くの素晴らしい方々との巡り会がありました。限られた紙面ではありますが、私の研究業績がどのような方々に支えられて生まれたものであるかを、感謝の意と共にお伝えすることができればと思い、筆を執りました。

博士課程への進学とともに研究の道に進むと決意してから13年余りが過ぎました。

企業に勤めていた時期を含むため同世代の研究者と比べると研究に身を投じた年数は若干短めであるにもかかわらず、これまでの私の研究テーマは多岐に渡っており、熱帯短期気候変動の予測可能性研究、極端気象に対する温暖化寄与推定（イベント・アトリビューション）、気象学分野と水文学分野の融合的研究、の大きく3つに大別することができます。ころころと研究対象が目移りするのは褒められたことではありませんが、これは自分の弱点ではなくむしろ強みだと、近頃は思えるようになってきました。今回、これらの研究を総合して受賞対象として取り上げて頂けたことは、私が選択してきた道が間違いではなかったという自信に繋がりました。以下では、これら3つの研究テーマにおけるこれまでの研究成果を、章を分けて紹介していきたいと思えます。

## 2. 熱帯の短期気候変動の予測研究

私の気候力学研究は、エルニーニョ・南方振動現象（El Niño/Southern Oscillation ; ENSO）への興味から始まりましたが、ここでいう熱帯の短期気候変動には ENSO も含まれています。このような年々スケールの変動を扱うには、気候モデルを用いた長期積分や感度実験を行うことが有効です。大学の学部4年生だった私は、この分野では一流の研究機関である、住 明正先生率いる気候モデリングのプロ集団、東京大学気候システム研究センター（Center for Climate System Research ; CCSR、現在の大気海洋研究所気候システム研究系）を進学先に選ぶことができるという幸運に恵まれ、名立たる先生方や優秀な先輩方、同期、後輩達に囲まれて、刺激的な学生時代を過ごしました。特に、指導教官の木本昌秀先生には、様々な時空間スケールの現象の理解と大循環モデル（General Circulation Model ; GCM）を使いこなすスキルはもとより、伝える能力、人と議論する能力、研究を実施するのに必要な予算を獲得する能力などなど、研究者として必要なスキルを、時には厳しくご指導いただき、また時にはその背中から多くを学ばせて頂きました。少し具体的な話になりますが、GCMをベースとした研究を行うに当たっての心構えとして、大型計算機の計算機資源を常に費用に換算して無駄遣いしないこと、また、数値計算結果の検証に不可欠な観測データを当たり前のよう利用しないこと、観測に従事されている方々の功績に常に感謝と敬意を表すること、これらが最初に木本先生から教わったことであり、今でも心に刻み込まれています。

当時、CCSR で用いられていた大気海洋結合モデル MIROC (Model for Interdisciplinary Research on Climate) は、ENSO の再現に問題を抱えており、ENSO

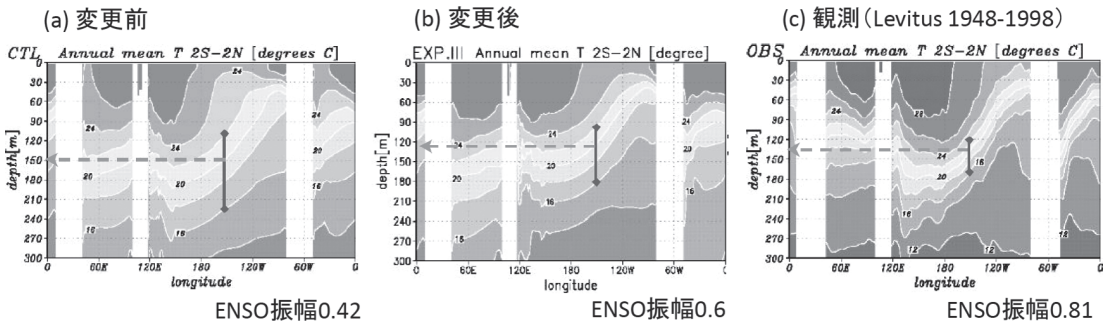
\* 気象研究所。  
yimada@mri-jma.go.jp

—2020年9月10日受領—  
—2020年11月11日受理—

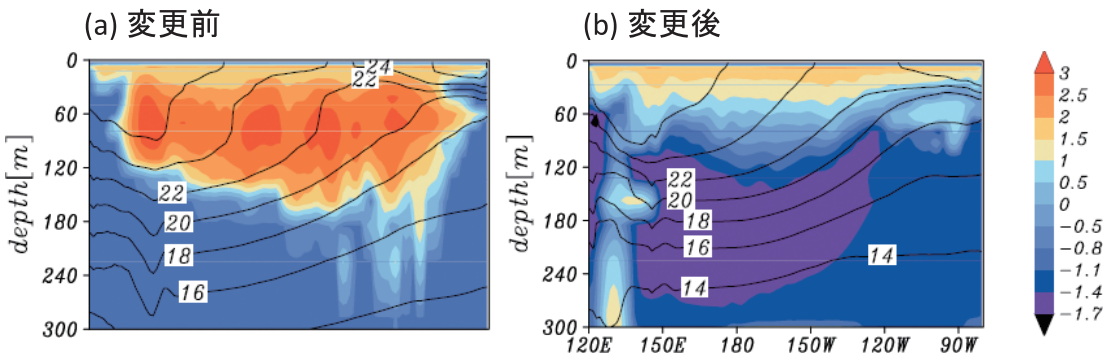
の研究を志すに当たり、まずは研究に必要な道具を整備することから始めることになりました。一番の問題は、ENSOの振幅が小さいこと、その直接の原因は、熱帯海洋の温度躍層の鉛直勾配が小さすぎることにあったと考えられました(第1図)。調査の結果、海洋表層の鉛直拡散や粘性に問題があることが分かり、気候モデルを触り出して間もないころにいきなりディープなテーマにどっぷり漬かることになりました。大気モデリングに詳しい方々はMeller and Yamada (1982)の乱流クロージャーモデルはよく御存知だと思いますが、その海洋版に当たるNoh and Kim (1999)のスキームの一部を改変したり(第2図)、数値安定度の高いフィルターを導入したり、パラメーター調整を行ったりと様々な変更を加えることで、温度躍層の成層が改善し(第1図)、ENSOの振幅を1.5倍まで増加させることに成功しました(Imada and Kimoto 2006)。とはいえ、この時点ではまだ観測される振幅には届かなかったわけですが、後に木本研究室の先輩でもある渡

部雅浩さんが、ENSO振幅の鍵になる積雲対流の重要なパラメーターを発見し、無事解決となります(Watanabe *et al.* 2011)。追いかけても追いかけても追いつくことのできない偉大な存在であることを改めて実感したエピソードでした。

さらに結合モデルに改善を施すため、熱帯海洋に発達する季節内スケールの熱帯不安定波という現象の効果を、物理過程としてモデルに取り込むという取り組みも行いました(第3図)。熱帯不安定波とは、赤道付近の強い東西流に伴う南北流速シアや密度勾配によって生じる不安定波動ですので、運動量や熱エネルギーを運ぶことで海洋の基本場に多大な影響を与えます(Imada *et al.* 2012)。この現象の面白いところは、単にモデルの基本場を改善するというだけではなく、渦スケールの非線形な運動量・熱輸送によって、ENSOの振舞いに影響を与えることです。しかし、当時の多くの海洋大循環モデルは、このような渦を解像する分解能を持っておりませんでしたので、モデルの力学方



第1図 赤道域(2°S-2°N)における海水温の年平均値の東西-深さ断面(°C)。(a)鉛直拡散・粘性スキームおよびパラメーター修正前、(b)修正後、(c)観測(LEVITUS, 1948-1998年平均)。



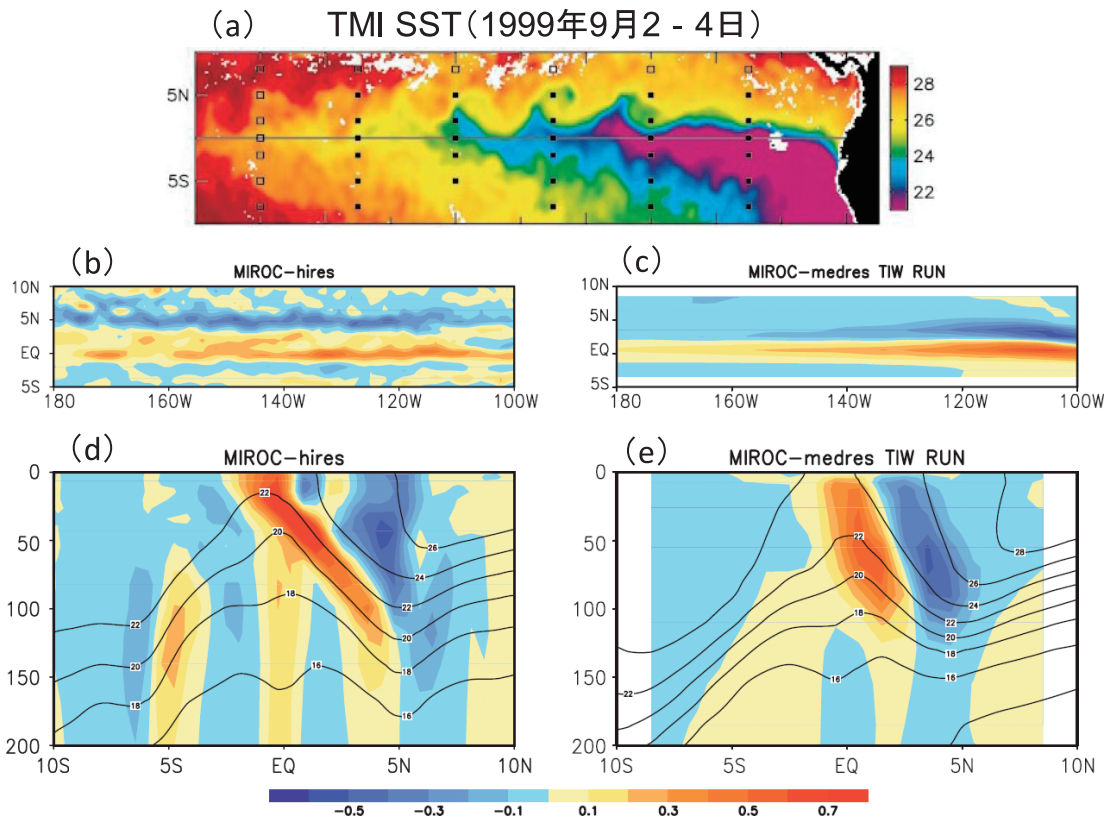
第2図 赤道域(2°S-2°N)における鉛直拡散係数の年平均値( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ , 陰影)。(a)鉛直拡散・粘性スキームおよびパラメーターの変更前、(b)変更後。黒線は海水温の気候値(°C)。Imada and Kimoto (2006)のFig. 4より抜粋。

程式における粘性項や拡散項に熱帯不安定波の効果を模したパラメタリゼーションを導入する必要がありました。

先行研究では、熱帯不安定波が ENSO の振幅や非対称性に影響を与えることが知られていました (An 2008)。具体的には、観測される ENSO はエルニーニョとラニーニャの間で常に対称的に変動を繰り返しているわけではなく、第 4 図に示すように、エルニーニョの方が振幅が大きく終息が早い、ラニーニャの方が振幅が小さくだらだらと持続する、という非対称な特徴を持っています (Burgers and Stephenson 1999; An and Jin 2004; Imada and Kimoto 2012)。An (2008) は、この特徴をもたらす要因の 1 つに熱帯不安定波を挙げていましたが、彼の研究は理想化された概

念モデルに基づいており、複雑な気候系の中でどの程度の影響があるかについての議論は不十分でした。我々が GCM へ導入した熱帯不安定波のパラメタリゼーションによって、熱帯不安定波が ENSO の振舞いに多大な影響を与えていることを初めて証明することができたのです (第 4 図, Imada and Kimoto 2012)。このようなスケール間の相互作用を考えるに当たって、小さいスケールの現象が非線形な効果によって大きいスケールの場に影響を与えるプロセスというのは物理としても大変面白く、科学者として気持ちが高揚しました。

ここまではモデルの改良に関する成果となります。モデル開発はなかなか論文になりにくいと言われることも多いですが、モデルに新たな改良が加わること



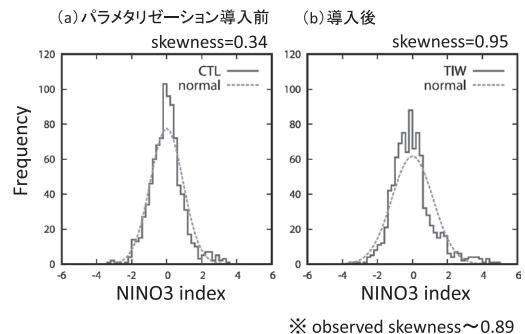
第 3 図 (a) 熱帯降雨観測衛星 (TRMM) のマイクロ波放射計 (TMI) による海面水温の観測値 (1999年9月2日から4日の平均)。冷舌の北縁に熱帯不安定波の構造が確認できる。(b) MIROC の高解像度版 (渦許容の海洋モデル) でシミュレートされた過熱フラックス収束の海表面における水平分布 ( $10^{-6} \text{K s}^{-1}$ )。 (c) MIROC の低解像度版 (渦を解像できない海洋モデル) に熱帯不安定波のパラメタリゼーションを導入した場合、海面における過熱フラックス収束の水平分布 ( $10^{-6} \text{K s}^{-1}$ )。 (d) および (e) それぞれ b および c と同様、ただし、日付変更線に沿った南北-深さ断面。 d および e の黒線は、海水温氣候値を示す ( $^{\circ}\text{C}$ )。 b-e は Imada and Kimoto (2012) の Fig. 2 を引用。

で、ENSOの振舞いがどのように変化するか、単に振幅や非対称性が変化した、というだけではなく、ENSOの位相変化をもたらす主要モードが切り替わることや、成長をもたらすピャークネスフィードバック(Bjerkness 1969)の各項のバランスがどのように変化したかなど、ENSOを隅から隅まで調べ尽くす研究を実施しました(Imada and Kimoto 2012)。この成果を通して国際的なENSO研究グループのメンバーに加えて頂くことになりました。このグループの中心的存在でもあるハワイ大学のFei-Fei Jin先生のもとに数週間滞在するというチャンスを頂いた際には、短期間で自分が持ちうるすべてのENSO研究の成果を結集して必死に議論したのを覚えています。その甲斐あって、現在に至るまでFei-Fei Jin先生からは事あるごとに御指導や激励の言葉を頂き、ENSOグループにおけるプレゼンスを高めていただきました。現在、気候と海洋一変動・予測可能性・変化研究計画(Climate and Ocean-Variability, Predictability and Change; CLIVAR)の太平洋地域パネルメンバーという委員を任せさせていただくことになったのも、これらの交流の結果であると感じております。

大気海洋結合モデルという大規模なシステムの開発は、大変多くの皆さんの努力によって成し遂げられておりますので、私の一個人の取り組みは取るに足らないものではありませんが、ENSOを研究する上ではこれらのスキームの変更は重要なポイントになっており、その後の予測可能性研究に大いに生かされました。というのも、今回受賞対象となった予測可能性研究とは、数か月先の気候傾向を予測する季節予報の予測可能性に関する研究になりますが、このスケールの現象を支配している要因の1つがENSOですので、ENSOがいかに正確に予測できるかが一番の鍵となります。私が季節予報研究に足を踏み入れた10年前というのは、日本の気象庁を含む世界の現業予報機関において、これまで大気大循環モデル(Atmospheric GCM; AGCM)で行われていた季節予報を大気海洋結合モデルに移行する動きが始まった頃でした。現業レベルでは着手していたものの、研究の分野では、気候予測と言えば初期値化を行わずに境界値問題として数値計算を行う温暖化予測が中心でした。その上で、現実的な初期値を与えて初期値問題も考慮する季節予報や近未来予測も新たな研究の可能性として注目され、第5次結合モデル相互比較プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project 5; CMIP5)において

もチャレンジ目標の1つとして設定されていました。当時、日本では文部科学省の革新プログラムの下、錚々たる先輩方がCMIP5に向けた温暖化研究を率いていらっしゃいました。石井正好さん、建部洋晶さん、望月 崇さん、近本喜光さん、森 正人さん、荒井美紀さんといった中心メンバーの方々がMIROCを用いた実験の事後季節予測システム(System for Prediction and Assimilation by MIROC; SPAM)の開発をされている中、私は学生の身分でしたがその一部に携わらせて頂きました。「実験的」と付けているのは、気象庁で利用されているような高精度のリアルタイム予測システムではないということです。研究目的としては、手軽にコードにアクセスして変更を加えられ、迅速に感度実験などを実施できるツールを整えておく必要があります。予報することが目的ではなく、事後季節予測(ハインドキャスト)、つまり、過去の気候を再予測して、正解(観測事実)と答え合わせをしながらプロセスを理解する、という過程が、予測可能性研究では重要になります。

CMIP5のプロジェクトの1つとして取り上げられたのは近未来予測でしたので、SPAMの完成後は、先輩方は総力を挙げて近未来予測のメカニズム研究に取り組まれていました。その傍ら、予測可能性研究のためには季節予測も不可欠である、というリーダーの方々の判断で、私とその任務を任されることになりました。その頃の私は、学位取得直後の駆け出しのポスドクでした。メインの近未来予測プロジェクトの傍らで、季節予測ツールを使って好きなように研究して良



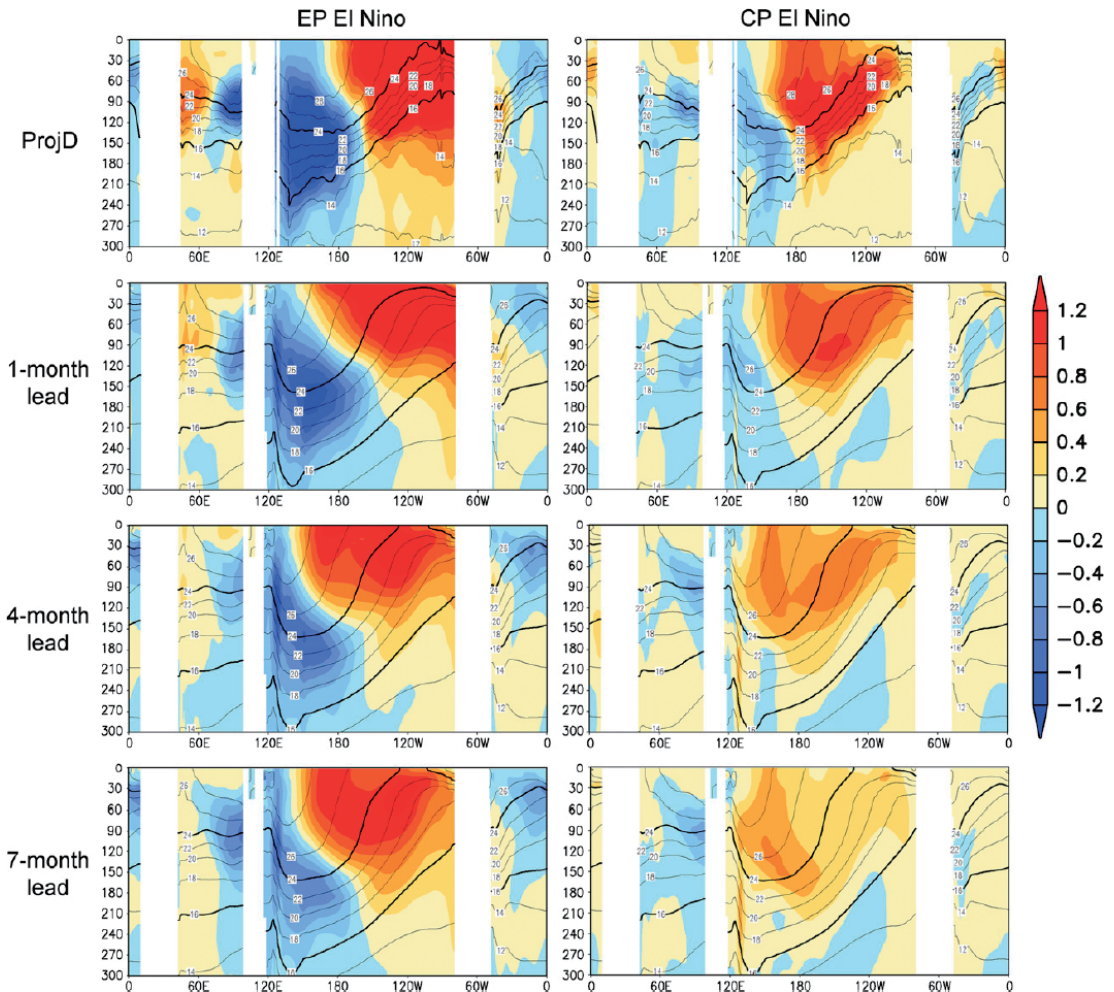
第4図 NINO3インデックス(150°-90°W, 5°S-5°Nで平均した海面水温偏差)の頻度分布。(a)熱帯不安定波のパラメタリゼーション導入前、(b)導入後。各実験の積分期間は85年(スピンアップ10年)。Imada and Kimoto (2012)のFig. 5を引用。

いよ、という非常に自由度の高い職務を命じられ、CMIP 対応で苦勞されていた先輩方には未だに頭が下がる思いですが、非常に楽しく自由に研究をさせて頂いておりました。

先ほどから述べている ENSO グループでは、この頃 ENSO flavors と呼ばれる 2 種類のエルニーニョに関する研究が流行りでした (例えば, Kug *et al.* 2009). 熱帯東太平洋に変動の中心を持つ従来型のエルニーニョと、近年頻繁に観測されるようになった中央太平洋に変動の中心を持つ新型のエルニーニョでは、従来型の方が季節予測精度が高いということが経験的に知られていました. その理由がどこにあるのかを、実際

の季節予測システムによって予測されたエルニーニョの発達プロセスを詳細に調べることににより、明らかにすることができました (第 5 図, Imada *et al.* 2015b).

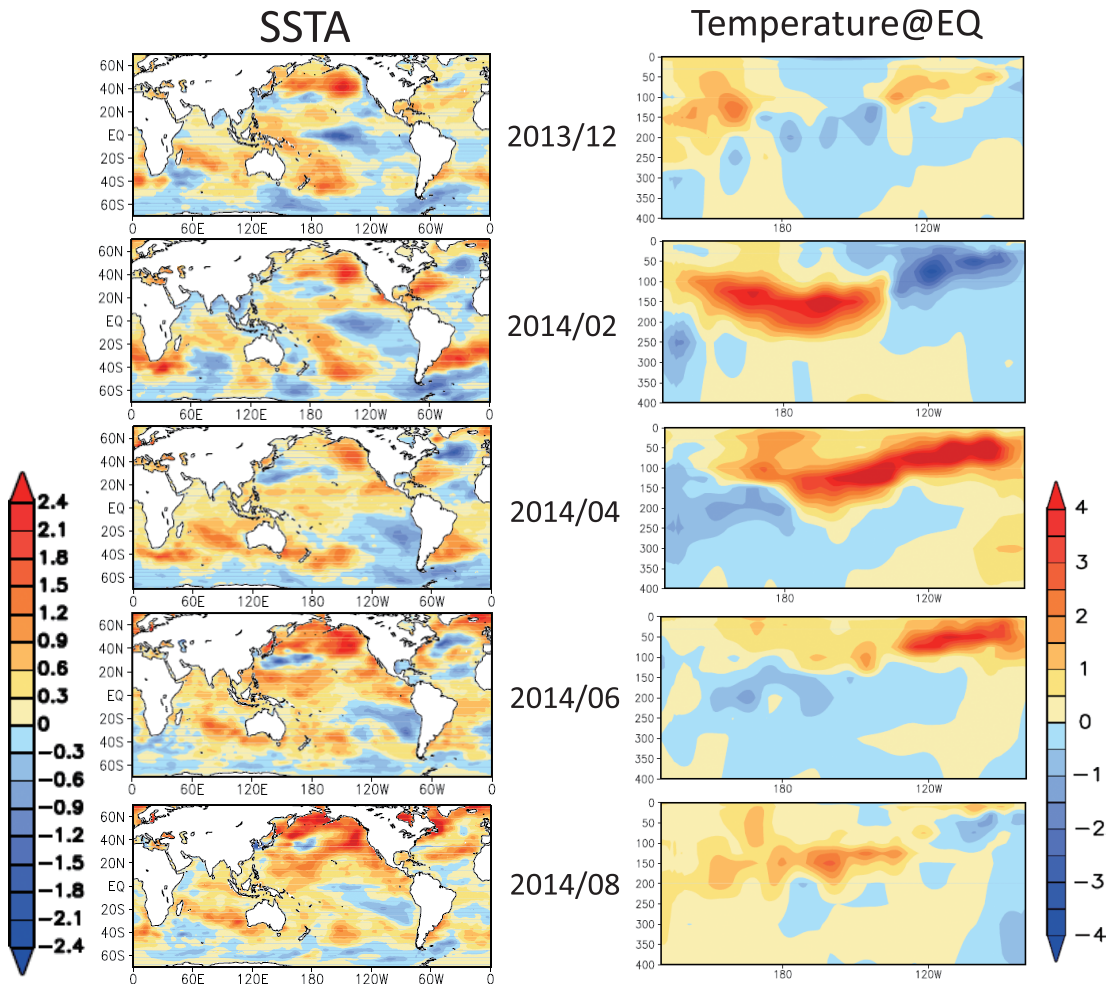
季節予測システムを活用したもう 1 つの研究成果として、これは個人的には一番気に入っている研究でもありますが、2014年の ENSO 事例を対象とした予測可能性研究があります. 2014年初頭に、熱帯域で強い西風バーストが観測されたことから、この時期を初期値として予測を行うと、その後夏にかけて史上最強レベルのエルニーニョが発達するという予測になり、多くの現業予報機関が大々的にこのことを報じました. しかし蓋を開けてみると、エルニーニョは発達せず



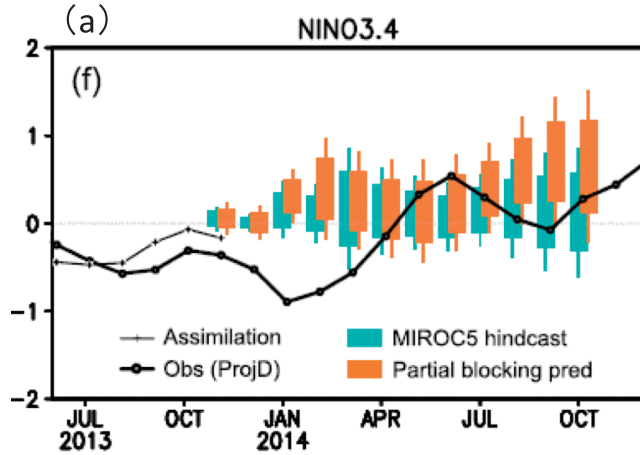
第 5 図 従来型エルニーニョ (左列) および新型エルニーニョ (右列) 発生時の海水温偏差のコンポジット. 上から、ProjD 海洋再解析 (Ishii and Kimoto 2009), 実験的事後季節予測システム SPAM による予測開始 1 か月後, 4 か月後, 7 か月後の予測値. 黒線は海水温 (気候値込み) のコンポジットを示す. Imada *et al.* (2015b) の Fig. 12を引用.

且ニュートラルに戻ってしまいます (Menkes *et al.* 2014; 前田ほか 2015; McPhaden 2015; Min *et al.* 2015). ENSO 予測の世界的な失敗は、ENSO 研究者にたたきつけられた大問題であり、研究コミュニティにも衝撃が走りました。海洋内部を見てみると、西部熱帯太平洋に形成された暖水がケルビン波によって東に伝搬してエルニーニョになろうとしますが、急にどこからか湧いて出た負の偏差によって壊されてしまう、という様相が見えてきます (第6図)。私たちの SPAM システムでは、前冬から予測を開始したケースにおいて、同様な特徴が見事に予測されていました (第7図)。1つでも予測が成功するケースがあればこちらのもの、予測の条件から重要と思われるものを

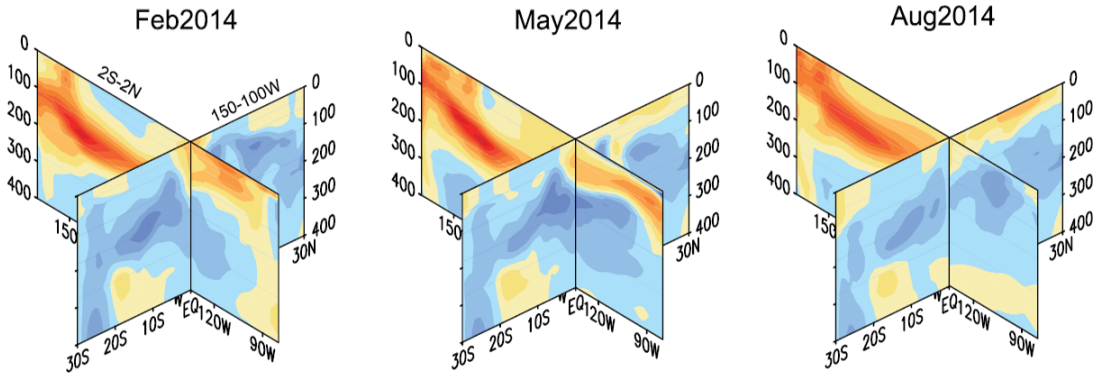
1つ1つ取り除いてみて、この現象の鍵となっていたプロセスが何だったのかを検証すれば良いわけです。海洋表層を南北断面で見ると、南半球から負の海水温偏差がゆっくりと熱帯へ伝搬してくるように見えましたので、この海洋シグナルを試しにシャットアウトする実験を行ってみると、これが見事に当たり、エルニーニョが発達するという結果となりました (第7図, Imada *et al.* 2016)。ここで着目した南からの移流というのは、熱帯太平洋の数十年規模変動を牛耳っているメカニズムの1つと考えられています。これは建部洋晶さんとの共同研究で明らかにしたのですが (Tatebe *et al.* 2013)、多くの気候モデルでは、南半球起源の十年規模変動メカニズムが過小評価されている



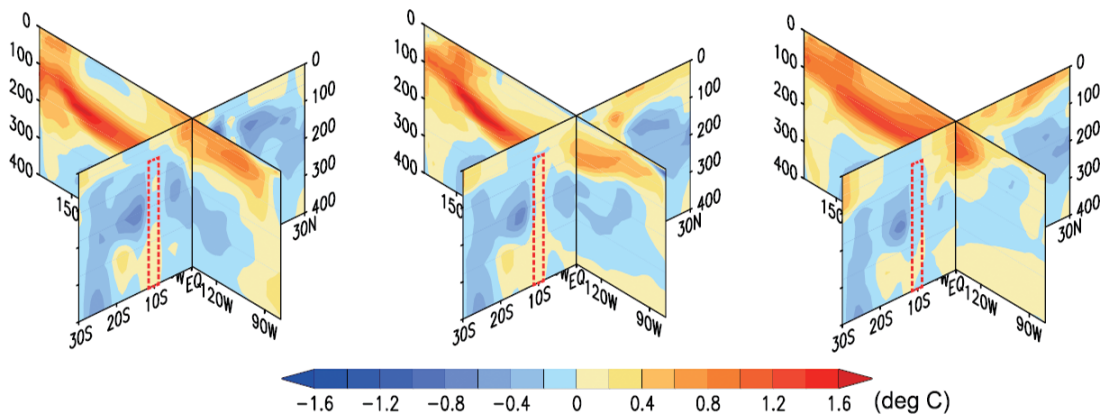
第6図 ProjD 海洋再解析プロダクト (Ishii and Kimoto 2009) を用いて描いた2013年12月から2014年8月にかけての海面水温偏差 (左) および赤道における海水温偏差の東西-深さ断面。



(b) ハインドキャスト



(c) 感度実験



第7図 (a) NINO3.4インデックス (170-120°W, 5°S-5°Nで平均した海面水温偏差) の時系列. 黒線は実測値 (Ishii and Kimoto (2009) による ProjD 海洋再解析), 灰色線は SPAM の同化実験 (初期値化実験) の結果, 緑は実験的事後季節予測システム SPAM による2013年11月1日開始の1年予測結果, 橙は南太平洋からの移流をブロックした SPAM の感度実験の結果. (b, c) 海水温偏差の東西-深さ断面 (2°S-2°N 平均) および南北-深さ断面 (150-100°W 平均). (b) は SPAM による2013年11月1日開始の事後季節予測実験の2014年2月, 5月, 8月の結果. (c) は南太平洋からの移流をブロックした SPAM の感度実験の結果. a は Imada *et al.* (2016) の Fig. 1 から抜粋. b および c は Imada *et al.* (2016) の Fig. 2 を引用.

可能性があると考えられます。そのようなモデルで予測を行うと、ゆっくりと移動するはずの偏差がその場にとどまっていられないため、年々変動スケールの赤道波となってあつという間に ENSO となってしまうと考えられます。この時は MIROC の結果しかありませんでしたが、その後、気象研究所に赴任することになり、複数のモデルを比較することのできる恵まれた環境に現在おりますので、この研究の続編を実施している最中です。

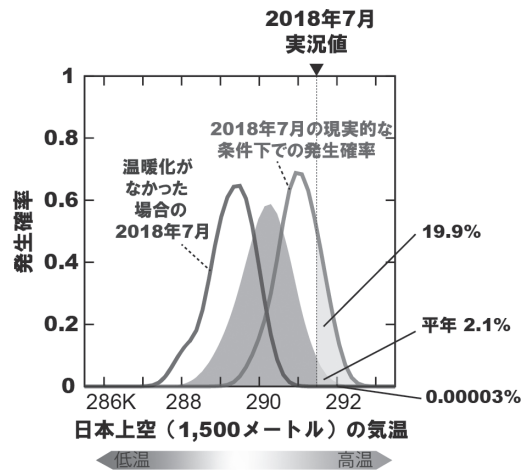
このような十年規模変動と、より時間スケールが短い現象との非線形な相互作用というのは、科学的に大変興味深い現象です。太平洋の十年規模変動の再現を得意とする MIROC を利用できたことが幸いして、ここに挙げた以外にも、ENSO や熱帯不安定波と太平洋十年規模変動との相互作用プロセスをより深く理解するための研究を、これまでいくつか行っています (Imada and Kimoto 2009; Imada *et al.* 2013b)。

### 3. イベント・アトリビューション

人生の転機が訪れたのは、オックスフォード大学に滞在されていた塩竈秀夫さんがイベント・アトリビューション (Stott 2016; Pall *et al.* 2011) を MIROC チームに手土産として持ち帰ってくださった時です。このころ、文部科学省の下で行われていた気候変動研究は革新プログラムが終了して創生プログラムに入っていました。その1つの目玉が、このイベント・アトリビューションでした。まず、MIROC-AGCM を用いてイベント・アトリビューションの練習をするところから始めましたが、創生プログラムが終わる頃に、石井正好さんを中心として、気象研究所と MIROC チームが総力を結集して「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (Database for Policy Decision making for Future climate change; d4PDF)」と呼ばれる大規模なアンサンブルデータベースを作り上げました (Mizuta *et al.* 2017; Shioyama *et al.* 2016)。d4PDF の気候シミュレーションは、気象研究所 (Meteorological Research Institute; MRI) が有する大気モデル MRI-AGCM3.2 と地域気候モデル NHRCM (Nonhydrostatic Regional Climate Model) を用いて実施されました。d4PDF は、イベント・アトリビューションだけでなく、将来予測も実施され、なおかつ NHRCM による日本域の力学的ダウンスケーリングまで施されているという、世界に類を見ないアンサンブルデータベースであり、現在では水災

害や農業分野などの応用分野まで広く利用されています。

イベント・アトリビューションでは、実際に発生した極端気象に対して数百から数千メンバーの大規模アンサンブル実験を実施し、その事象の発生確率を見積もります。これを温暖化あり・なしの条件下で実施することで、イベントの発生確率が温暖化によってどの程度変化しているかを定量化することができます。イベント・アトリビューションという言葉が広く知れ渡るようになったきっかけは、Pall *et al.* (2011) が Nature 誌に出版されたことです。この出版翌年から現在まで、我々のチームでは、毎年のように発生する異常気象に対してイベント・アトリビューションを実施してきました (Watanabe *et al.* 2013; Shioyama *et al.* 2013; Shioyama *et al.* 2014; Imada *et al.* 2013a; Imada *et al.* 2014; Imada *et al.* 2017; Imada *et al.* 2018; Takahashi *et al.* 2016; Takahashi *et al.* 2019; Imada *et al.* 2019; Kawase *et al.* 2020)。それらの成果の多くは、アメリカ気象学会が発行する学術誌 BAMS (Bulletin of the American Meteorological Society) の中で毎年特集される異常気象シリーズにも取り上げられています。2018年(平成30年)7月の日本の猛暑についてイベント・アトリビューションを実施した例で



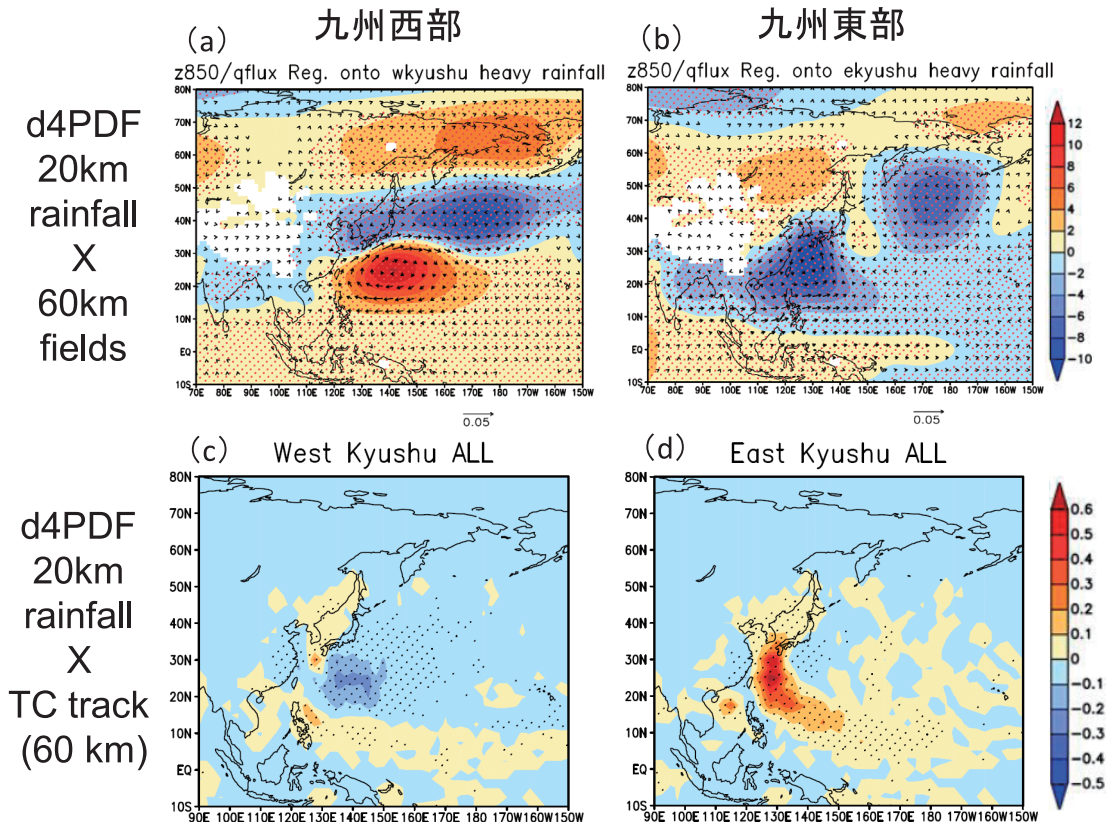
第8図 2018年7月の850hPa面における日本域の気温の確率密度分布。薄線は2018年7月の条件で計算した100メンバーの実験、濃線は2018年7月の条件から温暖化の影響を除去した100メンバーの実験、陰影は過去30年(1981-2010年)すべての実験結果(3000メンバー)から描いたもの。今田(2019)に掲載された図を改変。



は、温暖化なしの条件下では発生確率はほぼゼロ、つまり、温暖化の影響がなければこのイベントは起こり得なかったという結果が得られました(第8図, Imada *et al.* 2019). 裏を返すと、かつての気候では経験し得なかった未知の現象が起こり出しているということであり、この衝撃的なメッセージはメディアなどでも大きく取り上げられました.

高解像度と大規模アンサンブルの両方を兼ね備えた世界に類を見ない d4PDF の利点を生かした研究として近年私が注目しているのが、d4PDF の AGCM の出力と NHRCM の出力を組み合わせることで、地域的な現象に対する温暖化の寄与の理解を深めることができるという点です. これまでの AGCM を使ったイベント・アトリビューションでは、解像度が粗すぎるため

に、日本の皆さんが一番知りたい梅雨期の豪雨を対象とすることが困難でした (Imada *et al.* 2013a). 転機が訪れたのは、気象研究所に同期として配属になった川瀬宏明さんとの出会いです. これまで触れたことのなかった地域気候モデルのシミュレーション結果から、九州のローカルな大雨頻度を指標化したデータを作って頂いて、AGCM の出力と組み合わせることにより、第9図のような図を描くことができました. 解像度20km の NHRCM において、その計算領域内の一部の地域で大雨が発生しているときに、その領域の外側を計算する AGCM ではどのような場が形成されているのか、という相関関係を図示したのようになりますが、日本の急峻な地形によって、九州の西と東では豪雨の原因が異なっている、という様子が両モデルの組



第9図 九州西部および九州東部において7月に日降水量が100mm/dayを超える延べ日数(d4PDFのNHRCMの結果)をインデックスとして、循環場や台風密度との回帰係数を計算したもの。(a, b): d4PDFのAGCMで計算された850hPa高度(陰影, m)および鉛直積算水蒸気フラックス(ベクトル,  $\text{kg kg}^{-1}\text{m s}^{-1}$ ), (c, d): d4PDFのAGCMの結果から抽出された熱帯低気圧のトラックに基づく台風の存在密度(個/月). aおよびcは九州西部の結果, bおよびdは九州東部の結果. d4PDFの過去再現実験の1981年から2010年の100メンバーのアンサンブル計算の結果(3000メンバー)を利用した. ドットの領域は統計的に有意な値を示す.

み合わせできちんと再現されていることが分かります (Kawase *et al.* 2019). この図を最初に見た時に、日本の大雨のイベント・アトリビューションは実現可能だと確信しました。九州の西部では、南西風が九州山地の山肌に当たって水蒸気を落とすことで豪雨となることが経験的にも知られています。このようなプロセスには温暖化による水蒸気増加が直接的に効くため、温暖化による豪雨増加のシグナルが検出しやすいという特徴があります。一方、九州東部では、台風起因の豪雨が多くを占めるので、台風自体が来るか来ないかが重要となりますが、解像度60kmのAGCMが台風の発生段階のシミュレーションを担っていることもあり、不確実性が大きく、差を見出すことは難しくなります。現在、温暖化研究プログラムは創生プログラムの後継の統合プログラムに入っておりますが、このブレークスルーが統合プログラムの目玉の1つになるだろうと期待しながら、近年の豪雨イベントの解析を進めております。

社会への情報発信という側面では、個々の極端現象に対する地球温暖化の影響を具体的な数値で示すことができるイベント・アトリビューションは、メッセージ性が高く大変重宝されます。また、サイエンスの側面から見ても、大規模アンサンブル実験は様々な使い道があります。例えば、アンサンブル平均を取ると、これまでノイズに埋もれて知られていなかった意味のある強制応答のシグナルを抽出することができるかもしれません。第9図で、ローカルな大雨と総観スケールの循環場との間に有意な関係を見出すことができたのも、大雨頻度の経年変化に意味のあるシグナルを見出すことができたおかげです。大規模アンサンブルは国際コミュニティにおいても注目度が高まっており、今後もこういった視点の研究を広く展開していきたいと考えております。

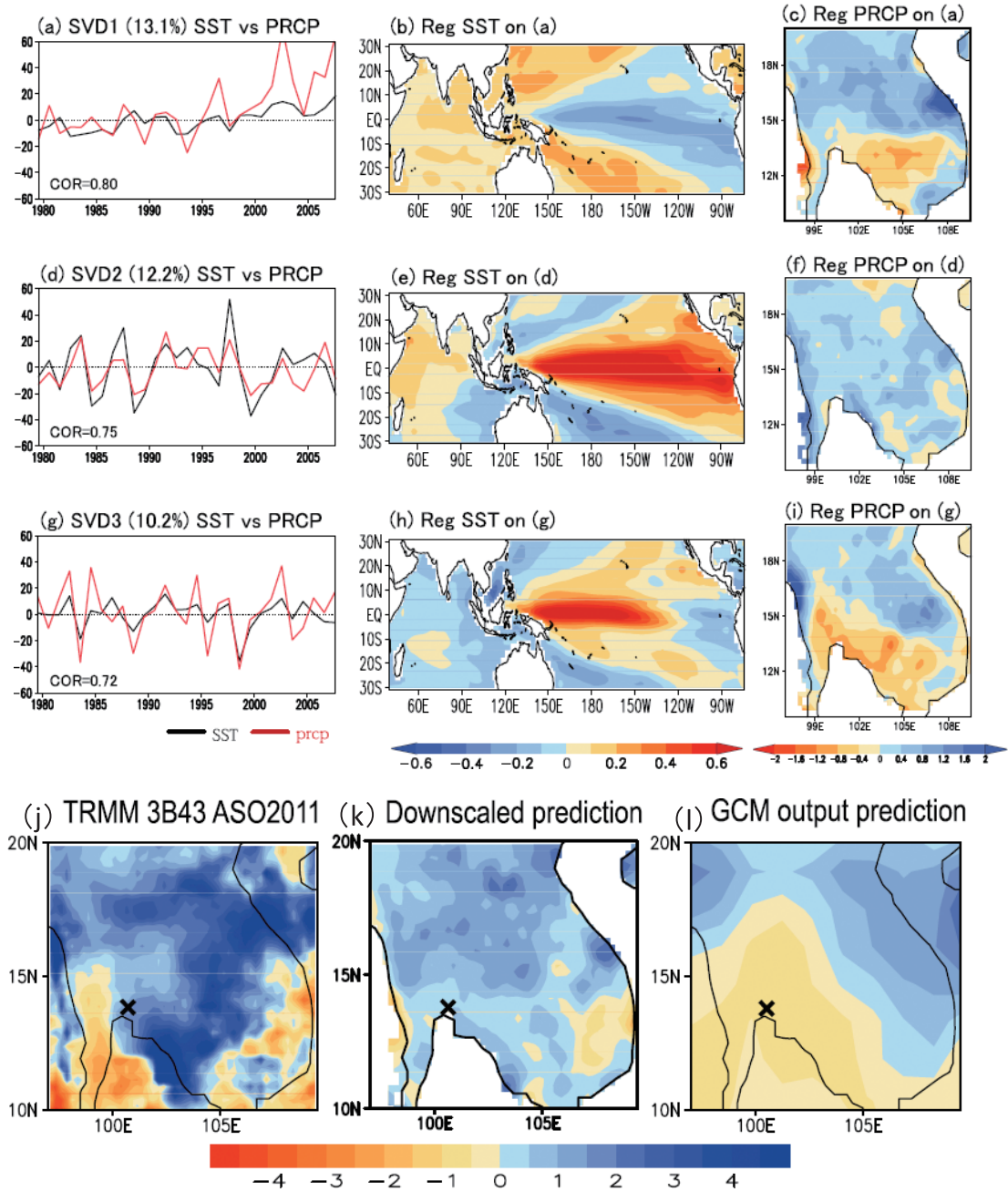
#### 4. 水文学分野との融合的研究

最後に、時系列としては前後してしまいますが、東京工業大学の鼎 信次郎先生のもとで研究員をしていた際の成果について紹介させていただきたいと思えます。学生時代から優秀な先輩や同僚に囲まれて研究してきましたので、同じことをやっている日は目を見ることは難しく、何かオリジナリティのあるスキルを身に付けなくてはならない、という思いから、武者修行の場を求めて工学系の水文学の分野に飛び込みました。もともとMIROCチームは水文学の沖 大幹先生

の研究室の方々と交流がありましたので、学生時代のつてを辿って鼎先生の研究室に雇って頂くことになりました。理学系と工学系では文化が全く異なることは覚悟していましたが、着任してまず戸惑ったのは、研究のモチベーションにおけるギャップでした。こちらは物事がなぜそうなっているのかを明らかにすることが目的ですが、工学の分野では物事を達成するための成果物を作り上げることが目的ですので、私がセミナー発表などをすると、「何のためにその研究をしているのですか」と聞かれてしまいますし、同僚の発表を聞くと、私の方はつつい「なぜそうなるのですか?」と理由を追究したくなります。この噛み合わない状況が愉快でもありました。

第10図は、鼎研究室在籍時に得られた成果の一例ですが、兼ねてより従事していた季節予測計算のプロダクトを統計的にダウンスケーリングして、気候モデルでは解像できないようなインドシナ半島のローカルな大雨のポテンシャル予測に役立てたものです (Imada *et al.* 2015a)。予測プロダクトということで成果物ははっきりしていますし、熱帯海洋がインドシナ半島に影響を与えるプロセスに則って統計関係を導きましたので、物理メカニズムにも根差した研究ということで、両分野の要求に応えるような研究ができたと思っています。また、水文学分野の優秀な学生さん達と共に、イベント・アトリビューションを応用分野に拡張する試みも行いました。洪水リスクなどを研究する上で、大規模アンサンブルデータは非常に有効です。この取組みによって洪水リスクに繋がる応用研究を実現することができ、その学生さん達は見事に土木学会の賞を受賞されました (浜口ほか 2014; 木村ほか 2016)。気象学で着手したばかりのイベント・アトリビューション研究を早い段階で橋渡したことで、土木分野でも先駆的な研究を行うことができたという点で、融合研究がうまく行った例だと思えます。

当時は、分野の壁を超えた融合研究を促進する動きが盛んになって来た頃でした。鼎先生は常々、結果を見せ合うだけでは融合研究は一向に進まない、進めるためには人を交換することが一番手取り早い、ということをおっしゃっていましたが、まさしくそのことを身を持って実感することとなりました。また、工学系の研究室は会社のように組織体制が整っていますので、マネージメントや予算獲得のノウハウもこの短期間に少なからず身に付けることができました。1年半程度の短い年月ではありましたが、得られた経験は想



第10図 (a-i) 特異値分解解析 (SVD) で抽出された熱帯インド洋から熱帯太平洋にかけての海面水温とインドシナ半島の雨季 (8~10月) の降水量との統計関係. 上から第1・第2・第3モード. a, d, gは海面水温 (黒線) および降水量 (赤線) の拡張係数, b, e, hはSSTの各拡張係数に回帰した海面水温のパターン, c, f, iは降水量の各拡張係数に回帰した降水量のパターン. Imada *et al.* (2015a) の Fig. 5を引用. (j-l) 2011年8~10月の降水量偏差. jはTRMM複合プロダクト2 (3B43)の結果, kはSPAMの予測値 (2011年8月1日開始の予測) にSVDによる統計的ダウンスケーリングを適用した結果, lはSPAMによる予測値そのもの. Imada *et al.* (2015a) の Fig. 6から抜粋.

像以上に貴重でした。一時は、水文学の分野で気象学を融合した新しい分野を築くことをキャリアプランとして思い描いたこともありましたが、さまざまな人生の巡り合わせで、現在は予測可能性研究やイベント・アトリビューション研究に勤しんでおります。融合研究はどこにいても可能ですので、この野望は今でも持ち続けています。一度外から気象学を眺めた経験は確実に私の研究の糧となっていると感じております。

## 謝 辞

冒頭にも述べた通り、ここに至るまでに大変多くの素晴らしい方々との巡り会いがありました。高校時代に私の物理学への扉を開いてくださった恩師の原田啓一先生は、私が大学進学のために東京に発つ際に、「人との出会いを大切にしてください」という御言葉を贈ってくださいました。この御言葉は、今でも私の座右の銘となっております。まさしく、研究業界に入って得られた最も貴重なものは、尊敬する多くの方々との出会いでした。この場を借りて心より厚く御礼申し上げます。

まず、東京大学の学部生の頃から現在に至るまでご指導いただいた恩師である木本昌秀教授には、気候力学研究・気候モデリングを基礎から叩き込んでいただいたのはもちろんのこと、研究者としての在り方、気候モデルを武器として研究する者の心得、キャリアの築き方、研究の域を超えたプロとしての生き方など、私の半生に大きな影響を与えてくださった人物であることは間違いありません。また、木本研究室の先輩であり、現在も同じ研究プログラムで研究させていただいている渡部雅浩さんは、我々世代のお手本であり、行き詰った際には常に的確なアドバイスをくださり、研究の組み立て方、リーダーとしての振舞い、若手の指導の仕方など、その背中から常に学ばせて頂いております。私の予測可能性研究はこのお二方の存在なしでは完成しませんでした。

私が異常気象研究に踏み込むきっかけを与えてくださった国立環境研究所の塩竈秀夫さんは、私の研究キャリアに大きな影響を与えてくださった方です。また、それまで熱帯の結合系マニアだった私が、異常気象研究をきっかけに慣れない東アジアや中高緯度の気候を研究することになり戸惑っていた折に手を差し伸べてくださったのが、当時の直属の上司でいらっしゃる前田修平さんです。日本の気候にまつわる無限の知識とアイデアを惜しみなく伝授して頂き、刺激的で楽しい研究生活を送ることができました。

東京工業大学在籍時、畑違いの私を快く導き入れてくださった鼎 信次郎先生には、水文学の考え方から工学系ならではのプロジェクト研究、また研究室の運営の仕方まで多くのことを学ばせて頂き、気象学の分野とは全く文化の異なる環境で大変有意義な修行をさせて頂きました。この時の経験によって、自分自身の研究にオリジナリティを見出すことができました。

ここまでにお名前を出せなかった非常に多くの方々の支えがなければ、正野賞という栄誉を賜ることはありませんでした。旧 CCSR の住 明正センター長をはじめとする先生方、先輩方、同期の皆さん、後輩達、鼎研究室の皆さん、革新・創生・統合プログラムで御一緒した皆様、気象研究所の旧気候研究部の皆様、現気候・環境研究部の皆様、ENSO グループの皆さん、一人一人にここで御礼を申し上げることはできませんが、すべての皆様に心より感謝申し上げます。

最後に、常に私の研究活動に理解を示しサポートしてくれる両親とお義父様お義母様、良き協力者でありライバルでもある夫、母親の度々の不在に耐えながら健全にすくすくと育ててくれている子供たちに感謝の意を表しまして、結びの言葉とさせていただきます。

## 参 考 文 献

- An, S.-I., 2008: Interannual variations of the tropical ocean instability wave and ENSO. *J. Climate*, **21**, 3680-3686.
- An, S.-I. and F.-F. Jin, 2004: Nonlinearity and asymmetry of ENSO. *J. Climate*, **17**, 2399-2412.
- Bjerknes, J., 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, **97**, 163-172.
- Burgers, G. and D. B. Stephenson, 1999: The "normality" of El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 1027-1030.
- 浜口耕平, 今田由紀子, 塩竈秀夫, 鼎 信次郎, 2014: Event Attribution 実験を用いた2010年パキスタン豪雨の要因特定とプロセスの理解. *土木学会論文集 B1(水工学)*, **70**, I\_565-I\_570.
- 今田由紀子, 2019: 温暖化がなければ2018年の猛暑はなかった. *科学*, **89**, 651-659.
- Imada, Y. and M. Kimoto, 2006: Improvement of thermocline structure that affect ENSO performance in a coupled GCM. *SOLA*, **2**, 164-167.
- Imada, Y. and M. Kimoto, 2009: ENSO amplitude modulation related to Pacific decadal variability. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L03706, doi:10.1029/2008GL036421.
- Imada, Y. and M. Kimoto, 2012: Parameterization of tropical instability waves and examination of their impact

- on ENSO characteristics. *J. Climate*, **25**, 4568–4581.
- Imada, Y., M. Kimoto and X. Chen, 2012: Impact of atmospheric mean state on tropical instability wave activity. *J. Climate*, **25**, 2341–2355.
- Imada, Y., H. Shiogama, M. Watanabe, M. Mori, M. Kimoto and M. Ishii, 2013a: Contribution of atmospheric circulation change to the 2012 heavy rainfall in southern Japan. Explaining extreme events of 2012 from a climate perspective (T. C. Peterson *et al.* eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, S52–S54.
- Imada, Y., H. Tatebe, Y. Komuro and M. Kimoto, 2013b: Multi-decadal modulation of tropical Pacific instability wave activity since the middle of the twentieth century. *SOLA*, **9**, 102–105.
- Imada, Y., H. Shiogama, M. Watanabe, M. Mori, M. Kimoto and M. Ishii, 2014: The contribution of anthropogenic forcing to the Japanese heat waves of 2013. Explaining extreme events of 2013 from a climate perspective (S. C. Herring *et al.* eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **95**, S52–S54.
- Imada, Y., S. Kanae, M. Kimoto, M. Watanabe and M. Ishii, 2015a: Predictability of persistent Thailand rainfall during the mature monsoon season in 2011 using statistical downscaling of CGCM seasonal prediction. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1166–1178.
- Imada, Y., H. Tatebe, M. Ishii, Y. Chikamoto, M. Mori, M. Arai, M. Watanabe and M. Kimoto, 2015b: Predictability of two types of El Niño assessed using an extended seasonal prediction system by MIROC. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 4597–4617.
- Imada, Y., H. Tatebe, M. Watanabe, M. Ishii and M. Kimoto, 2016: South Pacific influence on the termination of El Niño in 2014. *Sci. Rep.*, **6**, 30341, doi:10.1038/srep30341.
- Imada, Y., S. Maeda, M. Watanabe, H. Shiogama, R. Mizuta, M. Ishii and M. Kimoto, 2017: Recent enhanced seasonal temperature contrast in Japan from large ensemble high-resolution climate simulations. *Atmosphere*, **8**, 57, doi:10.3390/atmos8030057.
- Imada, Y., H. Shiogama, C. Takahashi, M. Watanabe, S. Maeda, M. Mori and Y. Kamae, 2018: Climate change increased the likelihood of the 2016 heat extremes in Asia. Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective (S. C. Herring *et al.* eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, S97–S101.
- Imada, Y., M. Watanabe, H. Kawase, H. Shiogama and M. Arai, 2019: The July 2018 high temperature event in Japan could not have happened without human-induced global warming. *SOLA*, **15A**, 8–12.
- Ishii, M. and M. Kimoto, 2009: Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections. *J. Oceanogr.*, **65**, 287–299.
- Kawase, H., Y. Imada, H. Sasaki, T. Nakaegawa, A. Murata, M. Nosaka and I. Takayabu, 2019: Contribution of historical global warming to local-scale heavy precipitation in western Japan estimated by large ensemble high-resolution simulations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **12**, 6093–6103.
- Kawase, H., Y. Imada, H. Tsuguti, T. Nakaegawa, S. Naoko, A. Murata and I. Takayabu, 2020: The heavy rain event of July 2018 in Japan enhanced by historical warming. Explaining extreme events of 2018 from a climate perspective (S. C. Herring *et al.* eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **101**, S109–S114.
- 木村雄貴, 田上雅浩, 今田由紀子, 平林由希子, 2016: Event Attribution 実験を用いた2012年アマゾン川洪水の要因分析. 土木学会論文集G (環境), **72**, I\_1–I\_6.
- Kug, J.-S., F.-F. Jin and S.-I. An, 2009: Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño. *J. Climate*, **22**, 1499–1515.
- 前田修平ほか, 2015: 研究会「長期予報と大気大循環」の報告 ENSO とその影響～我々はどこまで理解し、予測できているのか?～. 天気, **62**, 225–228.
- McPhaden, M. J., 2015: Playing hide and seek with El Niño. *Nature Clim. Change*, **5**, 791–795.
- Mellor, G. L. and T. Yamada, 1982: Development of a turbulent closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys.*, **20**, 851–875.
- Menkes, C. E., M. Lengaigne, J. Vialard, M. Puy, P. Marchesiello, S. Cravatte and G. Cambon, 2014: About the role of westerly wind events in the possible development of an El Niño in 2014. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 6476–6483.
- Min, Q., J. Su, R. Zhang and X. Rong, 2015: What hindered the El Niño pattern in 2014? *Geophys. Res. Lett.*, **42**, doi:10.1002/2015GL064899.
- Mizuta, R. *et al.*, 2017: Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60km global and 20km regional atmospheric models. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **98**, 1383–1398.
- Noh, Y. and H. J. Kim, 1999: Simulations of temperature and turbulence structure of the oceanic boundary layer with the improved near-surface process. *J. Geophys. Res. Oceans*, **104**, 15621–15634.
- Pall, P., T. Aina, D. A. Stone, P. A. Stott, T. Nozawa, A. G. J. Hilberts, D. Lohmann and M. R. Allen, 2011: Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, **470**, 382–

- 386.
- Shiogama, H., M. Watanabe, Y. Imada, M. Mori, M. Ishii and M. Kimoto, 2013: An event attribution of the 2010 drought in the southern Amazon region using the MIROC5 model. *Atmos. Sci. Lett.*, **14**, 170–175.
- Shiogama, H., M. Watanabe, Y. Imada, M. Mori, Y. Kamae, M. Ishii and M. Kimoto, 2014: Attribution of the June–July 2013 heat wave in the Southwestern United States. *SOLA*, **10**, 122–126.
- Shiogama, H. *et al.*, 2016: Attributing historical changes in probabilities of record-breaking daily temperature and precipitation extreme events. *SOLA*, **12**, 225–231.
- Stott, P. A., 2016: Attribution of extreme weather and climate-related events. *WIREs Clim. Chang.*, **7**, 23–41.
- Takahashi, C., M. Watanabe, H. Shiogama, Y. Imada and M. Mori, 2016: A persistent Japanese heat wave in early August 2015: roles of natural variability and human-induced warming. Explaining extreme events of 2015 from a climate perspective (S. C. Herring *et al.* eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, S107–S112.
- Takahashi, C., M. Arai, M. Watanabe, H. Shiogama, Y. Imada, Y. Kosaka, M. Mori and Y. Kamae, 2019: The effects of natural variability and climate change on the record low sunshine over Japan during August 2017. Explaining extreme events of 2017 from a climate perspective (S. C. Herring *et al.* eds.), *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, S67–S71.
- Tatebe, H., Y. Imada, M. Mori, M. Kimoto and H. Hasumi, 2013: Control of decadal and bidecadal climate variability in the tropical Pacific by the off-equatorial South Pacific Ocean. *J. Climate*, **26**, 6524–6534.
- Watanabe, M., M. Chikira, Y. Imada and M. Kimoto, 2011: Convective control of ENSO simulated in MIROC. *J. Climate*, **24**, 543–562.
- Watanabe, M., H. Shiogama, Y. Imada, M. Mori, M. Ishii and M. Kimoto, 2013: Event attribution of the August 2010 Russian heat wave. *SOLA*, **9**, 64–67.

---

## Studies on predictability of short-term climate variability and extreme event attribution by GCM

Yukiko IMADA\*

\* *Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, 1-1, Nagamine, Tsukuba, Ibaraki 305-0052, Japan*

*Email: yimada@mri-jma.go.jp*

(Received 10 September 2020; Accepted 11 November 2020)

---