

結合大循環モデルを用いた十年スケール気候変動予測

望月 崇 (海洋研究開発機構)

石井 正好 (海洋研究開発機構／気象庁気象研究所)

木本 昌秀・近本 喜光・渡部 雅浩・森 正人 (東大気候システム研究センター)

1. はじめに

これまでの地球温暖化予測研究では、長期(100年程度)の気候変化を対象として、人為起源の温室効果ガスに対する気候システムの応答について主に調べられてきた。この場合、予測結果のばらつき(不確定性)を生む主な要因は、人為起源温室効果ガスの排出シナリオの違いや、各研究機関の気候モデルの応答特性のばらつきである。エルニーニョ現象や北太平洋十年スケール変動(PDO; Mantua et al. 1997)のような、地球の気候システムがもつ内部変動に起因する気温変化量は、長期の気温上昇(地球温暖化)に比べれば十分に小さい。

一方で、IPCC第5次報告書(AR5)に向けた最近の地球温暖化研究では、近未来予測という新カテゴリが設けられ、近未来(20-30年程度)の気候変化を精度よく予測しようとの試みがされ始めた(Murphy et al. 2004; Barnett et al. 2006; Clark et al. 2006)。20-30年程度の期間に限れば、人為起源温室効果ガスによる気温上昇(地球温暖化)はそれほど大きくなく、気候システムの内部変動による気温変化(振幅)と同程度の大きさである。また、排出シナリオやモデル応答特性のばらつきよりも、気候システムの内部変動に伴う揺らぎのほうが大きな不確定性を生む原因となる。

したがって、近未来予測をおこなうにあたっては、温室効果ガスの増加による全球的な温暖化シグナルだけではなくて、内部変動(特に十年スケール変動)シグナルもしっかりと予測することが重要である(Stott and Kettleborough 2002; Knutti et al. 2002; Zwiers 2002; Meehl et al. 2007)。これは同時に、全球的な気温上昇だけではなくて、内部変動によってもたらされる気候変化の地域的な差異も明らかにすることの必要性も示唆している。

内部変動予測には、天気予報などと同じように、データ同化手法を用いた初期値化が有効な手段であろう。つまり、初期値化して(観測値になるべく近く、かつ、気候モデルを構成するような力学熱力学方程式をなるべく満たすような

初期状態を求めておいて)数値積分をおこなう。もともと、初期値化による十年スケール内部変動予測実験が実施され始めたのはごく最近のことである(Smith et al. 2007; Keenlyside et al. 2008; Pohlmann et al. 2009; Mochizuki et al. 2010)。望月ほか(2009)は比較的シンプルな初期値化をおこない、十年スケール内部変動の予測可能性について初期解析結果を示した。本稿では北太平洋に注目しながらより詳しい(精緻な)解析結果を示す。

2. 初期値化(データ同化)実験と予測実験

結合モデルMIROC3.2中解像度版(T42L20)を用いた。IPCC第4次報告書(AR4)向けに実施した20世紀再現実験10アンサンブルメンバー(以下、NoASとよぶ; Nozawa et al. 2005; Shiogama et al. 2007)の1945年1月スナップショットを10個の初期値とし、海洋上層(700m以浅)でIshii et al.(2003, 2005, 2006)の客観解析データ(水温と塩分)をIAU手法(Bloom et al. 1996)でそれぞれ同化することにより、10アンサンブルメンバーからなる同化場を作成した(Mochizuki et al. 2010)。その後、この同化(アンサンブル)場の各メンバーのスナップショットを10個の初期値とする14年アンサンブル予測実験を、1960年7月から5年毎におこなった(以下、HCSTとよぶ)。また同様に、2005年7月から2030年までの将来予測実験(以下、FCSTとよぶ)もおこなった。

ここでは十年スケール内部変動の予測可能性を議論するので、全ての実験において、放射条件(温室効果ガス濃度や火山変動、太陽活動変動など)はAR4向けの20C3M-LA-FULL及びSRES-A1-FULL(A1Bシナリオ)実験時のもの(Nakicenovic et al. 2000)を用いた。

3. 外力応答+内部変動の予測可能性

地上気温の全球平均値を指標にした場合、観測値に見られる十年スケール変動成分(ゆったりとした変動成分)は、予測アンサンブル場(HCST/FCST実験結果)でもうまく表現されている(図1; 望月ほか 2009)。但し、外部から与え

た放射条件に対するモデル応答成分も小さくないので、内部変動(の位相)をうまく予測できたかどうかは、図1からは必ずしも明らかでない。実際、初期値化を施していないNoAS実験でも、長期的な温暖化トレンドや火山噴火による突発的な冷却を表現できている。

とは言え、図1を注意深く見ると、NoAS実験とHCST/FCST実験の間には注目すべき差がある。例えば、FCST実験で予測された2005年以降の平均気温は、2015年あたりまでNoAS実験のものよりも低めである。後述するように、この一時的な低温化(温暖化傾向が緩やかになる)は、PDOの負位相に伴う熱帯太平洋表層水温の低下のためである。気候モデルは内部変動としてPDOの統計的な性質(振幅や周期)をかなりよく表現できる(森ほか 2009, 2010)。しかし、初期値化を施さないNoAS実験では、PDOのような内部変動時系列をアンサンブル平均場として現実的に予測することはできない。10アンサンブルメンバーがPDOの位相をそれぞれ自由に表現してしまうので、なかには(たまたま)PDOの位相を現実的に表現するメンバーがあるかもしれないが、ほとんどのメンバーでは位相がずれてしまう。海洋上層の初期値化をおこなって、既にNoAS実験でうまく表現できている外力応答成分に加えて、十年スケールの内部変動の位相変化(や振幅変化)もうまく予測しようというのが近未来予測実験のポイントである。もっとも、PDOの負位相がいつまでも続くわけではなく、また現時点でのPDOの予測可能性が10年を超えることはない(図2参照)ので、2015年以降はNoAS実験とFCST実験の間に明瞭な差は見られない。

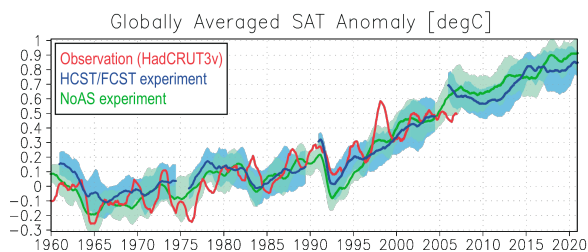


図1: 全球平均地上気温の年平均値偏差(1961-1990年平均値を気候値と定義した)。青線は1960年7月、1975年7月、1990年7月からの14年予測(アンサンブル平均)値(FCST実験)で、緑線は初期値化なし長期気候変化予測実験(NoAS実験; 20C3M-LA-FULLとSRES-A1-FULL)のアンサンブル平均値をあらわす。陰影はそれぞれの標準偏差の幅をあらわす。赤線は観測値(HadCRUT3v)。

4. 十年スケール内部変動の予測可能性

図1は外力応答成分と内部変動成分の和を表現しているはず一方で、そもそもの興味は内部変動成分の予測であった。よって、何らかの方法で外力応答成分を除去してから、予測に対する初期値化の効果を議論する必要がある。例えば、全球平均偏差の変動を外力応答成分とみなすこともできるだろう(e.g., Mantua et al. 1997)。また、NoASアンサンブル平均場を外力応答成分とみなすこともできるだろう。NoAS実験ではどのアンサンブルメンバーも外力応答成分を同じように表現している一方で、(初期値化をしていないために)PDOのような内部変動の位相は各アンサンブルによってバラバラなのでアンサンブル平均場を求める際に大部分は打ち消しあうと考えられる。そのほか、最近では、Signal-to-Noise (S/N) Maximizing EOF手法を用いて外力応答成分を定義する方法も提唱されている(Venzke et al. 1999; Ting et al. 2009)。これはNoAS実験のアンサンブルメンバー数が少ない時に特に有効な手法である。ここでは1958-2017年のNoAS実験結果(10アンサンブル)から得られたS/N maximizing PC1を外力応答成分と定義し、そこからの偏差を予測すべき内部変動成分とみなして、その予測可能性を議論した。

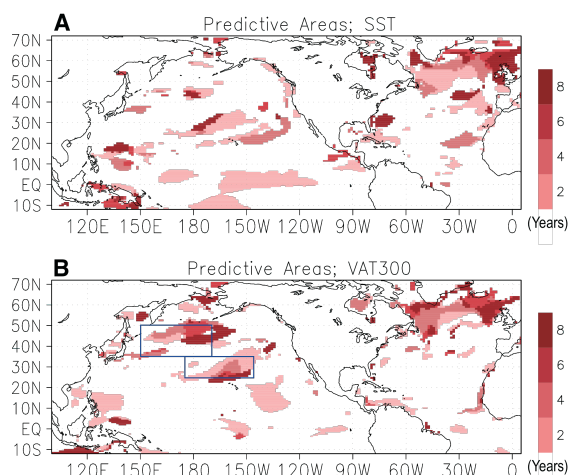


図2: HCST実験において、予測開始から0年後、2年後、4年後、8年後に、(A)SSTと(B)VAT300の5年平均偏差を90%有意に予測できた領域(アノマリ相関が90%有意)。ここでの偏差とはS/N maximizing PC1からのずれとして定義している。有意検定はアンサンブル平均値に対するブートストラップ検定による(Mochizuki et al. 2010)。図Bの青線で囲った領域は、それぞれ黒潮親潮流域および亜熱帯海洋フロント域として定義した領域をあらわす。

各グリッドにおける内部変動成分の偏差について調べると、特に北太平洋中緯度の海洋フロント域で、中緯度海洋の数年スケールの力学応答(循環場変動)や海洋大循環による偏差移流によって、十年スケール自然変動のシグナルが数年以上の予測可能性をもっていることがわかった(図2)。海面から300m深までの平均水温(VAT300)で特に明瞭だが、海面水温(SST)でも有意なシグナルが見られる。黒潮親潮続流域や亜熱帯海洋フロント域(図2B)での領域平均VAT300のRMSEを計算すると、HCST実験のほうがNoAS実験よりも予測開始から数年間は有意に小さかった(図略)。なお、有意なシグナルは北大西洋の高緯度にもみられる。これは大西洋に注目した最近の研究結果(e.g., Keenlyside et al. 2008)とも整合的であり、大西洋子午面循環(AMOC)の予測可能性を示唆するものと考えられ興味深い。

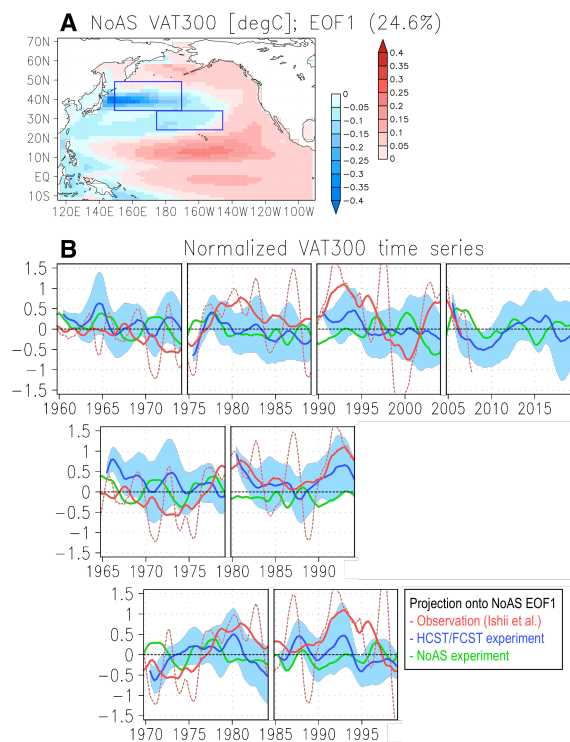


図3: (A)20C3M-LA-FULL実験の10アンサンブルメンバーから定義したVAT300内部変動のEOF1。(B)内部変動による偏差をEOF1(A)に射影したVAT300時系列。緑線はNoAS実験のアンサンブル平均値。青線はHCST/FCST予測実験のアンサンブル平均値で、青陰影が射影時系列のスプレッド。赤線は対応する観測値(実線:5年移動平均、破線:1年移動平均)。いずれの時系列も観測値の標準偏差で規格化してある。

5. PDOの予測可能性

PDOは北太平洋域でもっとも主要な十年スケール内部変動であり、その予測の成否は内部変動成分の予測結果に大きく影響する。その予測可能性を議論するには、何らかの方法でPDO成分を抽出しなければならない。ここではNoAS実験結果(1958-2017年)から定義されるVAT300内部変動(10アンサンブル)に対してEOF解析(15S-70N, 115E-90W)をおこない、EOF1をPDOの空間構造として定義し(図3A)、射影時系列をPDO時係数とした(図3B)。

観測値に見られるVAT300時系列は、いわゆるPDO index(Mantua et al. 1997)によく似ている。NoAS実験のアンサンブル平均場はこの十年スケール変動(内部変動)の位相変化を現実的には表現できない。それに対して、HCST実験のアンサンブル平均場は、観測されたようなPDO時系列変化をある程度表現しているように見える。射影時系列のRMSEを計算すると、PDOの位相が各アンサンブルによってバラバラであるNoAS実験では常にある一定量のエラーがみられるのに比べて、予測開始後数年間のHCST実験のエラーは有意に小さかった(図略)。参考までに、持続予測(persistence prediction)のエラーは予測開始1,2年でNoAS実験と同じ水準まで大きくなった(図略)。

6. 将来予測

望月ほか(2009)に対して、以上のように、外力応答成分やPDOの定義、および有意検定法を変更したが、得られる主要な結論は変らなかった。この初期値化(データ同化)+予測システムを用いた場合、全体的に5年程度、また局所的にはそれ以上の予測可能性があることが改めて確認され、ここでの海洋上層の初期値化は2005年7月からの将来予測に対してやはり大きなインパクトをもっていた。

初めの10年間は全球的な温暖化傾向が緩やかになる(図1)。このとき、PDO時系列は符号が正から負に転じている(図3)。2005年から2008年までの観測データもこのような符号反転を示している。この先の数年間、長期トレンドとしての温暖化が緩やかになるのは、PDOの負位相によって熱帯太平洋で広範囲に渡って気温/水温上昇が抑えられるためである(図4)。ただし、日本付近(北西太平洋)や欧州付近(北大西洋)では、逆に気温上昇幅が大きくなるだろう。

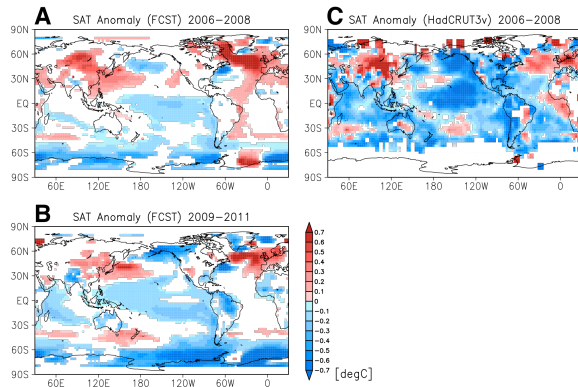


図4: 内部変動による地上気温偏差。FCST実験で予測された(A)2006-2008年平均値、および(B)2009-2011年平均値。(C)観測(HadCRUT3v)による2006-2008年平均値。90%有意な正値/負値のみを描いた。

7.まとめ

比較的簡易なデータ同化手法であっても海洋上層の水温と塩分の初期値化は、PDOなどの内部変動成分をより良く予測するために有効な手段のひとつであることが改めて確認された。PDOには数年程度の予測可能性があり、特に大きなPDOシグナルが観測される海洋フロント域ではより長期の予測可能性があった。

初期値化によるこのような予測スキルの向上は2005年からの将来予測に対してもインパクトをもっている。10年程度の時間スケールに着目した場合には、PDOの(正から負への)符号変化によって(内部変動の影響によって)、ゆったりとした温暖化傾向が、ある領域では強くなり、ある領域では弱くなる。この先10年程度においては、温暖化傾向は東アジアで強くなり、北米沿岸や熱帯域では逆に弱くなる。特に熱帯域の弱化は広範囲にわたるものであり、それによって全球平均地上気温のトレンド的な上昇傾向もゆるやかになるだろう。もっともこれは内部変動による揺らぎであるから、人為起源温室効果ガスによる地球温暖化(外力応答成分)そのものが変化するわけではない。

現在、同化手法やアンサンブル初期摂動作成法の高度化(近本ほか 2009)をおこない、超高解像度大気海洋結合モデルを用いた近未来予測実験も開始した。この結果を解析して、PDOのような大規模現象のみならず、梅雨や台風、真夏日の増加/減少といったextreme eventの議論もおこないたい。また、漁業分野や水災害分野への応用研究も期待される。

謝辞

本研究は「21世紀気候変動予測革新プログラム」としておこなわれたものであり、文部科学省よりサポートを受けた。

参考文献

1. Barnett, D. N., et al., 2006: Quantifying uncertainty in changes in extreme event frequency in response to doubled CO₂ using a large ensemble of GCM simulations, *Clim. Dyn.*, **26**, 489-511.
2. Bloom, S. C., L. Takacs, A. M. da Silva, and D. Ledvina, 1996: Data assimilation using Incremental Analysis Updates, *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1256-1271.
3. 近本喜光, 木本昌秀, 望月崇, 石井正好, 2009: 近未来予測に向けたアンサンブル摂動の開発, 第6回「異常気象と長期変動」研究集会報告.
4. Clark, R., S. J. Brown, and J. M. Murphy, 2006: Modelling Northern Hemisphere summer heat extreme changes and their uncertainties using a physics ensemble of climate sensitivity experiments, *J. Climate*, **19**, 4418-4435.
5. Ishii, M., M. Kimoto, and M. Kachi, 2003: Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimates, *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 51-73.
6. 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.
7. Ishii, M., M. Kimoto, K. Sakamoto, and S. Iwasaki, 2006: Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses, *J. Oceanogr.*, **62**, 155-170.
8. Knutti, R., T. F. Stocker, F. Joos, and G.-K. Plattner, 2002: Constraints on radiative forcing and future climate change from observations and climate model ensembles, *Nature*, **416**, 719-723.
9. Mantua, N. J., S. R. Hare, Y. Zhang, J. M. Wallace, and R. C. Francis, 1997: A Pacific

- interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 1069-1079.
10. Meehl, G. A. et al., 2007: in Climate Change 2007: The Scientific Basis, *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 525-582, Cambridge Univ. Press.
 11. 望月崇, 石井正好, 木本昌秀, 近本喜光, 渡部雅浩, 2009: 近未来地球温暖化予測を念頭においた北太平洋十年スケール変動予測, 第6回「異常気象と長期変動」研究集会報告.
 12. Mochizuki, T., et al., 2010: Pacific Decadal Oscillation Hindcasts relevant to near-term climate prediction, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, doi:10.1073/pnas.0906531107.
 13. 森正人, 木本昌秀, 石井正好, 渡部雅浩, 2010: 大気海洋結合モデル MIROC に見られる PDO, 第7回「異常気象と長期変動」研究集会報告.
 14. 森正人, 木本昌秀, 渡部雅浩, 石井正好, 望月崇, 杉浦望実, 2009: 太平洋10年規模変動の感度解析と予測可能性, 第6回「異常気象と長期変動」研究集会報告.
 15. Murphy, J. M., et al., 2004: Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations, *Nature*, **430**, 768-772.
 16. Nakicenovic, N. et al., 2000: Intergovernmental Panel on Climate Change: Emissions Scenarios, *A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 599 pp., Cambridge Univ. Press, New York.
 17. 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.
 18. Pohlmann, H., J. H. Jungclauss, A. Kohl, D. Stammer, and J. Marotzke, 2009: Initializing decadal climate predictions with the GECCO oceanic synthesis: Effects on the North Atlantic. *J. Climate*, **22**, 3926-3938.
 19. Shiogama, H., T. Nozawa, and S. Emori, 2007: Robustness of climate change signals in near term predictions up to the year 2030: Changes in the frequency of temperature extremes, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, doi:10.1029/2007GL029318
 20. Smith, D. M., S. Cusack, A. W. Colman, C. K. Folland, G. R. Harris, and J. M. Murphy, 2007: Improved surface temperature prediction for the coming decade from a global climate model, *Science*, **317**, 796-799.
 21. Stott, P. A., and J. A. Kettleborough, 2002: Origins and estimates of uncertainty in predictions of twenty first century temperature rise, *Nature*, **416**, 723-726.
 22. Ting, M., Y. Kushnir, R. Seager, and C. Li, 2009: Forced and internal twentieth-century SST trends in the North Atlantic, *J. Climate*, **22**, 1469-1481.
 23. Venzke, S., M. R. Allen, R. T. Sutton, and D. P. Rowell, 1999: The atmospheric response over the North Atlantic to decadal changes in sea surface temperature, *J. Climate*, **12**, 2562-2584.
 24. Zwiers, F. W., 2002: Climate change: The 20-year forecast, *Nature*, **416**, 690-691.