

エルニーニョ予測モデルによる東アジアの夏の予測

～1 月末初期値の夏（JJA）の予測～

成瀬由紀子、高谷祐平、佐藤均、伊藤明、新保明彦、前田修平（気象庁・気候情報課）

安田珠幾（気象研究所・気候研究部）

1. はじめに

気象庁にて現業運用中の季節アンサンブル予報システムは、大気モデルを用いたトゥー・ティア法（2段階法）¹を採用している。その予測精度(Naruse and Maeda 2008)は、ヨーロッパ中期予報センター(ECMWF)など諸外国の気象現業機関が運用しているモデルの精度²と遜色ないが、多くの機関が大気・海洋結合モデル（以下、結合モデル）による季節予報を開始する昨今、気象庁においても、結合モデルによる季節予報の実用化は重要な開発課題の一つである。このため、気候情報課と気象研究所で協力しつつ、結合モデルの開発・改良に精力的に取り組んでいる。

開発の一環として、平成 19 年度には気象研究所において結合モデルによる本格的な季節予報実験が実施された。この結合モデルは、2008（平成 20）年 3 月より現業運用を開始したエルニーニョ予測モデルである。この実験データの 1 月末初期値の夏（JJA）の予測について解析を行った結果、東アジアの夏の天候に関係がある、①亜熱帯北西太平洋域（以下、北西太平洋）の海面更正気圧（以下、SLP）と②日本の東海上 500hPa 高度（以下、Z500）の精度が、現業運用中の季節予報モデルよりも大きく改善することがわかった。本報告では、この結合モデルの予測精度を報告するとともに、なぜこれらの変動が予測できるのか、①に関してはインド洋の海面水温を介したエルニーニョ現象の遅れ影響を示した Xie et

al. (2008)を、②に関しては夏の帯状平均高度場の予測可能性の高さを示した Schubert et al. (2002)を参照にしつつ議論する。

2. 季節予報実験の概要

結合モデルによる季節予報実験は、WCRP が実施している季節予報研究のための相互比較実験プロジェクト³への参加も目的として行われたものである。このプロジェクトは、最新の結合モデルによる予測結果の相互比較を行うことにより、今後の開発課題などを明らかにすることを目的としており、ECMWF、イギリス気象局(UK Met Office)など各国気象機関や研究機関が参加している。

2.1 大気・海洋結合モデル

使用した結合モデルは、現行運用中のエルニーニョ予測モデル(JMA/MRI-CGCM)⁴である。大気モデルは、気象庁統一全球大気モデル(GSM0603)で解像度は TL95L40（水平解像度 180km）である。海洋モデルは、気象研究所共用海洋大循環モデル(MRI.COM; 石川ほか 2005)である。なお、本結合モデルによるエルニーニョ現象の予測精度については安田ほか(2007)を参照していただきたい。

2.2 実験設定

12 時間間隔の初期値を用いた LAF 法による 10 メンバーのアンサンブル予報実験である。1 月末、4 月末、7 月末、10 月末を初期値とした 7 か月予報が

¹ トゥー・ティア法とは、予測海面水温を何らかの方法で作成し、その予測海面水温を境界条件として大気モデルを実行し、予測を行う方法である。一方、大気と海洋の予測を同時に行う大気・海洋結合モデルは、ワン・ティア法（1段階法）と呼ぶ。

² 国際標準検証システム(SVSLRF)に基づく検証結果の詳細は次の URL を参照。

<http://www.bom.gov.au/cgi-bin/climate/wmo.cgi>

³ World Climate Research Program Task Force on Seasonal Prediction (TFSP) Seasonal Prediction Experiment. 詳細は次の URL を参照。

http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/SF_TFSP.html

⁴ エルニーニョ予測モデルの詳細は次の URL を参照。

http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/el_nino/jmamri_cgcm_doc.html

表 1. 結合モデルと季節予報モデルの実験の仕様

	エルニーニョ予測モデル	現行季節予報モデル
AGCM	TL95L40 (GSM0603)	TL95L40 (GSM0703C)
OGCM	MRI.COM	—
メンバー数	10 (LAF 法、12 時間間隔)	11 (SV 法)
大気初期値	JRA-25	JRA-25
海洋初期値	海洋データ同化	—
SST	1-tiered method	2-tiered method (初期値+気候値+予測)、不確実性考慮
海氷	気候値	気候値
陸面初期値	気候値	気候値
CO2 経年変化	あり	なし

行われ、ハインドキャスト期間は 1979 年から 2006 年 (28 年) である。本報告では、この 4 つの初期値のうち、1 月末初期値の実験結果の 5 から 7 か月目にあたる夏 (JJA) について検証した結果を示す。また、現行季節予報モデル (GSM0703CTL95L40) ⁵ のハインドキャストデータと精度比較を行うため、検証には 1984 年から 2005 年 (22 年) を使用した。大気初期値は JRA-25 再解析データ (Onogi et al. 2007) を使用し、海洋初期値は海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM-G) ⁶ による出力を使用している。海氷は、海氷解析値の月平均気候値を時間内挿したものであり、陸面初期値は ERA-15 再解析データを外部強制としたオフライン陸面モデルで解析した月平均陸面気候値である (徳広 2001)。また、この季節予報実験では、CO₂ の経年変動が考慮されている。現行季節予報モデルのハインドキャストでは考慮していない。表 1 に、結合モデルと現行季節予報モデルの季節予報実験の仕様を示す。なお、現行季節予報モデルに与える SST 偏差は以下の①と②の加重平均であり、重みはリードタイムに依存し、長いほど①の重みが減り、②の重みが増す。本報告で述べるリードタイム (4 か月～6 か月) では①の重みはほぼ

0 である。

- ① 予報初期日の前 30 日平均の SST 偏差、
- ② エルニーニョ予測モデルにより予測したエルニーニョ監視海域の SST (NINO.3) から統計的に推定した全球 SST 偏差 (線形トレンド除去後の NINO.3 からの線形回帰) + 線形トレンド

2.3 検証データ

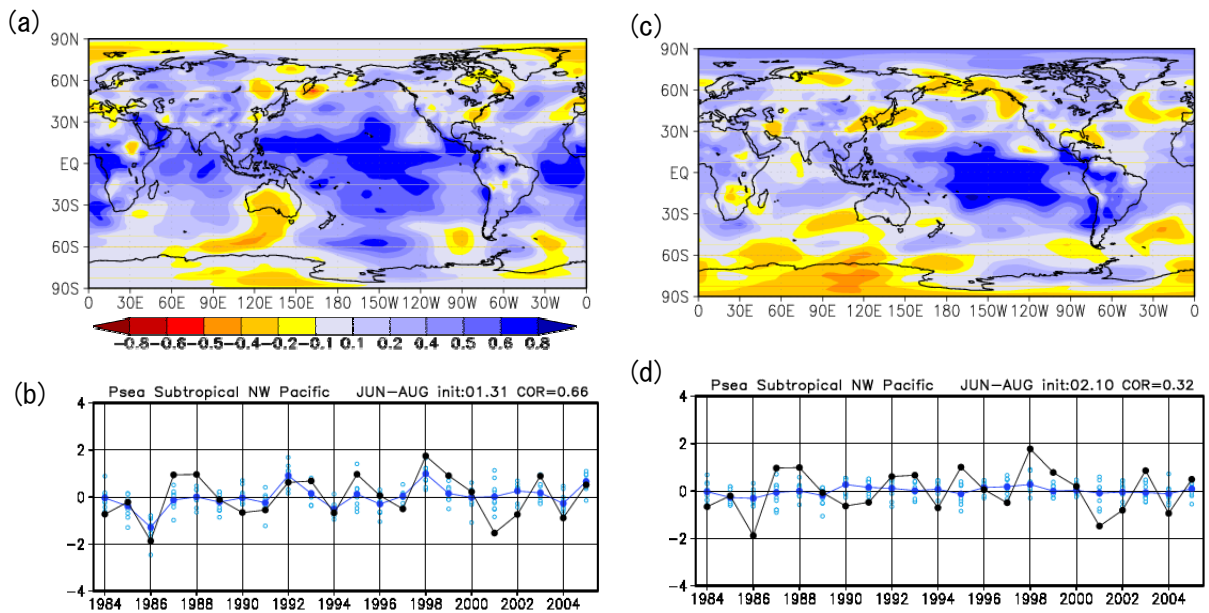
大気循環場には、JRA-25 再解析データおよび気候解析用の解析値 (JCDAS) を用いる。降水量には GPCP (Robert et al. 2003)、SST には COBE-SST (Ishii et al. 2005) を用いた。解析値の偏差を求めるために用いた平年値は、各解析値データの 1984 年から 2005 年の 22 年平均である。一方、モデルの偏差を求めるために用いた平年値は、ハインドキャストの 22 年を平均したモデル気候値である。

3. 結果

気象庁の季節予報の現業でよく使用される物理量である、SLP、Z500 の結果を示す。検証は全てアンサンブル平均について行った。結合モデルは 1 月末初期値、現行季節予報モデルは 2 月 10 日初期値の夏 (JJA) に対応する 3 か月平均場の成績である。第 1 図 (a, c) は、SLP の年々変動のアノマリー相関 (以下、ACC) である。インド洋から太平洋西部にかけて改善がみられ、特に北西太平洋付近の成績が顕著に改善している。第 1 図 (b, d) は、北西太平洋指数

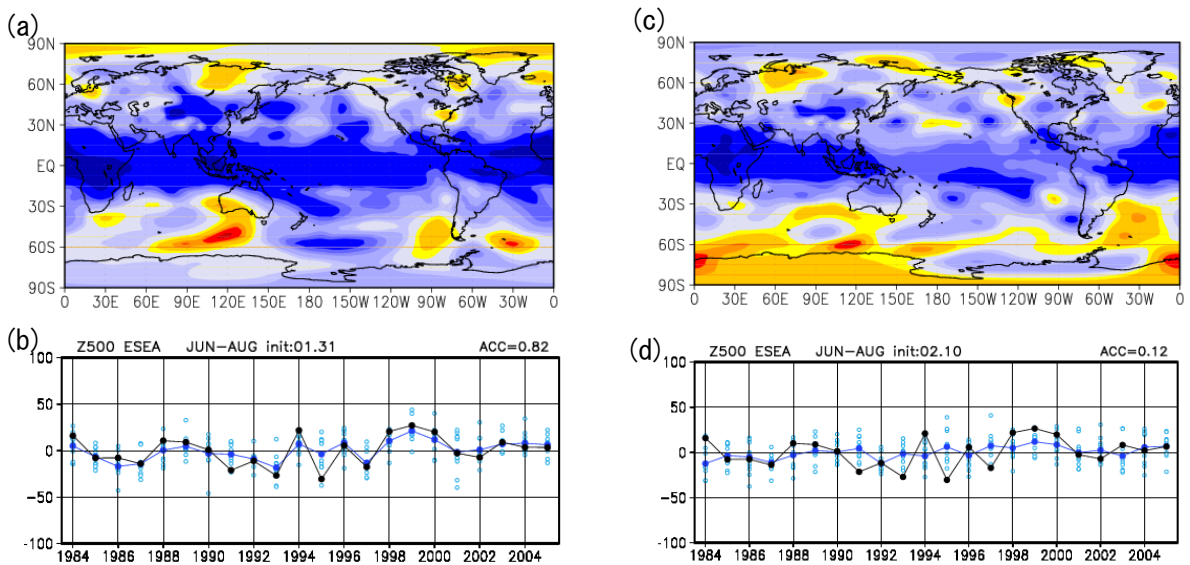
⁵ 現行季節予報モデルの詳細は次の URL を参照。
<http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/model/outline/index.html>

⁶ 海洋データ同化システムの詳細は次の URL を参照。
http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/elnino/move_mricom_doc.html



第1図 SLPの予報成績

左図(a, b)は結合モデル。右図(c, d)は現行季節予報モデル。上図(a, c)は格子毎の年々変動に対するアノマリー相関。下図(b, d)は亜熱帯北西太平洋の平均偏差時系列図。



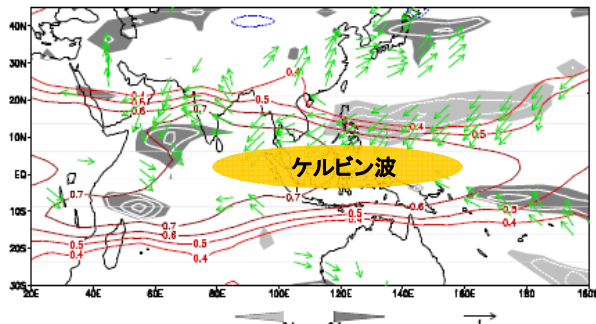
第2図 Z500の予報成績

図の配置は第1図と同じ。ただし、下図(b, d)は東方海上高度(40N, 140-170E)の平均偏差時系列図。

([130-170E, 10-25N]の偏差平均)の時系列図である。時系列のACCは、現行季節予報モデルは0.32であるのに対し、結合モデルは0.66と5%の危険率で有意な相関となった。また、各年でみると、1986年、1998年など大きな偏差の予測も出来ている。この結果から、夏の小笠原高気圧の予測精度や日本の夏の降水量の予測精度の向上などが期待できる。第2図(a, c)は、Z500のACCである。太平洋熱帯域と日本の東海上を中心とする中緯度帯(30°N~50°N)の成績が顕著に改善している。第2図(b, d)は、日本

の東方海上高度指数([140-170E, 40N]の偏差平均)の時系列図である。時系列のACCは、現行季節予報モデルは0.12であるのに対し、結合モデルは0.82と大幅に改善している。東方海上高度と日本の地域平均気温平年差には有意な相関がある(若林と濱田2004)ので、結合モデルにより、日本の気温の予測精度向上が期待される。

4. 北西太平洋域のSLPと日本の東海上のZ500の予測



第3図 冬(NDJ)のNino3.4指数と翌夏(JJA)の対流圏気温(実線: 850-250hPa)、降水量(陰影)と地表風(矢羽)の相関

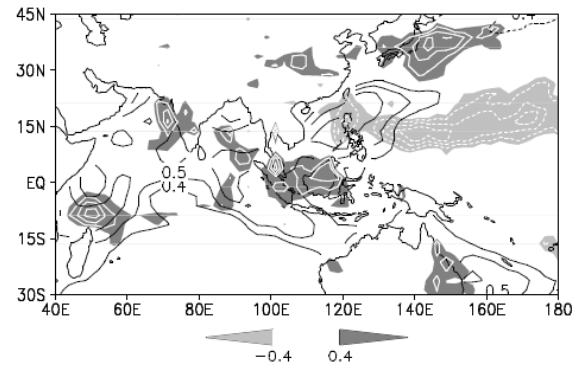
Xie et al. (2008)より転載。

第1,2図で、結合モデルと現行季節予報モデルのSLPとZ500の予測精度を示した。ここでは、結合モデルで顕著に改善していた、①SLPの北西太平洋域と②Z500の日本の東海上に着目し、これらが予測できた要因について検討する。

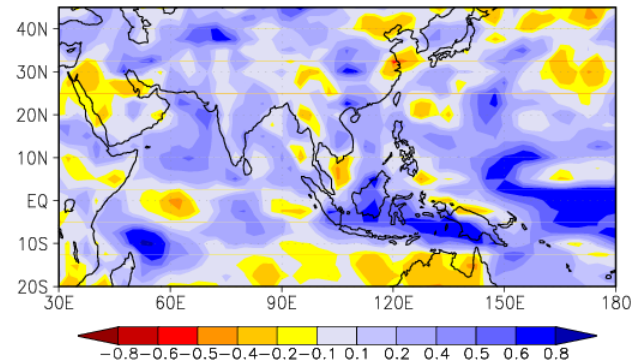
4.1 SLPの北西太平洋域の予測について

Xie et al. (2008)は、春に終息したエルニーニョ現象の影響がインド洋の高海面水温偏差として翌夏まで残り、その海面水温偏差が東アジアの夏の気候にとって重要な北西太平洋高気圧の動向に影響を与えることを、データ解析や線形化モデルを用いて示した。そのメカニズムは以下のとおりで、①インド洋の高海面水温偏差に関係する対流活動で大気が加熱され、②応答として松野-ギル応答的な循環が形成され、赤道に沿ってケルビン波が西部太平洋まで伸び、③それに伴うフィリピン東方海上での下層発散と対流抑制による冷却で、北西太平洋高気圧が強化される(西に伸びる)(第3図、Xie et al. (2008)より転載)。エルニーニョ現象の影響が、インド洋の海面水温の変動を介して遅れて東アジア域に現われる、ということである。もし、このメカニズムが正しければ、それを結合モデルで再現・予測できるはずである。そこで、本節では、Xie et al. (2008)で論じられている、春に終息したエルニーニョに遅れて昇温するインド洋のSSTと、インドから西部太平洋、東アジア域との循環を参考に、結合モデルによる予測結果について議論する。

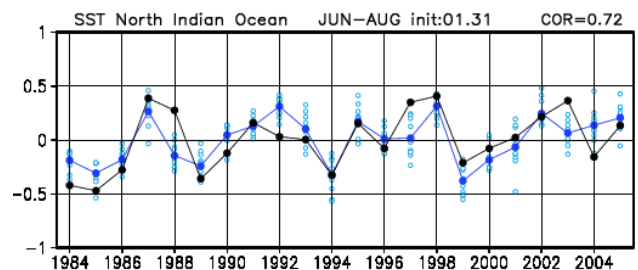
第4図は、夏の北西太平洋高気圧指数



第4図 夏の北西太平洋高気圧指数(NWP:U850[(27.5-32.5N)-(10-15N), 120-150E]と、降水量(陰影)とSST(実線)の相関
実線は0.1毎。Xie et al. (2008)より転載。

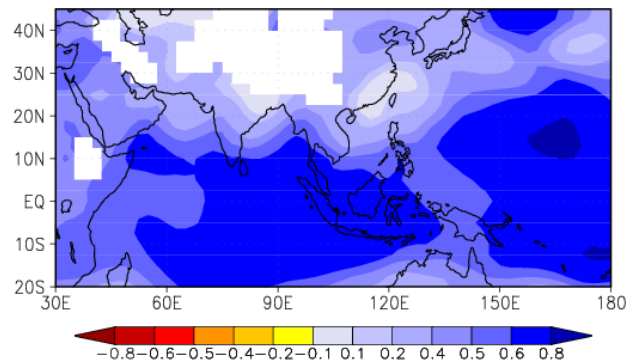


第5図 結合モデルの降水量のアノミー相関



第6図 結合モデルのSSTの北インド洋指数(40-100E, 0-20N)の時系列

1月末初期値予測の夏(JJA)の結果。●が解析値、●がアンサンブル平均値、○は各メンバー。横軸は検証年を表す。図の右上の数値は予報値と解析値の年々変動の相関係数。



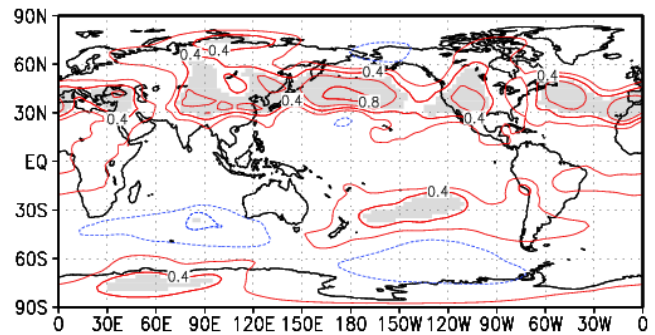
第7図 結合モデルの対流圏気温(850-300hPa)のアノミー相関

(NWP:U850[(27.5-32.5N)-(10-15N),120150E])と、降水量と SST の相関である (Xie et al. (2008)からの転載)。夏の北西太平洋高気圧は、降水量とは、フィリピン付近で負、海洋大陸からインド洋にかけて正の相関があり、SST とは、北インド洋から南シナ海にかけて正の相関がある。北西太平洋高気圧は、これらの領域の SST と降水量と関連して変動する。第5図に、結合モデルの降水量の ACC を示す。現行季節予報モデルでは、ベンガル湾やアラビア海の成績は負であったが (図略)、結合モデルでは 0.4 以上となった。この他、フィリピン東方海上や海洋大陸など第4図の北西太平洋高気圧と降水量との相関が高い領域で、結合モデルの成績が大きく改善した。次に第6図に、結合モデルの SST の北インド洋指数 ([40-100E,0-20N]の偏差平均)の時系列図を示す。年々変動のアノマリー相関は 0.72 と高い相関であり、1987 年、1994 年、1998 年など偏差の大きな年の予測がよくできている。一方、現行季節予報モデルでは、0.56 と有意な相関ではあるが、年々変動は小さく、大きな偏差の予測はできていない (図略)。第7図は、結合モデルの対流圏気温 (850-300hPa) の ACC である。インド洋から海洋大陸にかけて、第3図と同様に、松野-ギル応答のような形で相関の高い領域が広がっている。このように、結合モデルでは北西太平洋高気圧の変動と関係する領域の SST、降水量、加熱によって強制される赤道波の予測精度が向上した。

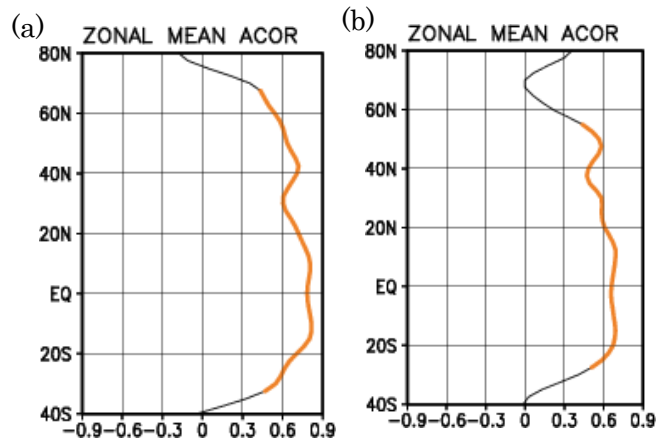
以上の結果は、結合モデルで顕著な改善がみられた北西太平洋域の SLP は、Xie et al. (2008)のメカニズムによる変動の予測向上が一つの要因であることを示唆するものである。その要点は、エルニーニョに遅れて昇温するインド洋の予測が出来るようになったことである。

4.2 Z500 の日本の東海上の予測について

第8図は、Z500 の帯状平均(40N)と Z500 の全球格子との、解析から求めた ACC である。中緯度の帯状平均高度場と日本の東海上高度場の相関は 0.8 であり、他の領域よりも特に強い相関がある。このことは、日本の東海上の高度は、帯状平均高度場の変



第8図 Z500 の帯状平均(40N)と Z500 の全球格子との解析より求めたアノマリー相関



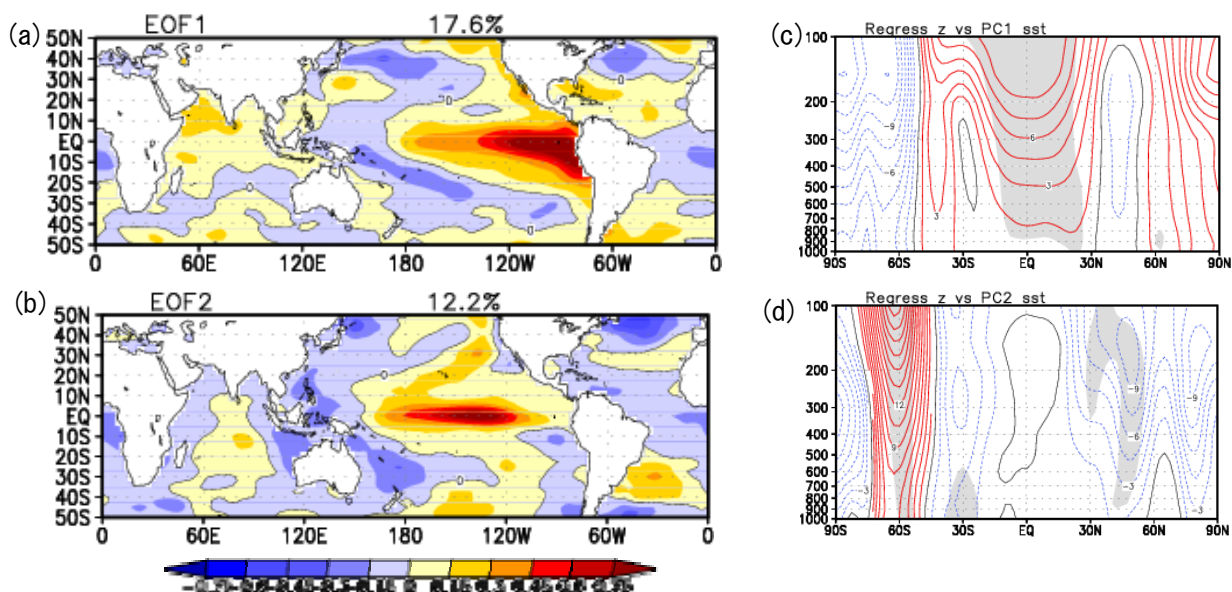
第9図 Z500 の帯状平均のアノマリー相関

左図(a)は結合モデル。右図(b)は現行季節予報モデル。橙色は5%危険率で有意を示す。

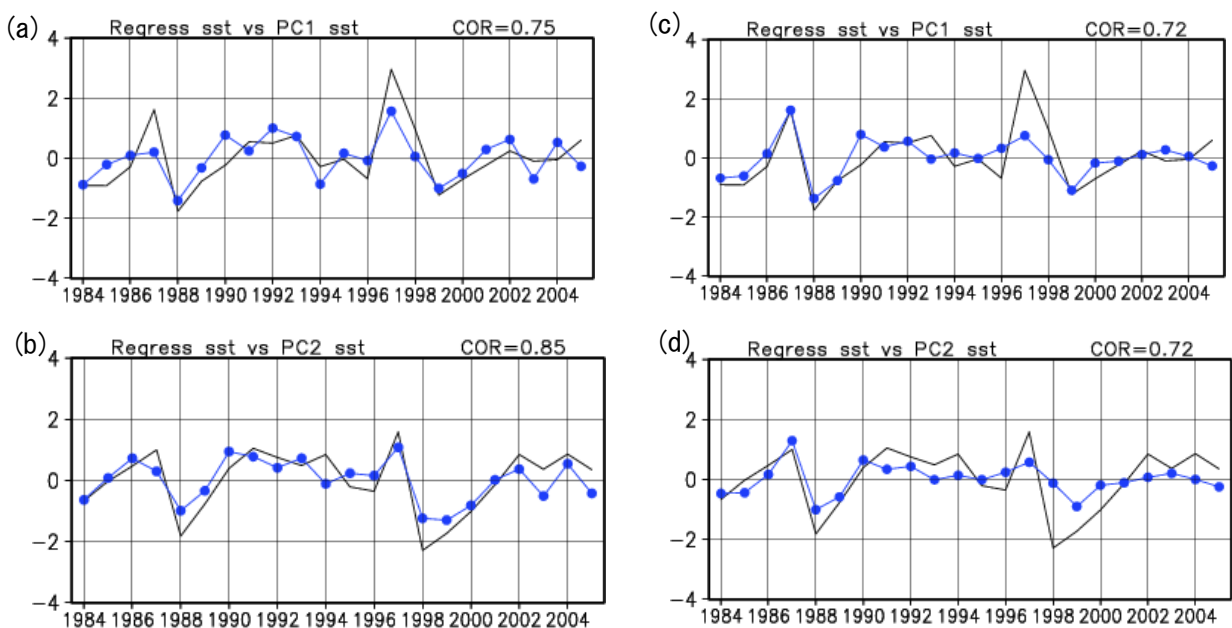
動と深く関係して変動することを示している。一方、Schubert et al. (2002)は、観測された海面水温分布を与えた大気モデルによるアンサンブル数値予報実験の結果から、夏(JJA)の大気循環場の変動のうち帯状平均成分は予測可能性が高いことを示した。このことは、結合モデルで帯状平均高度場に影響を与える海面水温分布がよく予測できれば、帯状平均高度場は予測可能であることを示している。これらの結果から、本節では、中緯度の帯状平均高度場の予測に着目し議論していく。

第9図は、Z500 の帯状平均の予測精度である。現行季節予報モデル(b)に比べ、結合モデル(a)の方が熱帯、亜熱帯、中緯度ともに精度が高く、特に北半球中緯度の精度向上が顕著である。予測可能性の高い帯状平均高度場が、結合モデルでは実際に予測できたということである。

また、Schubert et al. (2002)は、夏の帯状平均高度場は、熱帯・亜熱帯型変動と中緯度型変動の2つ



第 10 図 解析から求めた夏(JJA)の SST 偏差の回転 EOF (左:a, b) と各主成分スコアに対する帯状平均高度場の線形回帰 (右:c, d)
陰影は 5%危険率で有意な領域を示す。



第 11 図 解析の SST の PC 1、PC2 へ線形回帰した解析の SST に対するモデルのスコア

実線は解析のスコア、●はモデルのスコアを表す。左図(a, b)は結合モデル。右図(c, d)は現行季節予報モデル。
上図(a, c)は PC1、下図(b, d)は PC2 へ線形回帰したスコア。

に分類でき、この 2 つのパターンは大規模な SST 偏差パターンと関連して変動することを示した。第 10 図は、解析から求めた夏(JJA)の SST の回転 EOF (a, b) と、これらの主成分スコア(PC1, PC2) に対する帯状平均高度場の線形回帰(c, d)である。EOF1 はエルニーニョ現象に関係した偏差パターンで、EOF2 もエルニーニョ現象に似ているが赤道域日付変更線のやや東にピークがあるパターンである。PC1 へ回帰した

第 10 図(c)をみると、熱帯から亜熱帯にかけて相関が高く(熱帯・亜熱帯型変動)、PC2 へ回帰した第 10 図(d)では中緯度帯との相関が高い(中緯度型変動)。結合モデルと現行季節予報モデルの PC1, PC2 スコアの予測精度をみると、両スコアとも結合モデルの方がより高い精度となっており、特に PC2 スコアの ACC は 0.85 (現行季節予報モデルは 0.72) であった。また、結合モデルではより大きな振幅の予測も出来る

ようになった（第 11 図）。

以上の結果より、日本の東海上の Z500 の改善は、SST の PC2 スコアの精度向上による、帯状平均高度場の中緯度型変動の予測精度の向上が一つの要因として考えられる。

5. まとめと議論

気象庁で現在運用しているエルニーニョ予測モデル（結合モデル）による季節予報実験の 1 月末初期値の夏（JJA）の予測について検証を行った。その結果、東アジアの夏の天候と関連のある北西太平洋域の SLP と日本の東海上の Z500 の精度が、現行季節予報モデルよりも大きく改善することがわかった。これらの改善により、日本の夏の予測精度の向上や、台風発生数の予測精度もあがることが期待できる（平原ほか 2008）。

また、この 2 つの改善要因について Xie et al. (2008) と Schubert et al. (2002) を参照しつつ検討し、①北西太平洋域の SLP の精度向上には、エルニーニョに遅れて昇温するインド洋の海面水温とその影響の予測精度向上、②日本の東海上の Z500 の精度向上には、大規模な海面水温パターン（PC2）の精度向上に伴う帯状平均高度場の中緯度型変動の予測精度向上、がそれぞれ寄与していると述べた。

結合モデルと現行季節予報モデルの大きな違いは、SST 予測手法がワン・ティア法なのかトゥー・ティア法なのかという点である。当然、これらの改善要因には SST の予測精度が大きく関係している。第 2.2 節で述べたとおり、現行季節予報モデルに与える SST 偏差は、予測のリードタイムが長い場合には、ほぼ、典型的なエルニーニョ現象と同時に変動する全球の SST 偏差と長期トレンドしか考慮されていない。このため、全球の SST 分布におけるエルニーニョ現象の遅れ影響とその大気循環場への影響は表現できない、という弱点がある。一方、結合モデルではエルニーニョ現象の遅れ影響（そのうちの予測可能な成分）は原理的には予測できるはずで、実際に、第 4.1 節で示したようにインド洋を経由した遅れ影響は予測できた。また、第 4.2 節で示した PC2 のように、典型的なエルニーニョ現象とは異なる

SST 偏差の変動パターン（とその大気への影響）も、現行季節予報システムの SST の与え方ではうまくは予測できない。しかし、もしそれが予測可能な変動ならば、結合モデルを用いれば予測できるはずで、実際に第 9, 10, 11 図に示したように PC2 とそれに関係する北半球中緯度の帯状平均高度場はよく予測できた。このように、少なくともリードタイムが数か月以上の長い予測に関しては、結合モデルを直接用いたワン・ティア法の導入のメリットは大きいと考えられる。

第 4.2 節では、Schubert et al. (2002) の帯状平均高度場の熱帯・亜熱帯型と中緯度型変動を参考に議論し、結合モデルの海面水温の PC2 スコアの改善が、帯状平均高度場の中緯度型変動の予測精度向上につながったことを示し、それに関連し日本の東海上の高度の予測精度が向上したことを示唆した。しかし、日本の東海上の高度は、帯状平均場の変動のみでなく、シルクロードパターン（Enomoto et al. 2003）のようなアジアジェット沿いの波束や PJ パターン（Nitta 1987）の変動とも関連して変動する。シルクロードパターンの形成に関わるアジアモンスーン域の降水や PJ パターンの形成に関わるフィリピン東方海上の降水の精度も向上しており、それらと東海上の高度の予測精度との関係についても、今後調べる必要がある。

また、第 4.2 節では、海面水温の PC2 と中緯度の帯状平均高度場の変動との関係のメカニズムについては述べなかった。岩崎ら（2009）は、夏の帯状平均高度場の変動メカニズムを帯状平均降水量の変化とハドレー循環の変化から説明しており、中緯度型変動には、海面水温の PC2 の変動に伴い、平年よりも北偏（5N-15N の帯状平均降水量のピークが 15N-25N へ）した帯状平均降水量が関係する、と報告している。確かに、帯状平均降水量の ACC をみると、15N-25N 帯の成績は、結合モデルで大きく改善しており（図略）、岩崎ら（2009）の主張するプロセスで、中緯度型変動の予測が改善した可能性がある。この点についても、今後、詳しく調べたい。

本報告では、結合モデルの導入により夏の季節予報の精度が向上する可能性を示した。しかしながら、

現行季節予報モデルに比べ系統的な誤差が増える、リードタイムが短いと精度が低いなど、現業化に向けて解決すべき課題はまだ多い。これらの課題を解決するため、現在も結合モデルの改良を進めているところである。

6. 参考文献

- 石川一郎, 辻野博之, 平原幹俊, 中野英之, 安田珠幾, 石崎廣, 2005: 気象研究所共用海洋大循環モデル (MRI/COM) 解説, 気象研究所技術報告, **47**, 1-189.
- 岩崎聡子, 山崎孝治, 渡部雅浩, 2009: 帯状平均場の予測可能性, 平成 20 年度「異常気象と長期変動」研究集会報告.
- 徳広貴之, 2001: 陸面モデルオフライン実験の検証, 平成 13 年度季節予報研修テキスト, 気象庁気候・海洋気象部, 51-57.
- 平原翔二, 後藤敦史, 前田修平, 2008: 夏季のインド洋 SST が日本に与える影響について, 長期予報と大気大循環, 長期予報研究連絡会.
- 安田珠幾, 高谷祐平, 松本聡, 2007: 気象庁次期エルニーニョ予測システムの開発, 平成 18 年度「異常気象と長期変動」研究集会報告, 65-69.
- 若林正夫, 濱田啓次, 2004: 大規模循環場と日本の天候, 平成 16 年度季節予報研修テキスト, 気象庁気候・海洋気象部, 40-64.
- Enomoto, T., B. J. Hoskins and Y. Matsuda, 2003: The formation mechanism of the Borin high in August. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 157-178.
- Ishii, M., A. Shouji, S. Sugimoto, and T. Matsumoto, 2005: Objective analyses of sea-surface temperature and marine meteorological variables for the 20th century using ICOADS and the Kobe Collection. *Int. J. Climatology*, **25**, 865-879.
- Naruse, Y. and S. Maeda, 2008: Sensitivity of Long-Range Forecast Skill Score to Verification Data⁷. Third WCRP International Conference on Reanalysis.
- Nitta T., 1987: Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the northern hemisphere summer circulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **65**, 373-390.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007: The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Robert F. A., G. J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, Ping-Ping Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, P.

- Arkin and E. Nelkin, 2003: The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *J. Hydrometeor.*, **4**(6), 1147-1167.
- Schubert, S. D., M. J. Suarez, P. J. Pegion, M. A. Kistler and A. Kumar, 2002: Predictability of Zonal Means during Boreal Summer, *J. Climate*, **15**, 420-434.
- Xie, S. P., K. Hu, J. Hafner, H. Tokinaga, Y. Du, G. Huang and T. Sampe, 2008: Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Nino, *J. Climate*, submitted.