

4. コメント：中緯度大気海洋相互作用の 長期予報可能性へのインパクト

木 本 昌 秀*

1. はじめに

数週間以上の時間スケールでの中高緯度大気の主要な変動モードは、ジェット出口付近での南北双極子様の気圧振動である (PNA (第1図) や NAO)。このようなモードの正、負のおおの極性は、しばしば準定常的な「天候レジーム」を形成する、とされる。モードの力学的なオリジンはよくわかっていないが、大規模ジェット場の不安定性や大規模場と移動性擾乱の集団との相互作用、すなわち、大気の内部分力学にもとめられるとするのが一般的である。カオスを超えて予測可能性を見い出せるか否かは、このようなモードの予測が可能かどうかにかかっている。

大気が複数の天候レジーム間を徘徊する典型的な時間スケールは、また、海洋や陸面といった、大気にとってしばしば「外部条件」と呼ばれる媒体との相互作用が効いてくる時間スケールでもある。飽和水蒸気圧の大きい熱帯では、海面水温の変動が大気循環に大きな影響力があり、したがって長周期の予測可能性が比較的良好なことは知られている。幸いなことに、もっとも顕著な熱帯海面水温変動であるエルニーニョ現象は、少なくとも半年以上の予測可能性を持つと考えられるので、熱帯の長期予報には希望が持てる。一方、中緯度では海洋の大気への影響は相対的に小さいとする悲観的な見解が一般的である。最近では、海面水温を外部境界条件として与えた大気循環モデルのアンサンブル長期積分の結果がこれを裏付けている (Sugi *et al.*, 1997; Rowell, 1998 など)。しかし、最近10年規模の気候変動に関連して、中緯度でも大気海洋間のポジティブフィードバックが可能であることが指摘されるようになった。これは例えば、東西に伸びた低海水温偏差はそれを南北にはさむ双極子様の気圧偏差場を大気に

誘起し、翻って、その気圧偏差場に伴う西風偏差が海洋から大気への潜熱フラックスを増大させてますます海水温偏差を強化する、というものである (第1図)。

このような中緯度での大気海洋相互作用は、海面水温を境界条件として与えた、つまり海洋から大気への一方向の作用のみを考えた予測可能性評価を変えうるものだろうか？ 本稿ではこのことを考察した簡単な数値実験の結果を報告する。

2. モデルと実験設定

用いたモデルは Zephyr と呼ばれる大気大循環モデル (AGCM) である (Held and Suarez, 1978; Schopf and Suarez, 1988)。鉛直に2層しか持たず、軽快に走る。簡便ではあるが、湿潤、放射過程、山岳、海洋との水・熱フラックス交換も含んでおり、ここでの原理的な考察には適当である。このモデルに50 m の海洋混合層を結合した。海流の熱移流効果は、海面水温の気候値が観測値からずれないように場所による大気海洋間の熱フラックス調整値を与えることによって考慮する。この調整は予報変数に依存しないので、偏差場の安定性には影響を与えない。簡単のため積分は永続する1月の条件で行った。海水、土壌水分は non-interactive である。海洋の力学は計算しないので、エルニーニョは生じず、熱帯の海水温変動は観測に比べて著しく抑えられている。

海面水温を海洋混合層の熱収支から計算する「結合モード」と、海面水温を境界条件として与える「非結合モード」でモデルを積分し、結果を比較する。長期積分実験 (A) と予報実験 (B) の2種類を行った。

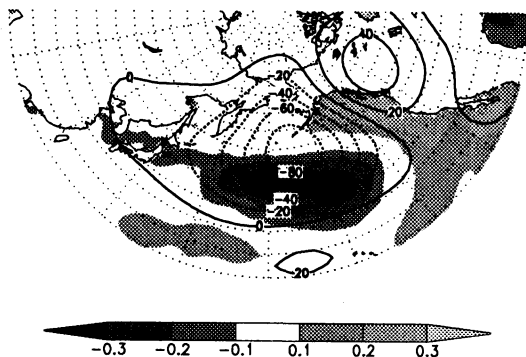
3. 結果

3.1 長期積分実験

実験 A では、大気と海洋混合層を結合した長期 (~2000日) 積分 (結合ラン) とそれとまったく同じ海

* 東京大学気候システム研究センター。

© 1999 日本気象学会



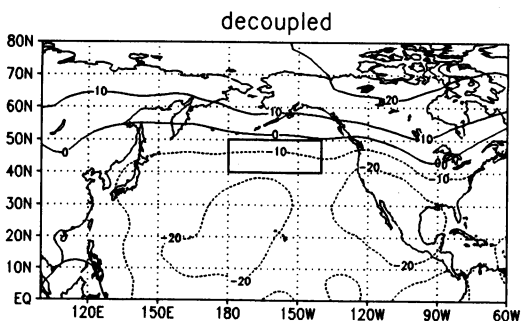
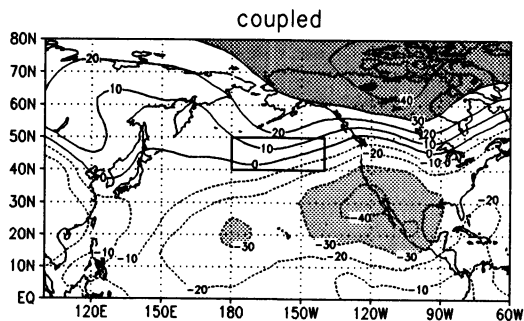
第1図 観測された500 hPa 高度場の回転 EOF 解析によって得られた PNA パターン (等値線; 単位 m) と, その時系列と海面水温観測値の同時回帰係数の分布 (陰影; 単位 $^{\circ}\text{C}$). 冷たい海面水温はアリューシャン低気圧を強化し, 一方低気圧偏差に伴う西風偏差は風速—蒸発の増加をもたらして低水温偏差に貢献する。

面水温 (SST) を境界条件として与えた AGCM の積分結果 (非結合ラン) を比較する。

第2図は北太平洋の SST 偏差 (図で四角く囲った部分) とモデル各グリッドの地表面気圧偏差との相関係数を, 結合ランについては初期ドリフトを除いた1900日分, 非結合ランについてはその1900日間の計算された SST を AGCM に与えたランを初期値を違えて3本行ない, その結果1900 $\times$ 3 = 5700日分のデータから計算したものである。相関係数の絶対値が0.3より大きいところに陰影が施されている。

一見して分るとおり, SST と大気圧場の covariability は結合ランの方が大きく, SST 偏差の key 領域のやや下流に南北双極子様の気圧偏差場が見られ, また, SST での key 領域そのものでは南北の気圧傾度が大きくなっている。これは, 冒頭で述べた風速—蒸発フィードバックが起こっていることを示している。一方, 非結合ランの方は, 結合ランと全く同じ daily の SST を与えているが, 相関が低く, 南北双極子も key 領域での気圧傾度も弱い。ここには示さないが, クロススペクトル解析によれば結合ランの SST と気圧場の covariability は30日以上で顕著である。大気がややリードしている。

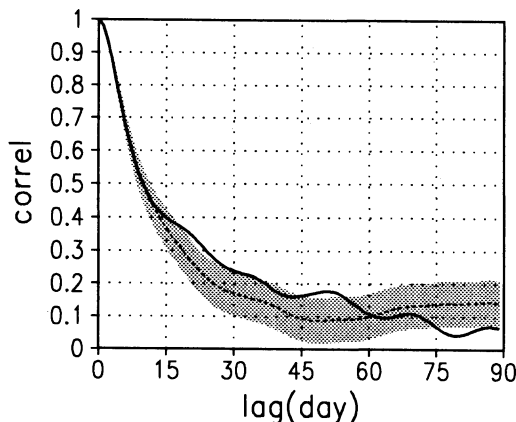
ここでの結果は, SST を境界条件として与える予測可能性評価の解釈に注意を促すものである。しかし, 仮に SST 変動が一方的に大気に強制されて生じており, 海洋はまったく大気に影響を及ぼさないならば,



第2図 北太平洋の矩形領域で平均された海面水温偏差と各地点での地表面気圧偏差の相関係数 (%) の分布. (上) 大気-海洋混合層結合モデル. (下) 結合モデルと全く同じ SST を境界条件として与えた大気大循環モデル. 等値線は30%毎. 陰影は絶対値30%以上。

上の結合ランで見た covariability は必ずしも予測可能性を意味するものではない。

大気海洋結合の有無によって大規模大気圧場の持続性 (persistence) が変わるか否かを見たのが, 第3図である。この図では, 第2図で見た大規模な南北振動モードの persistence を見るため経度160°E から90°W まで平均した65°N と30°N の気圧差 (zonal index) の自己相関係数を結合, 非結合両ランについて計算したものである。結合ランは太い実線で, 非結合ランの結果とその95%区間は破線と陰影で示してある。大気海洋結合のある結合ランの方が20~50日程度のラグで自己相関が有意に大きい。一応「中緯度大気海洋相互作用はシステムの持続性を増す」と言えそうである (註: このモデルは熱帯の SST 変動は minimal) が, パターン (時差) 相関を用いると必ずしもそうは言えず, この結論は, 特定の大規模変動成分のみに適用されることに注意を要する。



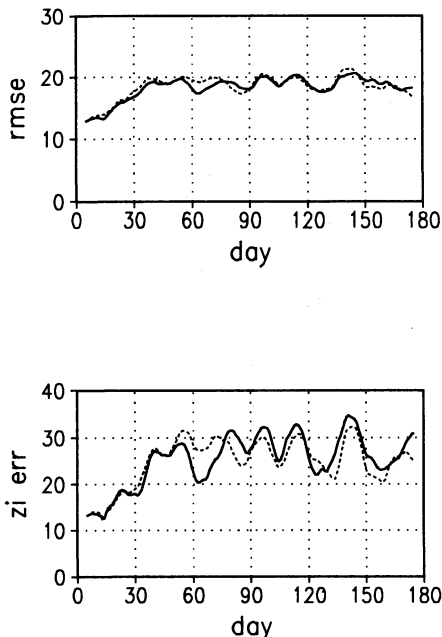
第3図 経度160°E-90°Wで平均した65°Nと30°Nの地表面気圧偏差の差 (zonal index) の自己相関係数。太い実線は大気-海洋混合層結合ラン、破線と陰影は非結合ランの結果とその95%信頼区間を示す。

3.2 予報実験

中緯度大気海洋相互作用によるある種の大規模場の持続性強化は、SST-givenの悲観的な予測可能性評価を払拭するものであろうか？ 同じモデルを用いて、3つの異なった初期値に対して180日の予報（模擬）実験を行なった。初期値の異なる3ケースはさらに、(1) 結合予報と(2) SST（偏差）を初期時刻に固定してAGCMを走らせる、現行の1か月予報と同じ方法（非結合予報）の2種類を試す。また、(1)、(2)の各々は大気場の初期値時刻を僅かにずらせた5メンバーのアンサンブルからなる。従って、予報積分は全部で3（ケース）× 5 × 2 = 30本ある。

第4図は、北太平洋域（10°N-80°N, 160°E-90°W）の地表面気圧の root mean square error, および先に定義した zonal index (ZI) の誤差の時間発展を結合予報と非結合予報で比較したものである。3ケース、各5メンバーアンサンブルの結果なので有意性ははなはだ疑問であるが、80日程度までは僅かに結合予報の方が良くなっている。

第4図は、3ケース平均のスコアであるが、ケース毎に見ると、ZIで表される南北モードの極性の急変するとき—レジームの遷移時に各メンバー予報のバラつきが大きくなる様子が結合、非結合を問わず見られた。仮に大気海洋相互作用がレジームの寿命を存えるのに貢献するとしてもやはり、regime transitionが長期予報最大のネックであることに変わりはない。



第4図 (上)北太平洋域(10°N-80°N, 160°E-90°W)の地表面気圧、(下)経度160°-90°で平均した zonal index (ZI) の root mean square error の時間発展。実線が結合予報、破線が非結合予報。

4. まとめ

熱帯というまでもなく、中高緯度でも大気は海洋と相互作用をしており、ジェットの出発付近では両者間に正のフィードバックが働きのう。したがって、正しい予測可能性の議論は結合系を対象に行なわれねばならない。

ここでは、簡単な大気大循環—海洋混合層結合モデルを用いて、中緯度大気海洋相互作用の長期予報可能性へのインパクトを調べた。微妙ではあるが希望的展望が得られた。混合層モデルならばドリフトを防ぐのも比較的容易なので、1か月以上の力学的予報に取り入れる価値はあろう。

参考文献

- Held, I. M. and M. J. Suarez, 1978: A two-level primitive equation atmospheric model designed for climatic sensitivity experiments, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 206-229.
- Rowell, D. P., 1998: Assessing potential seasonal predictability with an ensemble of multidecadal

GCM simulations, J. Climate, 11, 109-120.
 Shopf, P. S. and M. J. Suarez, 1988: Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model, J. Atmos. Sci., 45, 59-566.

Sugi, M., R. Kawamura and N. Sato, 1997: A study of SST-forced variability and potential predictability of seasonal mean fields using the JMA global model, J. Meteor. Soc. Japan, 75, 717-736.

質疑応答と総合討論

1 質疑応答

1.1 予測可能性概論について

質問: 予測の期間によって誤差の成長の仕方が異なるということはあるか。例えば1週間くらいの予報の場合と同じように1か月予報で誤差が成長しているのか。

余田: 予報の初期には線形的に誤差が成長し、その後非線形性が出てくる。現業の数値天気予報で非線形性が効いてくるまでに1日か2日と普通いわれているが、NCEPの結果をみると6時間くらいでも十分非線形性が出てきていて、線形論で考えられる期間はそう長くない。非線形段階に入れば、誤差予測をアンサンブル予報で行うのが理にかなっている。また、非線形な誤差成長といっても、1週間と1か月ではその様子も異なるであろう。

質問: バロトロピックモデルで、誤差が初期のときと比べると6日後には、誤差の空間スケールが大きくなっているようだが、これには何か本質的な事柄があるのか。

余田: 最大発達する誤差の空間構造は初期にはジェットにほぼ平行であるが、これが立ち上がって振幅も大きくなってくる。このようにジェットの水平シアによる立ち上がりで空間スケールが大きくなるというのは、最適励起とかOrrのメカニズム(シアのある流れで擾乱が一時的に増幅する機構。詳細はLindzen, 1990などを参照)とかで考えている状況と同様である。局所的に強いジェットがあって、そのジェットの入り口付近に擾乱を与えるとそれが急成長するようなイメージだと思う。

1.2 データ同化と初期値感受性について

質問: 誤差成長で、簡単なローレンツモデルを使った場合と現実的なECMWFモデルを使った場合とで、ローレンツモデルでは初期に誤差が減っているのに対

し、ECMWFモデルでは後半で誤差が減っているようにみえる。この理由は何か。

露木: ローレンツモデルでは真値がわかっているのに対し、現実モデルではわかっていない。それゆえ、現実モデルでは真値の推定値である初期値に対してスコアをとるので必然的に初期誤差が0になっている。ゆえに初期誤差が減るようにはみえない。これは真値が分からない以上避けられない。通常、推定値に対する予報のスコアの向上をもって、初期値がより真値に近づいていると信じている。

1.3 予測可能性とアンサンブル予報について

質問: 短期予報で使う降水確率とアンサンブル予報で言う降水確率とはどう違うのか。

高野: 短期予報で言う降水確率は、数値モデルから予想された大気の状態と実際の降水現象との統計関係をもとに、ただ1個の数値予報結果から決定論的に決められたものであり、本来の意味は、総観規模の予報が適中したときにどれだけの確率で雨が降るかを表すもので、翻訳技術の1つと考えられる。総観場が確定していても天気には不確実性があることを考慮して導入されている。一方、アンサンブル予報で言う確率は、そもそも数値予報が当たらない、予測不可能である場合の確率である。

質問: 異なる予報センターのアンサンブル予報を比較した場合、その分散はそれぞれのアンサンブル予報の分散よりも大きいのか、それとも小さくなるのか。例えば、気象庁の予報だけでなく他センターのアンサンブル予報を利用することによってよりよい確率予報を得ることができないであろうか。うまくやれば経済的に統計的予報が出せるので有利であると思うが。

高野: UK Met OfficeとECMWFとで実験されている。数年前はモデル毎の違いが大きくて難しいと考えられていた。最近の状況はわからない。