

MIROC 大気海洋結合モデルによる hindcast 実験

石井正好 (FRCGC/JAMSTEC), 木本昌秀 (東大 CCSR)

1 はじめに

東大気候システム研究センター、国立環境研究所、地球環境フロンティア研究センターが共同開発した大気・海洋・陸面結合モデル (MIROC) を、年々から十年スケールの短期的な気候変動の再現性及び予測可能性の研究に使用できるようにするために、予備的な hindcast 実験を行なう。この結合モデルは、「気候変動に関する政府間パネル (IPCC)」の第 4 次報告書への貢献に向けた地球温暖化予測実験遂行のために開発されたもので、二酸化炭素濃度変化や火山噴火に伴うエアゾル増加などの外部条件に対する気候応答実験では、海面での大気・海洋間フラックスの調整なしで観測と良く対応する結果を示している (Nozawa et al. 2005、Church et al. 2005)。

2 hindcast 実験

使用したモデルは、MIROC の中解像度版で、大気モデルは T42L20、海洋モデルは約 1 度 × 1 度の 44 層である。hindcast 実験では、結合モデルを積分しながら海洋側のみをデータ同化し、同化結果から初期値を抽出して、同結合モデルによる 1 年先の予測を行なう。実際の観測データと比較すると結合モデルの海水温の場には実質的に大きなバイアスが存在しており、その変動幅も観測に比べて小さくなっているが、モデルの純粋な性能を把握するために、同化でも予測でも、これらのモデルエラーに適応するように、入力としての観測データを調整したり、フラックスコレクションしたりすることはしない。温暖化仕様の結合モデルなので二酸化炭素濃度やエアゾルが時間変化するようになっているが、実験ではそれらを 2000 年時のものに固定して、変化しないようにした。

実験は 1970 年から 2002 年までを対象とし、2 種類のデータ同化実験と、対応する予測実験とで構成した。2 種類のデータ同化は、海面の水温のみを同化する実験 (SST 同化) と海洋内部の水温ならびに塩分を同化する実験 (表層 TS 同化) である。同化に使用する観測データは、海面水温の客観解析値 (HadISST) と表層水温・塩分の客観解析値 (Ishii et al. 2006) の、既に客観解析された格子点データである。同化手法としては最も単純なナッジングを採用した。緩和時間は、SST 同化の場合は 30 日、表層 TS 同化では、使用した表層水温データベースには解析誤差情報が含まれて

いるので、この誤差に比例させて緩和時間を 30 日から 90 日まで変化させるようにした。Ishii et al. (2006) の海面水温は HadISST ではなく、COBE-SST (Ishii et al. 2005) が代入されている。両者の SST 解析値の間には相応の違いがあるが、hindcast 実験の SST の結果にはそれ以上の顕著な差となっているので、以下、SST の客観解析値の差は問題にならないと考える。

結合モデルは海氷モデルを含んでいる。データ同化の際には、海氷の密接度などの物理量を同化するのではなく、海氷が生成されたり消滅したりするための条件を満たすように、すなわち海氷環境としての水温値を変化させるように、同化スキームを構成した。しかしながら、夏半球側の海氷がほとんど消滅してしまう結果となり、海氷の再現をするには、手法を根本的に見直す必要があるという結果となった。とりわけ、夏季の海氷縁では、氷が存在できる格子でも水温は数に達することがあり、同化に際して、格子内一様の水温値と取り扱うことの問題が大きいと考えている。

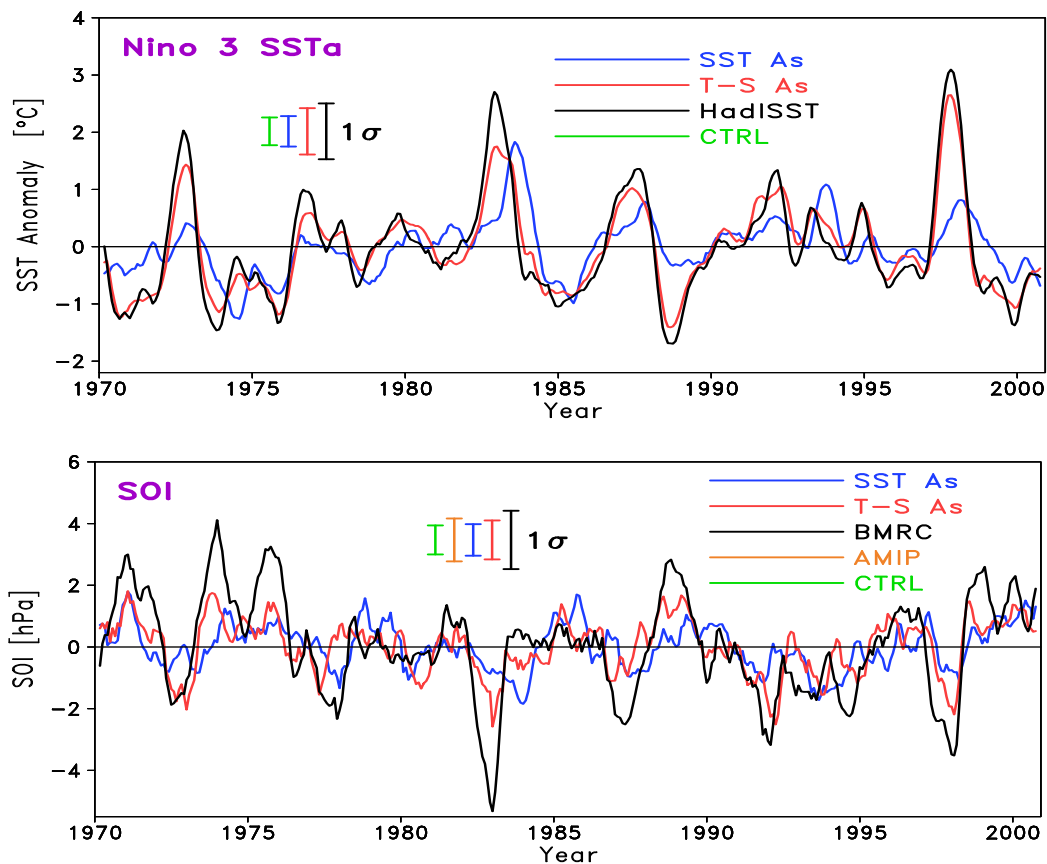
予報実験では、1981 年 1 月から 2000 年 10 月まで、3ヶ月おきの初期値を用いて、1 年予報を行なう。同化実験で、各月の月初めの 1 日の初期値と、そこから過去に遡って 3 日おきの初期値を 8 つ取り出し、LAF (Lagged Average Forecast) 法によるアンサンブル予報を構成する。上に述べたとおり、予測期間中はフラックス調整を採用しなかった。予測結果を吟味する際には、各同化実験の気候値からの偏差を使用した。

3 データ同化結果

まず、赤道域のエルニーニョおよび南方振動 (ENSO) の再現性を確認する。

Nino-3 の海面水温偏差を第 1 図の上段に、南方振動インデックス (SOI) を同図下段に示したとおり、SST 同化に比べて表層 TS 同化の結果が良いのが一瞥して分かる。SST 同化の場合には、振幅が小さく、位相の遅れが顕著であるのに対して、表層 TS 同化の場合には、観測 (HadISST) された変動幅を概ね再現している。図の左上に各実験での Nino-3 の海面水温偏差の一標準偏差を比較しているが、SST 同化の場合には観測データを与えない結合モデル積分 (CTRL) と同程度である。

SOI についても同様の傾向が窺える。大気のみを同化していないために、観測データの変動に匹敵す



第 1 図. Nino-3 の海面水温偏差 (; 上段) と南方振動インデックス (下段). 図中、各実験出力によるインデックスの標準偏差の大きさを縦棒の長さで比較している。

る変動を表現することはできないが、同位相である。標準偏差は、観測の SST を与えて大気モデルのみを積分した (AMIP) 場合が一番大きな標準偏差となっている。

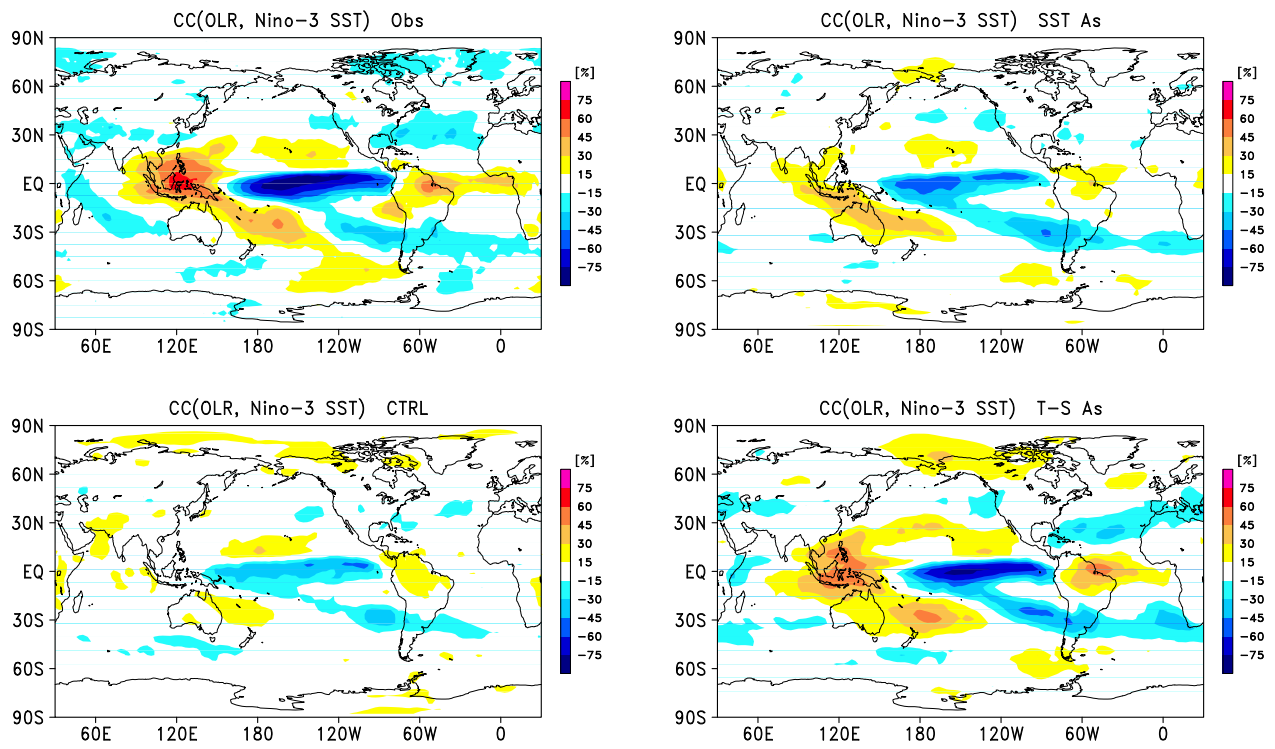
データを入れていない大気側の応答を、ENSO を対象として検証してみる。Nino-3 の SST 偏差 と外向き赤外放射 (OLR) の関連の地理的分布を、第 3 図に示した。エルニーニョ (ラニーニャ) が発生しているとき、太平洋の中部赤道域から東部にかけて降水量が平年より多く (少なく) なり、その周辺海域では降水が減る (増える)、という、よく知られた事実を示す図である。おおまかなパターンとしてはどの図も類似の相関関係を示しているが、表層 TS 同化 (右下) では観測 (左上) に見られる強いコントラストを表現し、全球の広範囲にわたって良い対応を示している。一方、SST 同化の場合は、CTRL を若干改善するのみである。

4 アンサンブル予測結果

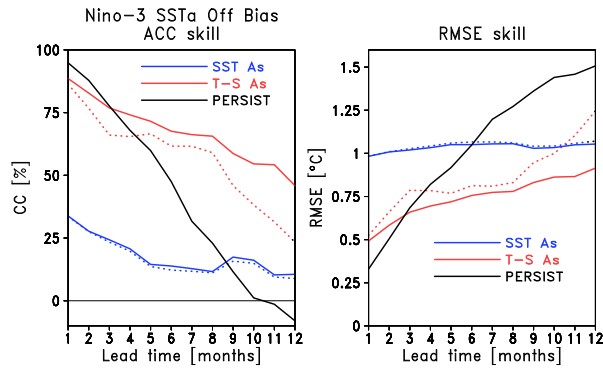
1981 年から 2000 年まで 3 月おきに行なった一年予測 80 例のアンサンブル平均に対する相関スキル (%) と根二乗平均誤差 (RMSE ; °C) スキルを第 4 図に示した。比較に使用した観測データは HadISST であ

る。予測時間と初期値の季節の関数で予報のバイアスを計算し、バイアスを取り除いたスキルを実線で、バイアスを修正しない予測結果についてのスキルを点線で示している。同化結果の善し悪しに呼応して、表層 TS 同化の予測結果のスキル (赤) は SST 同化の予測 (青) に比べて圧倒的に高く、8ヶ月先まで 60%以上の相関、0.75 以下の RMSE となっている。黒実線は持続予報に対するスキルである。赤の点線に見られるように、表層 TS 同化に対する予測スキルは、9ヶ月以降、急激に低下する。これは結合モデルの、太平洋赤道域東部の顕著な低水温バイアスに起因しており、このバイアスは 7 月から 11 月にかけて季節的に大きくなる。

大気要素の予測結果の一例として海面気圧 (SLP) を見る (第 4 図)。左列が SST 同化のもの、右列が表層 TS 同化のものである。まず、予測結果が同化結果にどれだけ対応 (同化と予測の一貫性) しているかを見るために、同化結果と予測結果の対応を調べる。図示したのは予測 1、3、6ヶ月目の相関係数の分布である。1ヶ月目の相関は全域的に高いが、後の 2ヶ月の間に急激な相関の低下が確認される。3ヶ月と 6ヶ月の間の変化は小さい。このような傾向は他の要素についても同様で、気象庁の現業モデルにも共通していた



第 2 図. Nino-3 SST 偏差 () と OLR の相関係数 (%) の地理的分布



第 3 図. Nino-3 SST 予測スキル (詳細は本文参照)

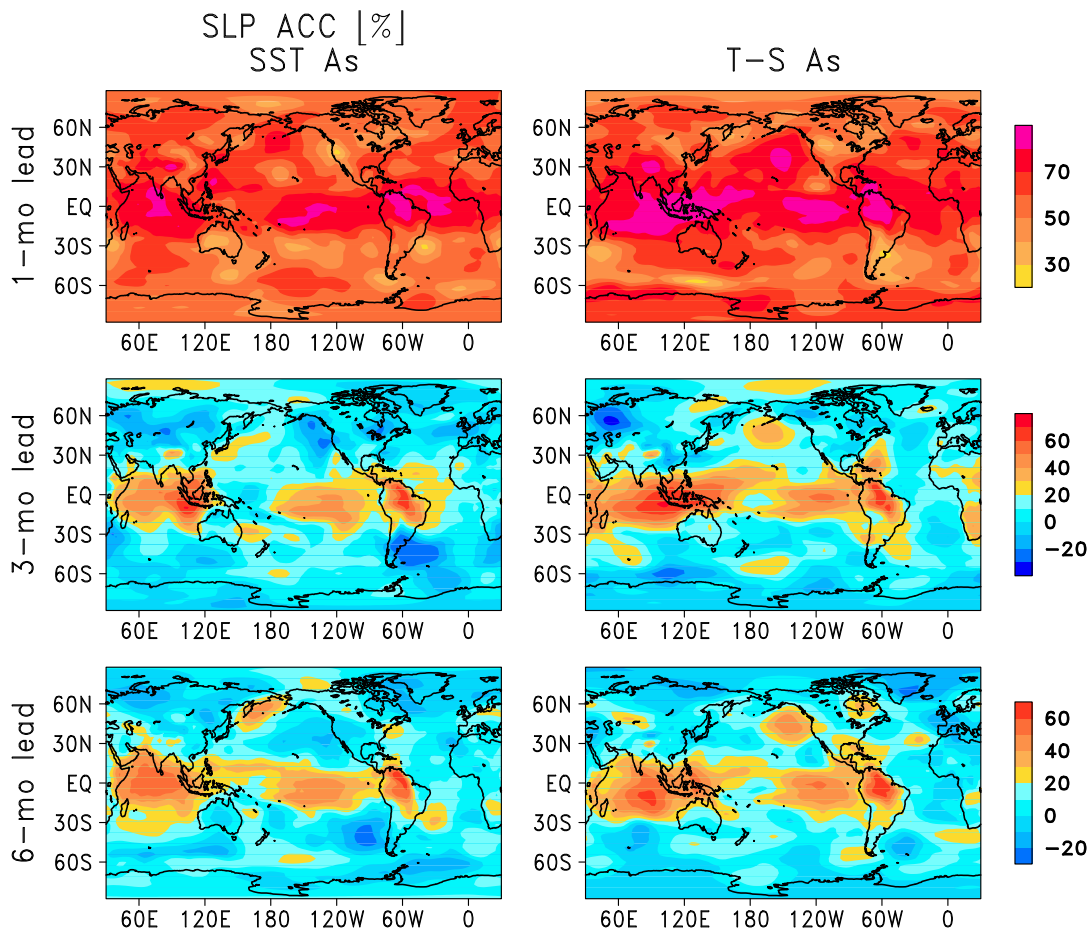
傾向である (石井 1997)。現業モデルのように、大気と海洋を別々に初期化して結合、予測するシステムでは、予測開始 2ヶ月目以降、中高緯度を中心にバイアスの成長が見られたが、現行モデルでは類似のものは認められなかった (図略)。解像度を含めてモデルの違いは大きいので比較にはならないが、予測開始後の気候ドリフトが小さいことは結合モデル同化および予測の利点として注目している。

第 4 図では、SST 同化の予測よりも表層 TS 同化の予測の方に高相関域がやや広く現れている。一方、予測された SST に対しては、SST 同化の方が、予測結果と同化結果との対応が良かった (図略)。このような予測と同化の一貫性はシステムに望まれる特性では

あるが、今回の例に限っては、SST 同化の観測データへの拘束が弱かったために、予測された場合はモデル気候状態に非常に近いところで変動していたと考えている。では、何故大気の方は逆の対応になっているのか？データ同化において、海面での人為的な熱の出入りが、SST 同化の場合の方が表層 TS 同化の場合より 2 倍以上大きかったという事実が確認された。海面水温の修正するために与えた熱は、同時に大気側への熱供給にもなりうる。これが、大気モデルへのノイズとなる可能性は否定できず、結果として大気のエラーを大きくしたことの一要因と考えている。

5 まとめ

表層 TS 同化の季節予報の再現や予測精度が良いことは、過去の多くの研究で指摘されてきたとおりである (Chen et al. 1995、Rosati et al. 1997 など)。海面だけを観測に近づけた場合では、海洋内部の状態の再現は極めて貧相である。とりわけ太平洋赤道域での東進する Kelvin 波、西進する Rossby 波の現実的再現が無ければ、一連の ENSO の周期的変動に伴う熱の東西、南北の再配置が現実的に表現されているとは言い難い。今回の結果は、従来の研究を支持する。しかしながら、実験設定としては SST 同化の ENSO の再現性を、ある程度まで表層 TS 同化のものに近づけてから、予測実験を行なうべきであったと反省している。また、この目的のために、海上風を再解析の結果



第4図. 海面気圧についての予測スキル (%; 上段: 1ヶ月予測、中段: 3ヶ月予測、下段: 6ヶ月予測)。SST 同化 (右) と表層 TS 同化 (左) のそれぞれについて示した。

に同化する (Rosati et al. 1997) などの工夫も必要であった。

6 おわりに

観測に近づければ近づける程、予測のドリフトが大きくなり、結果として予測スキルの低下をもたらす。従来の同化・予測システムの多くは、多少なりとも、このような事情を抱えていると考えられる。このような状況を打開するために、不断のモデル開発は不可欠であると考え。データ同化技術のみで、全てを解決できるものではない。データ同化の結果がモデル開発に対して、示唆的な情報を多く提供できるものが望ましい。今後、ひとつのアプローチとしてアンサンブル Kalman フィルターを採用し、モデルのエラーを確率的に表現し、同化と予測プロダクトの信頼性の定量的評価が可能となるシステムの構築を計画している。

参考文献

Chen, D., S. E. Zebiak, A. J. Busalacchi, and M. A. Cane, 1995: Improved Procedure for El Niño forecasting: Implications for predictability. *Science*, **269**, 1699–1702.

Church, J., N. J. White, and J. M. Arblaster, 2005: Sig-

nificant decadal-scale impact of volcanic eruptions on sea level and ocean heat content. *Nature*, **438**, doi:10.1038/nature04237.

Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of SST and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatol.*, **25**, 865–879.

Ishii, M., M. Kimoto, K. Sakamoto, and S.-I. Iwasaki, 2006: Steric sea level changes estimated from historical subsurface temperature and salinity analyses. *J. Oceanography*, **61**, 155–170.

石井正好, 1997: 海洋データ同化システム. 平成9年度季節予報研修テキスト「エルニーニョ現象の予測に向けて」. 気象庁気候・海洋気象部.

Nozawa, T., T. Nagashima, H. Shiogama, and S. A. Crooks, 2005: Detecting natural influence on surface air temperature change in the early twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20719, doi:10.1029/2005GL023540.

Rosati, A., K. Miyakoda, and R. Gudgel, 1997: The impact of ocean initial conditions on ENSO forecasting with a coupled model. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 754–772.