

CLIVAR ENSO ワークショップ参加報告

渡部 雅浩*・今田 由紀子**

1. はじめに

2010年11月17～19日の3日間、CLIVAR (Climate Variability and Predictability Project；気候変動及び予測可能性研究計画)の「気候モデルにおける ENSO プロセス評価の新しい戦略」と題するワークショップがパリ大学で行われた。招待講演を行う年長研究者と、あらかじめ審査を受けた若手研究者(大学院生を含む)から構成される参加者50名ほどの比較的小規模な会合であったが、ENSO 研究に関する新旧世代が一堂に会するなかなか珍しい機会であり、ENSO 研究の最前線を紹介する意味でも有意義と考えたため、本稿で簡単に報告したい。

このワークショップは、Eric Guilyardi (IPSL) をはじめとする CLIVAR 太平洋パネルのメンバー数名が以前から話し合っただけで開催の段取りを組んできたもので、会合に先立って現時点での ENSO の主にモデリングの側面がレビュー論文として発表されている (Collins *et al.* 2010)、CMIP5 および IPCC AR5 を見据えて、今後数年間で利用可能になるであろう新しい GCM の計算結果をどう解析すべきか、将来の熱帯気候および ENSO の変化を評価する上でどういったメトリック (指標) が有効か、また広い視野でどのような課題がこれからの ENSO 研究に重要であるか、などを議論し、国際的なコンセンサスを得ることが主な目的であった。

2. ENSO の観測・理論・モデリングに関するレビュー

初日の午前中は、1980年代の ENSO 研究第一人者らによるレビューが行われた。特に、ENSO のもっとも基本的な理論が発表された1990年頃からの約20年で、何が進展したのかに重点が置かれた。いわゆる遅延振動子理論 (delayed oscillator; Battisti and Hirst 1989) の提唱者である David Battisti (ワシントン大学) は、熱帯大気海洋系の固有モード (あるいは non-normal モード) としての ENSO の本質を強調しつつも、遅延振動子や再充填振動子 (recharge oscillator; Jin 1997) といった低自由度の「おもちゃ」モデルはその役目を終えたという見解を述べた。これらのモデルは ENSO の本質のみを残すために現実の ENSO にとって重要であるはずのさまざまな要素を考慮していないという点で、参加者の多くはその見解に異論を示さなかったが、「おもちゃ」の対極にあるのが IPCC クラスの GCM であるならば Cane-Zebiak (CZ) モデルは「おもちゃ」モデルではないのか、などモデルの階層性について議論が生じた。続いて、ENSO の観測面でのレビューを熱帯大気海洋系の観測網 TOGA/TAO の立役者である Mike McPhaden (NOAA/PMEL) が行った。最近までの観測から、2000年以降の熱帯平均場の変化は AR4 が取り上げている将来気候の変化傾向 (貿易風の弱化、赤道中東部太平洋でのより大きな昇温など) と逆であることを指摘した。同様の10年規模の変動は Scot Power (BMRC) によっても報告され、さらに氷期 - 間氷期といったより長い時間スケールでの ENSO 指標の復元を紹介した Pascale Braconnot (IPSL) からは、氷期 - 間氷期で ENSO の強さは変わっていること、完新世中期の熱帯平均状態はラニーニャ的であり、同時に ENSO は弱かったこと、それ

* Masahiro WATANABE, 東京大学大気海洋研究所。

** Yukiko IMADA, 東京大学大気海洋研究所。

© 2011 日本気象学会

が現在の間氷期に入って強まってきたことなど (Tudhope *et al.* 2001など) が示された。20世紀の観測データのみで ENSO の長期的な変化を議論するのは困難で、今後は古気候指標の活用が重要であるというのが参加者の共通認識である。現在進行中の PMIP3 は CMIP5 とリンクしており、過去1000年の再現実験なども計画されているので、ENSO と古気候の研究連携が強まることを期待したい。

世界で初めての ENSO のシミュレーション (Zebiak and Cane 1987) 以来、現在までに何が進展したのかがセッションを通じて議論された。まとめると、蓄積された観測データの解析およびそれで駆動した GCM から ENSO の基本的な力学過程 (海洋上層場の力学的調節や Bjerknes フィードバック) が確認できたこと、予報を通じて ENSO の力学の妥当性が検証されてきたこと、大気ノイズ (MJO や西風バーストのような短周期変動) および大気海洋系の非線形性の役割に関する議論がすすんだこと、などである。一方で、このセッションで最後に Mat Collins (エクセター大学) がレビューした通り、近年の複雑な GCM による多数の ENSO シミュレーションは様々な知見をもたらしたものの、多くのモデルで現実的な ENSO の特徴 (周期, 振幅, 空間構造, 位相固定, 非対称性) が未だに再現できないことも事実である。したがって、ENSO の基本的な力学を理解できなくても、ENSO や熱帯大気海洋系に関する我々の理解がどこか不足していることは共通認識とすべきであり、気候変化と ENSO の関係について統一的な結論を得るには CZ モデルに代わり GCM の食い違いを理解するのに役立つ ENMIC (ENSO model with intermediate complexity; 中程度に複雑な ENSO のモデル) が必要である。

3. GCM における ENSO

初日午後から2日目まで、GCM における ENSO という本ワークショップの中心的なテーマで講演と議論が展開された。各国の気候モデラーによる ENSO のシミュレーションと力学が主な講演であったが、冒頭で Fei-Fei Jin (ハワイ大学) が、ENSO の複雑さの力学についてレビューと最新の仮説を紹介した。彼は再充填振動子理論の発表以来、ENSO の理論的研究の中核にいる研究者だが、近年では我々のような GCM グループと協力して、理論にもとづく複雑な系における ENSO プロセスの評価に積極的に取り組ん

でいる。特に、SST 方程式にもとづいてモデル出力から ENSO の各種フィードバックを単一の軸上で評価する BJ インデックスの提唱 (Jin *et al.* 2006) は、今後の有用な ENSO メトリックとして期待できる。また、最近注目されている2つのタイプのエルニーニョ (4節を参照) について、現実の大気海洋系がそれらの出現に対して臨界点近傍にいるという魅力的な仮説を唱えた (ちなみに、これは我々との共同研究として進められている)。ENSO の理論的側面としてはもう一人、Fedorov and Philander (2001) の論文で知名度の高い Alexey Fedorov (エール大学) の講演もあった。Fedorov は海洋上層400 m までの有効位置エネルギーが ENSO の振幅に対するメトリックになり得ることを示した。これに対し、エネルギー方程式と SST 方程式の違いはあるが Jin の BJ インデックスとの各項の対応づけが可能ではないかというコメントがあった。今後、そうした考察が期待されるところである。

本ワークショップには、世界の主要な GCM グループにおけるモデル開発者あるいはそれに近い立場からの参加があり、それぞれ新しいモデルの改良や ENSO シミュレーションについて講演が行われた。Eric Guilyardi は、IPSL モデルをはじめとする欧州の複数の GCM を用いて行ってきた自らの ENSO 研究をまとめて紹介した。単一の OGCM に異なる AGCM を結合した場合に ENSO のふるまいが大きく異なること、IPSL の気候モデルに2種類の積雲スキームを実装したところ ENSO が片方では消えてしまったこと、CMIP3 における ENSO のばらつきなど、彼のここ数年の研究成果はどれも重要なものである (詳しくは Guilyardi *et al.* 2009 を参照)。

Andrew Wittenberg (GFDL) は、IPCC AR4 でしばしば最良のモデルと評価される GFDL CM2.1 を用いた4000年コントロール実験における ENSO のふるまい (Wittenberg 2009) について報告した。単一の実験にもかかわらず、これだけの長期ランを行うと ENSO のさまざまな側面が自発的に変化し、観測される10年規模の変化などがあるセグメントではよく再現される。この結果は、観測データでモデルの ENSO を規定するのが困難であるという悲観的な見方を提供する一方、モデル内の ENSO のふるまいが想像以上に豊かであることを示しており、各所で引用されている。

渡部 (東京大学) は、MIROC グループのモデル開

発と最新版 MIROC5における ENSO のふるまい (Watanabe *et al.* 2011) を紹介した。MIROC5標準実験で ENSO が大きく改善したことは既にあちこちで宣伝しているが、ここでは積雲スキームのエントレインメントに対するわずかな摂動が ENSO の振幅を大きく変えるメカニズムについて報告し、各国の GCM でも同様のパラメータ摂動実験を行い、CMIP3 のような構造的な違いではなくパラメトリックな違いを定量化することの重要性を主張した。実際、我々と共同研究を始めている Jon-Seong Kug (KORDI) は、GFDL CM2.1で似た性質をもつ積雲パラメータを変化させ、ある部分(平均場 - ENSO の関係)は MIROC5と一致するが、別の部分は一致しないことを示した。このような比較が CMIP3 に対して優れているのは、特定のプロセス(ここでは積雲対流)に起因する変化であることが分かっている点であり、したがって不一致があることは、GCM 間のばらつきを理解する鍵がそこにあると考えて喜ぶべきであろう。

Rich Neale と Sam Stevenson (NCAR) は、米国のコミュニティ気候モデル CCSM の新バージョンである CCSM4 と、新しく開発された地球システムモデル CESM1 のパフォーマンスを紹介した。CCSM4 では主に積雲対流の扱いを変更することで ENSO や MJO のふるまいがより現実的になっており (Neale *et al.* 2008)、CESM1 はエアロゾルや雲物理過程を新たなスキームで表現している点で MIROC5 に近い抜本的なモデルの変更が加えられているが、その分 20 世紀の気温上昇トレンドを過小評価するなどの問題が残っているようである。CCSM4 の ENSO はかなり観測される特徴に近い印象を受けたが、モデルの改良は ENSO だけでなく平均場も西風バーストも同時に変えてしまうため、ENSO プロセスの理解にはぜひパラメータ実験やモデル比較などをすすめて欲しいものである。

Sarah Ineson (ハドレーセンター) は、英国の気候モデル HadGEM の進展について、特にモデル解像度のインパクトに重点を置いた報告を行った。ハドレーセンターのモデルグループでは、数段階の解像度の気候モデルと海洋モデルをクロスカップルした 5 種類の結合モデルの結果を比較するという興味深いアプローチを行っている。高解像度海洋モデルは熱帯不安定波 (TIW) 等の擾乱の再現を通して平均場の成層や ENSO の空間パターンを改善するのに対し、高解像度気候モデルは ENSO 周期の改善に効果的であると

いう結果を紹介した (Shaffrey *et al.* 2009 など)。同様の実験が MIROC グループでも実施されており、解像度間比較とモデル間比較を統合することで ENSO に与える影響の要因を切り分けるという試みが共同研究として始まっている。

GCM を用いた ENSO 研究として異色だったのは、Ben Kirtman (マイアミ大学) による interactive ensemble (以下 IE) の研究例紹介である。IE とは、一つの GCM 内で複数の AGCM を走らせ、個々の AGCM は同じ OGCM から海面水温などを受け取る一方、OGCM は AGCM のアンサンブル平均量を得ることで、大気ノイズを除去した結合積分を可能にする方法である (Kirtman and Shukla 2002 など)。これにより、例えば ENSO の分散が大気ノイズによりどの程度増幅するか、などの知見が得られる。ENSO 力学においてノイズをどう理解するかは本ワークショップの論点の一つであり、Kirtman の講演は具体的な結果を紹介できる点で興味深かった。ただし、ノイズをあたかも外部パラメータのように扱うことでモデルバイアスを低減するといった提案には賛否あろう。

4. ENSO メトリック

本ワークショップでは、CMIP3 および CMIP5 における ENSO とその将来変化をどのように解析・評価するかが重要なテーマの一つであった。前述した Fei-Fei Jin による BJ インデックスは既に主流となりつつあり、3 日間の発表の中でも度々取り上げられていたが、このセッションでは他にもアイデア溢れる数々のメトリックが提唱された。

Antonietta Capotondi (NOAA/ESRL) は、CMIP3 の結果から、ENSO の周期が、ENSO に回帰した東西風応力偏差の分布の南北幅と中心位置の両方に強く依存していることを示し、それらを線形結合した新しい指標を提唱した。このインデックスを用いて ENSO 周期との関係をプロットすると各モデルの結果は見事に一直線上に並び、ENSO 周期を評価する有力なメトリックとして注目を集めた。

Sulagna Ray (Texas A&M 大学) は、ENSO の出現位置を考慮してその規模を見積もる CHI (Center of Heat Index) 指標を提唱した。CHI は、近年観測されている新タイプのエルニーニョのように出現位置が東西にシフトした場合にもその規模を正確に把握することができる。この発表では、CHI を観測

データセットに適用した例が紹介され、CHI の数十年規模の変動はラニーニャよりもエルニーニョにより顕著に見られるという興味深い結果が示された。今後は CMIP モデルの解析に適用した結果が期待される。

Julien Boucharel (LEGOS) は、ベキ乗の要素を取り入れたレヴィ分布をベースとした新しい ENSO 非線形性の指標を提唱した。この手法では、従来の確率分布の歪度による ENSO 非対称性の評価よりも一つモーメントを増やすところに特徴があり、観測された海面水温にこの指標を適用した結果は、1970年代と2000年頃の ENSO の特徴の数十年規模の変化をうまく捉えている。また、CMIP3の温暖化実験に適用した場合には、非対称性は増加するものの極端現象の頻度は相対的に減るという興味深い結果を示していた。Boucharel の考案したメトリックは年長研究者からの評判も良く、CMIP5にも積極的に取り入れられて行くことになるだろう。

BJ インデックスの精神と同様に、SST 方程式から ENSO へのフィードバックを議論したのが Pedro DiNezio (マイアミ大学) や Boris Dewitte (LEGOS) である。共通の結論として、どのフィードバック項が ENSO の変化に貢献しているかを特定できたとしても、そのフィードバックに影響を与える原因となる背景場の構造の変化についてはモデル間のばらつきが大きく、CMIP3モデル間で統一した見解を見出すことが難しいという現状が述べられていた。このようなモデル間のばらつきをどのように結論付けて行くかが CMIP5に向けての一つの大きな課題となるだろう。彼らの見方とは逆に、ENSO の変化が基本場に与える影響を議論したのが De-Zheng Sun (NOAA/ESRL) である。彼は、海洋モデルを用いた感度実験から、ENSO に応答した風応力偏差によって生じた海洋表層の南北熱移流が冷舌を弱める働きを示した。GCM の基本場のバイアスが ENSO からの寄与を受けている可能性があるとの見解が示された他、そもそも ENSO からの影響の結果として熱帯数十年規模変動が説明できるのか等の興味深い議論が交わされた。

このセッションでは、気候変化に伴う ENSO の特徴の変化として近年注目されている、新タイプのエルニーニョ (Central-Pacific (CP) El Niño/dateline El Niño/El Niño Modoki/warm pool El Niño) に関する研究例も複数紹介された。新タイプでは、SST 偏差の最大域が古典的エルニーニョよりも西側

に位置し、近年出現頻度が高まっていることが知られているが、多くの研究者が各々で命名して多種多様なアプローチを行っており、まとまった見解が得られていないのが現状である (Ashok *et al.* 2007; Yeh *et al.* 2009; Kug *et al.* 2009)。Sang-Wook Yeh (Hanyang 大学) はこれらの諸説を総括して、古典的 El Niño と新タイプの違いについてレビューした。新タイプエルニーニョの頻度が CMIP3の温暖化実験においても増加傾向を示していることを指摘し、その原因が、背景場の温度躍層の東西の傾斜が緩むことで中央太平洋における温度躍層からのフィードバックが相対的に増加したことによると考察している (Yeh *et al.* 2009)。Jin-Yi Yu (カリフォルニア大学) は、CMIP3モデルの多くにおいて CP エルニーニョの方が古典的エルニーニョに比べて振幅が大きく、また周期のピークが古典的エルニーニョのように明瞭に現れないことなどを示した。

5. より広い視野での ENSO 研究

このセッションでは、CMIPにおける ENSO と将来変化という枠組みに捉われない、GCM を用いた ENSO 研究の新しいアプローチやテレコネクションに関する研究例が紹介された。

今田 (東京大学) は、熱帯東太平洋冷舌域に発達する TIW が ENSO に与える影響についての研究例を紹介した。TIW に伴う熱輸送は海洋の熱収支に対して重要な役割を担っており、ENSO に影響を与え得る要因としても近年注目されている。この研究では、TIW の熱輸送を表現する新しいパラメタリゼーションを中解像度の MIROC に導入し、多くの GCM が抱える冷舌域の cold バイアスが改善されることや、ENSO の非対称性の再現性が向上することを示した (Imada and Kimoto 2011)。また、超高解像度 (大気モデル~60 km) の MIROC を用いた海洋データ同化実験の結果をもとに、1970年代の気候シフトに伴って TIW 強度が増加したとする見解を示し、その影響が同時期の ENSO の非対称性の増加に効いている可能性があることを示唆した。同様の新規なアプローチとしては、結合モデルによる事後季節予報実験の結果からモデルバイアスを探る研究 (Benoit Vanniere, IPSL) や、インドネシア通過流が ENSO の構造に与える影響を調べたもの (Wenju Cai, CSIRO) など、様々な視点で ENSO を捉えたものが目についた。

ENSO のテレコネクションに関する発表では、「大

気の橋”を通じた ENSO から遠隔地域への影響についての話題に加えて、遠隔地域からの ENSO に対する強制に焦点を当てた研究が注目されており、本セッションでも多く取り上げられていた。Pascal Terray (IPSL) は中高緯度からの ENSO に対する強制について紹介した。熱帯外から ENSO に与えられる確率的強制としては、北太平洋振動に伴う冬季の北太平洋亜熱帯東部の水温偏差が春先に熱帯の風を駆動して ENSO に似た構造を作り出すという“Seasonal Footprinting Mechanism” (Vimont *et al.* 2001) が知られている。Terray は、これに加えて、南半球インド洋と大西洋の亜熱帯に卓越する SST 偏差のダイポール構造が大气を通して ENSO を駆動するという結果を紹介し、これらの両半球の亜熱帯からの確率的強制が近年はより顕著に出現していることを指摘した。このような熱帯外からの確率的強制は ENSO の予兆となるため、季節予報の予測可能性の鍵となる現象として注目されている。その他にも、夏季に大西洋に出現するエルニーニョ的な SST 偏差が ENSO に与える影響 (Chunzai Wang, NOAA/AOML) や、インド洋の変動が ENSO に与える影響 (Jérôme Vialard, IPSL) など、他地域から ENSO に与えられる影響についての研究が紹介された。Ken Sperber (PCMDI) は、CLIVAR の MJO ワーキンググループにおける CMIP3 への取り組みを紹介した。統一されたメトリックを用いて解析された各モデルの結果が Web 上に整備され、ENSO グループが見習うべき点が多々あった。

6. なにをすべきか？

Discussion セッションでは、初日の David Battisti の ENSO 理論とモデルのレビューを踏まえ、ENSO 研究に残された課題と次の10年間で何を解明していくべきかが議論された。現在、ENSO モデル研究に残されている問題点として、①最高峰の気候モデルをもってしても依然として基本場のバイアスを抱えており、現実的な ENSO の再現を妨げていること、②最高峰モデルを用いた季節予報のスキルが経験的モデルに及ばないこと、③それらの問題の主要因が SST に対する大気への応答にあることが指摘された。これらの継続的課題に加え、今後10年間で新たに取り組むべき重点課題としては、主に近年の ENSO の変調に注目した議論がなされ、以下のような点がまとめられた。

- 新型 ENSO の物理プロセスの理解と予測可能性

- ENSO が変化したことで新たに解明できること
- ENSO に対する背景場の変化
- 数十～数百年スケールの変動と ENSO の相互作用
- ENSO 研究への古気候指標の積極的な導入

また、CMIP5を見据えて、GCM における ENSO の評価手法を確立することも、本ワークショップの目指すところであった。3日間のセッションで提唱されたメトリックから有効なものが8通り挙げられ (F.-F. Jin, D. Battisti, E. Guilyardi, A. Fedorov, B. Dewitte, 渡部, A. Capotondi, J. Boucharel), 今後これらを洗練して統一したメトリックを確立し、新たなアプローチに発展させていくことが決まった。手始めとして、これらのメトリックおよび CMIP モデルへの適用結果を Web ペースのインベントリに整理することが検討された。

ワークショップの最後に、ENSO 研究者あるいはまた GCM 開発者の立場から、観測に対して何を求めどのような努力をすべきかを明確にし、メッセージを発することが重要であるとの認識から、Andrew Wittenberg が中心となって以下のような事項がまとめられた。

- ENSO の各種フィードバックを検証するための風応力、熱フラックス、海洋表層流速、湧昇流、混合の観測データの必要性
- TAO や QuikSCAT 等、古い ENSO 観測網の維持
- 観測データセット間の相互比較および、同化する観測データやモデルを相互に入れ替えることによる、再解析データの不確定性の低減
- 古気候データの統合と再解析データの作成
- 各種観測データのフォーマットの統一
- ENSO に関連するデータセットを統合して管理するインベントリの構築

7. おわりに

3日間に渡って開催された ENSO ワークショップは、CMIP5に向けての ENSO 研究の道しるべが示された、非常に有意義な会合であった。古典的な ENSO 理論から始まり GCM 研究の最前線まで、ENSO の神髄を味わい尽くせる、非常に中身の濃い3日間であった。会議場、というよりは、パリ大学の学生たちが通う教室の中の一室で、机をコの字型にならべて全員が向かい合い、発表の最中であっても構わ

ず活発な議論が繰り広げられた。ENSO の理論研究の最盛期に分野をリードしてきた大御所達が迫力のある持論を展開する中、次世代を率いていく欧米の若手研究者達が物怖じせず議論に加わっている様子は印象的だった。日本の若手研究者も積極的にこういう機会に加わっていくべきだと改めて実感した。

略語一覧

AOML : Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory 大西洋海洋気象研究所
 AR4 (5) : Fourth (Fifth) Assessment Report 第 4 (5) 次評価報告書
 AGCM : Atmospheric General Circulation Model 大気大循環モデル
 BMRC : Bureau of Meteorology Research Centre オーストラリア気象局気象研究センター
 CCSM : Community Climate System Model コミュニティ気候システムモデル
 CESM : Community Earth System Model コミュニティ地球システムモデル
 CLIVAR : Climate Variability and Predictability Project 気候変動及び予測可能性研究計画
 CMIP3 (5) : Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (5) 第 3 (5) 期結合モデル相互比較実験
 CSIRO : Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation オーストラリア連邦科学産業研究機構
 ENSO : El Niño-Southern Oscillation エルニーニョ-南方振動
 ESRL : Earth System Research Laboratory 地球システム研究所
 GCM : General Circulation Model 大循環モデル
 GFDL : Geophysical Fluid Dynamics Laboratory 地球流体力学研究所
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
 IPSL : Institut Pierre Simon Laplace ピエール・シモン・ラプラス研究所
 KORDI : Korea Ocean Research and Development Institute 韓国海洋研究院
 LEGOS : Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales 地球物理学・海洋学研究所
 MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate 東京大学気候システム研究センター・国立環境研究所・海洋研究開発機構が開発された全球気候モデル
 MJO : Madden-Julian Oscillation マッデン・ジュリアン振動
 NCAR : National Center for Atmospheric Research

米国大気研究センター

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁
 OGCM : Ocean General Circulation Model 海洋大循環モデル
 PCMDI : Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison 気候モデル診断・相互比較プログラム
 PMEL : Pacific Marine Environmental Laboratory 米国海洋大気庁太平洋海洋環境研究所
 PMIP3 : Paleoclimate Modelling Intercomparison Project Phase 3 第 3 期古気候モデリング相互比較プロジェクト
 TIW : Tropical Instability Waves 熱帯不安定波
 TOGA/TAO : Tropical Ocean Global Atmosphere/Tropical Atmosphere Ocean Project 熱帯海洋全球大気/熱帯大気海洋観測計画

参考文献

Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng and T. Yamagata, 2007 : El Niño Modoki and its possible teleconnection. *J. Geophys. Res.*, **112**, C11007, doi : 10.1029/2006JC003798.
 Battisti, D. S. and A. C. Hirst, 1989 : Interannual variability in a tropical atmosphere-ocean model : Influence of the basic state, ocean geometry and nonlinearity. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 1687-1712.
 Collins, M. *et al.*, 2010 : The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. *Nature Geosci.*, **3**, 391-397.
 Fedorov, A. V. and S. G. Philander, 2001 : A stability analysis of tropical ocean-atmosphere interactions : Bridging measurements and theory for El Niño. *J. Climate*, **14**, 3086-3101.
 Guilyardi, E. *et al.*, 2009 : Understanding El Niño in ocean-atmosphere general circulation models : Progress and challenges. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 325-340.
 Imada, Y. and M. Kimoto, 2011 : Parameterization of tropical instability waves and its impact on ENSO characteristics. to be submitted.
 Jin, F.-F., 1997 : An equatorial ocean recharge paradigm for ENSO. Part I : Conceptual model. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 811-829.
 Jin, F.-F., S. T. Kim and L. Bejarano, 2006 : A coupled-stability index for ENSO. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L23708, doi : 10.1029/2006GL027221.
 Kirtman, B. P. and J. Shukla, 2002 : Interactive coupled ensemble : A new coupling strategy for CGCMs.

- Geophys. Res. Lett., 29, 1367, doi : 10.1029/2002GL014834.
- 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.
- Neale, R. B., J. H. Richter and M. Jochum, 2008 : The impact of convection on ENSO : From a delayed oscillator to a series of events. J. Climate, 21, 5904-5924.
- Shaffrey, L. C. *et al.*, 2009 : U.K. HiGEM : The new U.K. high-resolution global environment model—Model description and basic evaluation. J. Climate, 22, 1861-1896.
- Tudhope, A. W. *et al.*, 2001 : Variability in the El Niño-Southern Oscillation through a glacial-interglacial cycle. Science, 291, 1511-1517.
- Vimont, D. J., D. S. Battisti and A. C. Hirst, 2001 : Footprinting : A seasonal connection between the tropics and mid-latitudes. Geophys. Res. Lett., 28, 3923-3926.
- Watanabe, M., M. Chikira, Y. Imada and M. Kimoto, 2011 : Convective control of ENSO simulated in MIROC. J. Climate, doi : 10.1175/2010JCLI3878.1, in press.
- Wittenberg, A. T., 2009 : Are historical records sufficient to constrain ENSO simulations? Geophys. Res. Lett., 36, L12702, doi : 10.1029/2009GL038710.
- Yeh, S.-W., J.-S. Kug, B. Dewitte, M.-H. Kwon, B. P. Kirtman and F.-F. Jin, 2009 : El Niño in a changing climate. Nature, 461, 511-514.
- Zebiak, S. E. and M. A. Cane, 1987 : A model El Niño-Southern Oscillation. Mon. Wea. Rev., 115, 2262-2278.
-