

近未来気候変動予測プロジェクト～CLIMATE2030～

石井 正好 (海洋研究開発機構)

SPAM 開発グループ (東大 CCSR、海洋研究開発機構、国立環境研究所)

1. はじめに

人・自然・地球共生プロジェクト (文部科学省、2002年～2006年) で実施された温暖化予測実験では、温室効果気体や火山性エアロゾルを与えて、過去 150 年前から現在までの気候状態、そして 100 年から数 100 年先の気候状態の変遷を大気海洋結合モデルにより再現、予測することに成功した。共生プロジェクトに引き続き、同省が支援する 21 世紀気候変動予測革新プログラムが始まった。そのなかの近未来予測課題では、日々の天気予報と同様の手法を導入して、現実に近い大気と海洋の状態をデータ同化により結合モデルで再現したうえで、30 年先までの気候状態を予測する計画である。共生プロジェクトのときより、高精度で、不確定量の少ない予測結果を期待されている。本稿ではこの近未来気候変動予測プロジェクトを紹介する。プロジェクトで開発している大気海洋結合モデル (MIROC) をデータ同化により初期値化し、適当なアンサンブルを作成して、30 年先を予測する。これを実現するシステムを SPAM (System for Prediction and Assimilation by MIROC) と称する。

以下、プロジェクトの概要である。

2. 目標と課題

温暖化予測の開始から 30 年までの期間では、力学モデルにより予測された全球平均気温は、与える経済発展シナリオやモデルの違いにほとんど依存しない。このことは、先の IPCC 第四次報告書に集められたモデルの計算の結果から分かっている。また、観測された自然変動や人間活動により排出された二酸化炭素をはじめとする温暖化気体およびエアロゾルをモデルに与えて積分すると、全球的な地表面温度 (Nozawa et al.

2005) や海洋貯熱量 (AchutaRao et. 2007) を再現できることが確かめられている。こうした背景のもとで、現在から 30 年先の近未来気候を標的とする近未来予測を行い、大気と海洋の相互作用の結果として気候システムの内部に自発的に現れる十年規模の気候変動 (内部変動) を再現し予測することを目標とする。

近未来気候予測では、初期値問題として温暖化予測を行う。このことから、現業センターを行われているエルニーニョ予測や季節予報にあるものと同様の課題を抱えることになる。すなわち、力学モデルの気候の再現性の可否やアンサンブルによる予測誤差の評価が事前に十分に把握し、システムに必要な改良を加える努力が必要となる。エルニーニョの予測可能な時間スケールを越えて近未来を予測するため、必然、十年規模の気候変動に焦点が当てられる。そもそも十年規模変動の再現性と予測可能性があるのか、これについても精力的に調査し解明する必要がある。

予測時間が長期間になることから、その間に火山が噴火するかどうかについての配慮も必要である。火山は気候を冷却するが、モデルの内部変動にも決定的な影響を与えることがモデル実験から分かっている (Shiogama et al. 2009)。つまり、モデルの内部変動は火山の噴火によって変質して、時間とともにかき消されてしまう。これはターゲットとする気候の内部変動のシグナルがあまり大きくはないということ、加えて、予測が長期間になってしまうことであり、近未来予測の難しさを反映している。シグナルの振幅が小さいという意味では、近未来予測結果を、どのように応用できるかについての検討も必要である。詳細を省くが、革新プログラムでは、温暖化の社会的な影響を評価する研究チームが合流してプロジ

ェクトを展開している。

温暖化実験では結合モデルを積分することに実質的に大きな計算コストが必要になる。このため高度な初期値化やアンサンブル手法の採用には制約がある。計算量を押えた効果的な方法を採用することが求められる。

3. 初期値化

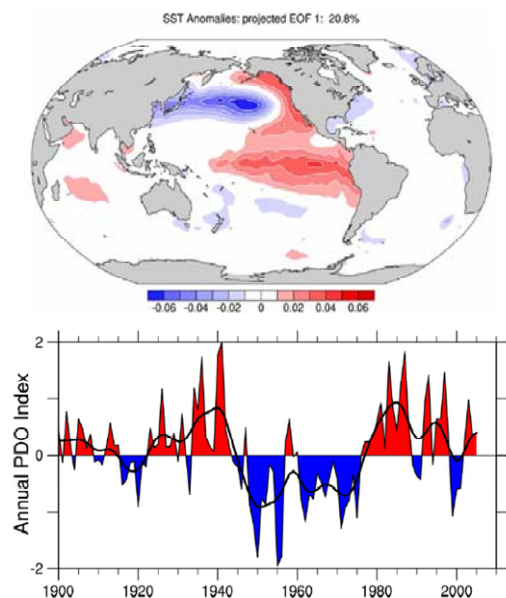
近未来予測で予測の対象とすべき気候現象は、その変動の大きさから言って、太平洋十年規模振動 (Pacific Decadal Oscillation: PDO) であろう (第1図)。PDO は、観測データや最新の大気海洋結合モデルの出力の統計から、全球海洋上でもっとも卓越する、20年程度の周期性をもつ現象として、抽出できるものである。PDOの素性は必ずしも明らかではないが、通常、長期的な気候シグナルは海洋の方に「記憶」されている。これを根拠に、大気海洋結合モデルを走らせながら海洋側だけにデータ同化により観測の気候変動に近づけてやることにする。大気モデルは、観測に近づけられた海面水温に応答するという簡便な結合データ同化である。

前節でエルニーニョは予測対象ではないと述べたが、初期値化に際しては、エルニーニョを再現できる程度にデータ同化し、大気モデルを含めて観測の海面水温に馴染ませる。いわゆるテレコネクションによって全球の大気と海洋の気候状態が再現されるようにしておく。ここでは、大気の入っていないので、観測とは多少異なった大気の気候状態となるのはやむをえない。初期値化の段階で、結合モデルが観測されたエルニーニョを「覚え」ている方が予測初期の誤差は、全球的に、そうでない場合に比べてずっと小さい。この点が予測にどのように影響するかは検討の余地が多分にあるが、予測には正の効果があると考えている。この点は今後調査する。

次に、結合モデルを用いて海洋のデータ同化を行うための技術的問題をいくつか述べる。

現実の海洋観測データとモデルとの間には、実質的に大きなバイアスが認められるので、このバイアスを除いてデータ同化を行なうことにする。モデルと観測データの気候値が一致するように

して、データ同化により、観測データの年々変動成分がモデルに取り込まれるようにする。これをアノマリー同化と以下参照する。バイアスを除去しないでデータ同化を行なうアプローチも選択可能であるが、この場合は通常、予測開始後に、バイアスを含んだモデルの気候状態へと回帰していく現象が発生する。つまり気候ドリフトである。アノマリー同化とはいえ完全に気候ドリフトを回避できるわけではない。モデルの海洋循環の構造や水温プロファイルの鉛直構造は観測と違うために、アノマリーの時空間パターンは両者で一致しない。これも、気候ドリフトの原因となりうる。



第1図. 太平洋十年振動 (PDO)の空間パターン図 (上) と時系列図 (下)。

計算コストを低減するために、海洋のデータ同化では、前もって客観解析手法により格子点値として整備された月平均の観測データ (Ishii et al. 2006, 2009) を用いることにする。この観測データとモデルとの差に比例する熱量をモデルに与えることで、モデルの状態を観測データに少しずつ近づけていく。このようなやりかたは、一般に IAU (Incremental Analysis Update) と参照される。

近未来予測プロジェクトでは渦を表現することができる高解像海洋モデルを採用する。この場合には、モデルが生成した中規模渦のとりあつか

いに注意が必要である。そもそも格子点値化された観測データには、海洋観測が潤沢ではないので、現実の中規模渦は解像されていない。むしろ、格子点値化した観測データの作成時にそのような情報の大部分は取り除かれている。このような観測データを使用して、単純にモデルとの差をとって同化してしまうと、折角物理モデルが作った渦を消滅させてしまうことになる。そこで、観測とモデルの差に適当な空間フィルターを掛けて、渦のシグナルを除去し、場を滑らかにした上で、IAUの入力としてやることにする。

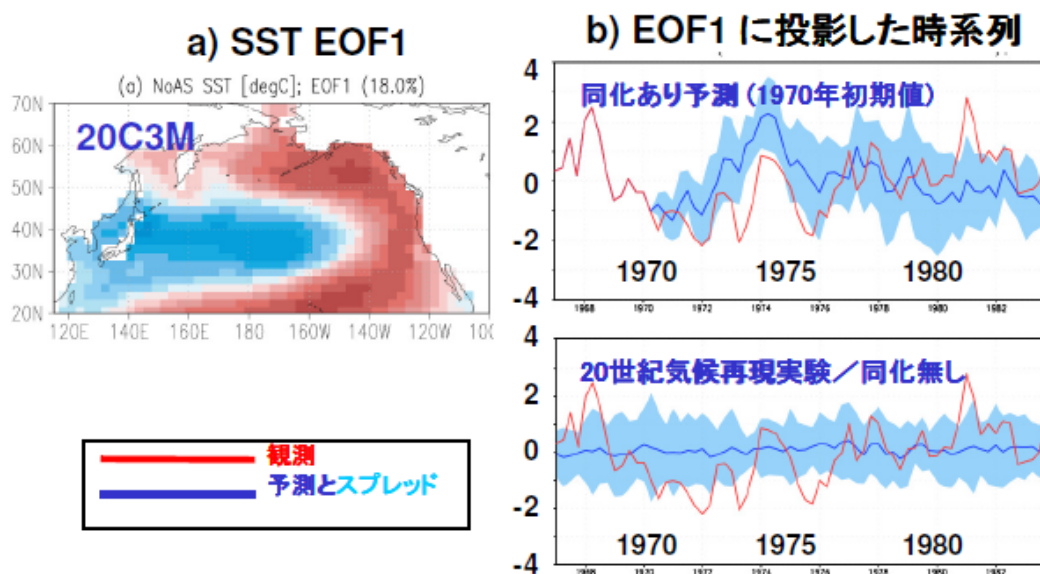
4. アンサンブル

再現、予測された物理量の不確実性を評価するために複数の初期値でモデルを積分しておく必要があるが、既述したとおり近未来気候予測のアンサンブルをどのように構成するかについての確かな方法論は無い。これまでに古典的な LAF や 比較的新しい手法であるところの **breeding** を試みてきたが、ひとまず、次のようなアンサンブル手法を選択することにした。すなわち、データ同化を行っていない温暖実験から異なる初期値を選びだし、それぞれの初期値からデータ同化を開始する。同化しながら、他のメンバの同化出力を参照することはせずに、それぞれをひたすら同化していく。これを以下同化アンサンブルと呼ぶ。プロジェクトの後半では、本研究会で森らが発表するような予測可能性を追究する試みを積

みあげながら、予測の対象とする十年規模気候変動の特性を踏まえた高度なアンサンブル手法の適用を検討してみたいと考える

高解像モデルの予測実験の場合には、上述した同化アンサンブルの適用は計算資源の制約上困難である。一本のデータ同化積分から、予測の複数の初期値を作成するのが現実的である。LAF の適用が安直であるが、本研究会の近本らの発表にあるように、他の、より効果的なアンサンブル手法を開発し採用することを検討している。

以上述べた方法で近未来予測実験は上手くいくのかどうか、IPCC の第 4 次報告書に貢献をした中解像度版 MIROC (バージョン 3.2) を用いて十年程の予測を行い確認してみる。中解像度版 MIROC では、大気モデルは水平解像度約 300km のスペクトルモデルで、鉛直に 20 層を配置、海洋モデルは、経度方向には 150km、南北方向には 50~200km で、赤道付近では 0.5 度まで細かくなっている。海洋の鉛直には 44 層を配置する。ここではアンサンブル数を 10 に設定した。第 2 図に示したように、モデル (左図) は観測 (第 1 図) と酷似する PDO のパターンを再現している。このモデルを観測データで初期値化していない場合 (右下) には、観測 (赤) の PDO の年々の変動を再現することはなく、それぞれのモデルがそれぞれの PDO をモデル内部で表現している。しかしながらそれらに一貫性はなく、アンサンブル平均 (青) は概ね零になる。水色の陰影はスプレ



第 2 図. 近未来予測実験結果で、モデルが再現した PDO の空間パターン (a) と、その EOF に射影した時系列 (b、上はデータ同化あり、下はデータ同化なし)。詳細は本文参照。

ッドを示す。これに対して初期値化を行った予測では、観測された十年規模の変動に追随する傾向が現れてくる。PDO の予測可能性はありそうである。更なる詳細は、本研究会で望月らが議論したとおりである。

5. 関連するテーマ

十年規模変動をターゲットとした気候予測研究では、長期間の海洋観測データを使用することになる。観測データは、歴史的に使用されてきた観測測器の違いによりもたらされる系統的誤差を最小限にした上で、近未来予測実験に使用されるべきであろう。海洋表層水温の観測は、50 年程度である。集積されている海洋観測データの多くは、簡便に水温の鉛直プロファイルを測定する測器 (MBT と XBT) によるものである。このようなデータは、歴史的に、時間的にも空間的にも最も稠密に存在している。その反面、これら測器による観測データには系統的な誤差が含まれることがこれまでに指摘されており、誤差の補正の有無によっては、海洋貯熱量の十年規模変動の様相が大きく様変わりする (Ishii and Kimoto 2009)。XBT と MBT の補正を行った観測データを用いて MIROC の初期値化を行う。XBT の補正の有無の違いによる近未来予測への影響を調べたところ、正のインパクトが確認された (安中ら, 2009)。

温暖化予測や近未来予測では、衆目の集まる海氷の振舞いについても、不確実性を低減させたい。しかし、海氷のモデルを記述する独立変数は多々ある一方、海氷の観測の海氷の空間占有率であるところの密接度の観測があるのみである。密接度の空間的な時間変化が追えるようになったのは衛星観測が始まってからであり、それは1978年11月からとなる。これ以前については、地域的には観測があるものの、広範囲で気候値を与えるしかない。海氷をデータ同化する試みはあるが、これまでに、気候変動予測に対する影響を調べた研究はない。

近年に見る海氷のカタストロフィックな減少をモデルで再現予測することには、様々な課題があるだろう。しかしながら、近未来予測においてこの問題は避けて通れるものではないため、まず、

海氷のデータ同化の開発に着手した。海氷のデータ同化による気候予測への効果を測った上で、近未来予測本番実験に導入するかどうか検討する。

6. 結びにかえて

新しいタイプの温暖化予測研究がはじまっている。大気と海洋のみならず各気候サブシステムモデリング、データ同化、気候予測でのあらゆる知識と知恵を投入して、近未来予測の成果を求めていきたい。各方面のご協力も希う。

参考文献

- AchutaRao, K. M., M. Ishii, B. D. Santer, P. J. Gleckler, K. E. Taylor, T. P. Barnett, D. W. Pierce, R. J. Stouffer and T. M. L. Wigley 2007: Simulated and observed variability in ocean temperature and heat content. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 104, 10768–10773.
- Ishii, M., M. Kimoto, K. Sakamoto, and S.-I. Iwasaki 2006: Steric sea level changes estimated from historical subsurface temperature and salinity analyses. *J. Oceanogr.*, 61, 155–170.
- Ishii, M. and M. Kimoto, 2009: Reevaluation of historical ocean heat content variations with an XBT depth bias correction. *J. Oceanogr.* 65, 287-299.
- 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.
- Shiogama, H., S. Emori, T. Mochizuki, S. Yasunaka, T. Yokohata, M. Ishii, T. Nozawa, and M. Kimoto, 2009: Possible influence of volcanic activity on the decadal potential predictability of the natural variability in near-term climate predictions. (in revision).
- 安中さやか, 石井正好, 望月崇, 塩竈秀夫, 木本昌秀, 2009: 地球温暖化近未来予測実験に対する XBT 深度補正のインパクト. 日本海洋学会 2009 年秋季大会予稿集.