

301：302（温暖化予測；CMIP3；気候モデル再現性評価）

## 4. 温暖化予測をいかに捉えるか

—マルチ気候モデル比較によるアプローチ—

高 藪 縁\*

### 1. はじめに

近年、気候変動に関する政府間パネルの第4次評価報告書（IPCC AR4, IPCC 2007）が注目を集め、地球温暖化は市民生活の中でも現実的に語られるようになった。そして気象学・気候学に携わる者は、地球温暖化に伴って実際にどのような変化が私たちの身の回りで起きるかという問いに対する具体的な答えを社会から要請される時代になった。

IPCC AR4では、過去100年の全球平均地上気温の上昇は約0.7度と見積もられ、21世紀末までの100年には、A1Bシナリオ<sup>(後注)</sup>で1.6～4.4°Cの上昇が見込まれている。このような平均気温の上昇は、太陽光の入

射、雲や地表面でのエネルギーの吸収や散乱、雨が降る風が吹くといった、大気海洋の様々な（調節）過程を経て達成される準バランス状態のゆっくりとした変化である。

ところが、実際の私たちの生活を左右する日々の天候は、低気圧の強さや発達場所、台風の強さや経路、熱波や寒波、豪雨や干ばつといった、より短周期の気象や海洋の現象（海象とよぶ）の現れ方により大きく左右される。そしてこれら気象・海象の振幅は、ゆっくりとした気候の変化トレンドに比べて、通常、遙かに大きい。だから、温暖化時にどのような変化が起きるかという問いに対しては、このような短周期の気象・海象の将来変化についての見通しが必要である。

### 2. マルチ気候モデルとは

将来の気候変化の理解や予測のためには、世界各国

\* 東京大学大気海洋研究所。  
yukari@aori.u-tokyo.ac.jp  
© 2012 日本気象学会

の機関において開発された気候モデルが利用されている。前述のIPCC AR4のために行われた気候モデル実験出力データは、PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison; 気候モデル診断と相互比較プログラム) により世界気候研究計画(WCRP) 第3次結合モデル相互比較プログラム(CMIP3) の成果として集約されている。

ここでは、マルチ気候モデルデータセットとして、このCMIP3データを考える。

このデータセットには、25種類もの気候モデルによる20世紀結合実験および21世紀シナリオ実験の指定の出力変数が、指定の時空間分解能で納められている。基本的には月平均値および日平均値が集約されている。月平均値については海洋・大気・陸面それぞれ20個・43個・10個の変数が、日平均値については大気の18変数が、100~300km程度の水平分解能で納められている。一部の変数には3時間値も存在する。また、モデルによってはアンサンブルメンバーの出力も提出されている。20世紀再現実験は1850~2000年、21世紀シナリオ実験については、SRES A1B および B1の各排出シナリオに基づく2001~2300年(一部は2200年まで)の予測実験結果及びA2の2001-2100年が納められている。詳細は[http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about\\_ipcc.php](http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php)を参照されたい。

### 3. マルチモデル解析による現象の理解

気候モデルには、様々な不確定要素が含まれている。例えば、雲や雨や境界層現象のように気候モデルの格子間隔では表現できない現象も、気候状態を決める重要な要素であり、その効果を大きな格子間隔の変数で表現(パラメタライズ)しなければならないが、その手法は必ずしも確立されていない。また、気候モデルの基本となる方程式は、初期の小さな違いから予測の大きな違いを生み出しうる特性を持つ。これらの様々な不確実性のため、たとえ同じ外部強制を与えたとしても、再現される気候場や現象には、ばらつきが生じる。

現在気候の現象については、観測データとの比較解析により、どのモデルがより正しく再現しているかということ調べるができる。では、温暖化時の現象の様相がモデルによって異なる時に、どのモデルがよりもっともらしい予測を示していると言えるのだろうか。

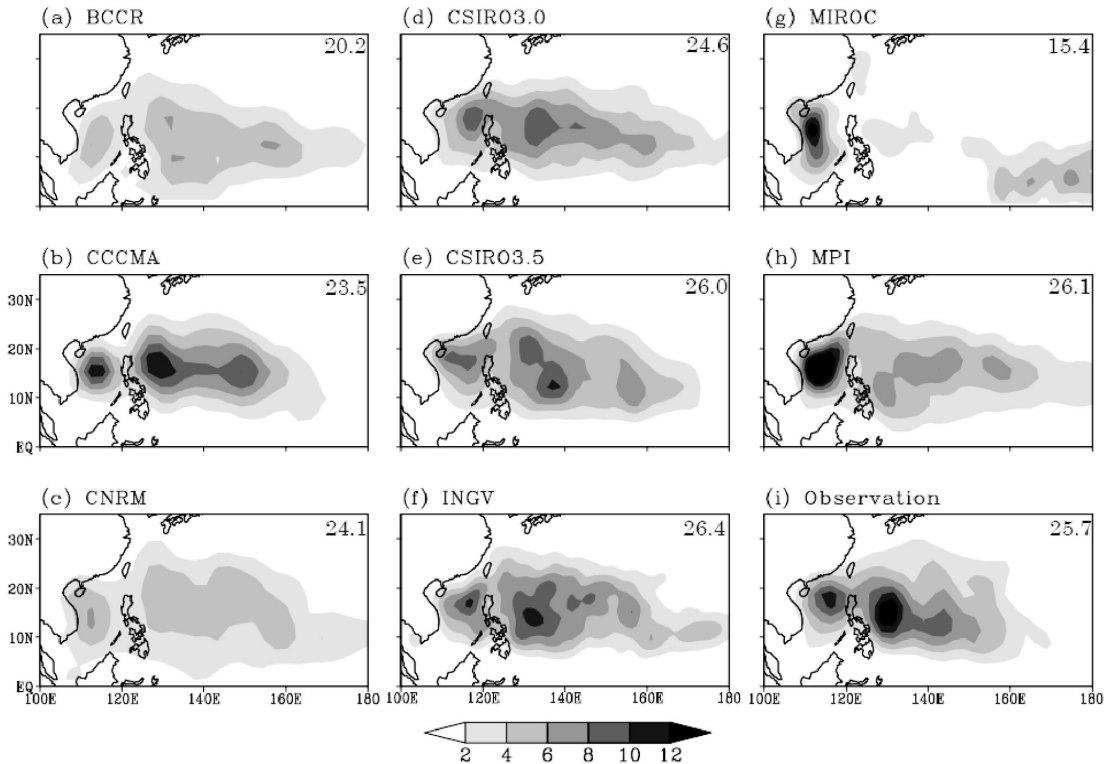
この問いかけに対しては、次のようないくつかの方

針が考えられる。1) 現在気候での現象再現性がよいモデルは、将来気候での現象再現性もよい傾向にあるだろうと仮定する、2) 気候場(環境場)の状態と現象との関係を「メカニズム的に理解」し、その関係がより正しく表現されているモデルがより信頼性が高いと考える、3) 気候場(環境場)の状態と現象との関係を「統計的に把握」し、その関係がより正しく表現されているモデルがより信頼性が高いと考える。ここでは、これらについてCMIP3マルチ気候モデルの比較解析からのアプローチを考える。

まず、1)「現在気候での現象再現性がよいモデルは、将来気候での現象再現性もよい傾向にあるだろうと仮定する」については、単純にそうもいかないことがすぐわかる。1つの数値に評価を頼ると、誤った正の値と誤った負の値同士が打ち消しあって尤もらしい結果をもたらすことがある。例えば、雲の放射効果は短波の日傘効果と長波の温室効果が逆符号で、打ち消し合って小さな値を示すので難しい。しかしながら、現在気候での再現性が全くよくないモデルが将来のことをよく予測するとはやはり考えられない。そこで、モデルの中での現象のメカニズムの確からしさを調べながら、CMIP3モデルの現在気候再現性を評価することが重要となる。ここでいくつか「現象」の再現性と予測に関する研究例を挙げてみよう。

まず、日本にとって重要な現象である「台風」の発生分布を調べたものが第1図である(Yokoi *et al.* 2009)。そもそも台風には、目の壁雲など数十kmから100kmのメソスケール過程が重要であり、水平解像度が200~300kmのCMIP3モデルによって正しく再現されるものとは考えられない。しかしながら、このような解像度のモデルでも「台風に似た」擾乱はよく現れる。ここでは、相対湿度と暖気核の気温差を指標にモデルの「台風」を定義して数えるが、その閾値は、年間の発生数と緯度分布が観測値ともっとも合うようにモデル毎に調整している。T63の解像度があり、日々のデータがあるモデルを解析対象とすると、25の出力のうち、解析できるものは8つになる。台風発生分布はベストトラックデータと比較して割合によく再現されているものが多い。

台風発生に関しては、古くから環境場による診断指標(発生ポテンシャル)が研究されている(Gray 1975)。最近Emanuel and Nolan (2004)によって提案された発生ポテンシャルは以下のような形をしている。



第1図 (a~h) CGCM20世紀再現実験で再現された台風年間発生頻度分布と、(i) 観測（ベストトラック）による頻度。単位は緯経度5度の格子内で10年間に発生する個数。各パネルの右上の数字は西太平洋域での年間発生数 (Yokoi *et al.* 2009)。

$$GP = |10^5 \eta_{850}|^{1.5} \frac{1}{(1 + 0.1 |\mathbf{u}_{850} - \mathbf{u}_{200}|)^2} \left( \frac{V_{pot}}{70} \right)^3 \left( \frac{H_{700}}{50} \right)^3 \quad (1)$$

つまり、環境の下層渦度場 ( $\eta_{850}$ ;  $s^{-1}$ ), 上下層の風速差 ( $\mathbf{u}_{850} - \mathbf{u}_{200}$ ;  $ms^{-1}$ ), 海面水温と大気安定度に対応する潜在強度 ( $V_{pot}$ ;  $ms^{-1}$ ), 下層湿度 ( $H_{700}$ ; %) によって台風の発生を診断するものである。第2図には、CMIP3モデルにおけるこの発生ポテンシャル分布を示す。現在気候の台風年間分布とのよい一致が確認できる。

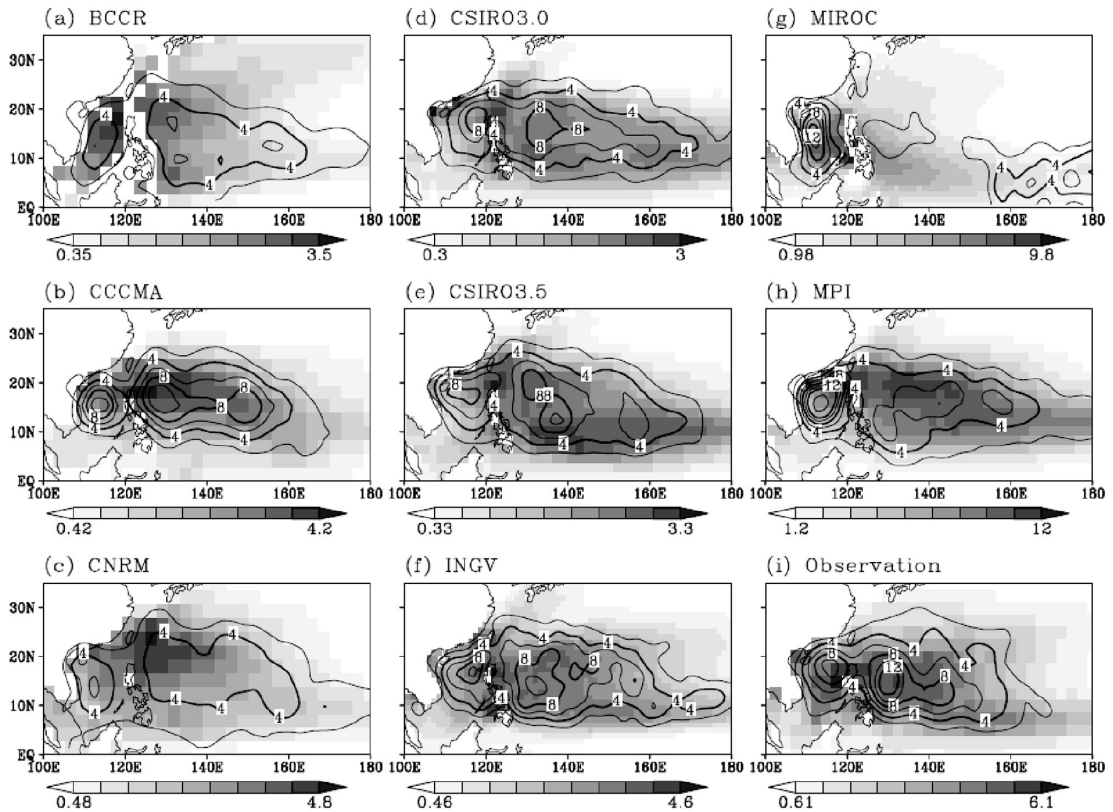
この発生ポテンシャルが、将来の「台風」発生数の変化を予測するよい指標になるだろうか？ 現在気候での再現性のよい5つのモデル (CGCM3.1, CSIRO-Mk3.0, CSIRO-Mk3.5, INGV-SXG, ECHAM5/MPI) について温暖化実験結果を調べると、「台風」発生数は第3図aのように南シナ海から西太平洋で減少、中部太平洋で増加傾向がある。ところが発生ポ

テンシャルは、全域で増加傾向を示してしまう (第3図b) (Yokoi and Takayabu 2009)。つまり、現在気候で調整された台風発生ポテンシャルという指標そのものでは、温暖化時の台風発生分布の変化を適切に予想できない可能性が示唆される。しかしこれは、発生ポテンシャルという、環境場の状況から台風発生を診断するというコンセプトが誤っているということや、発生ポテンシャルの構成要素が誤っているということを指摘しているわけではない。例えば発生ポテンシャルの4つの要素の重み付け (係数) に関して、季節変化や経年変化などの現在気候の場の変動で調整されたままでは、将来の気候変化のトレンドに対応しないということではないかと推測される。

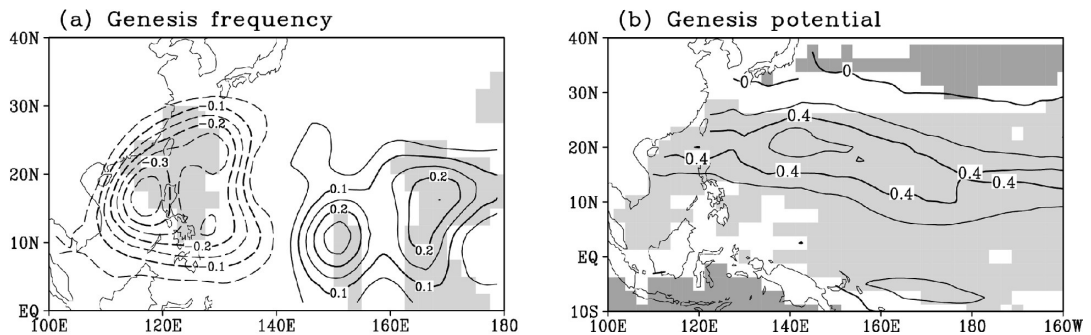
このことは、現象の現れ方を環境場によって評価する際の難しさのひとつを示唆し、後に述べるグローバルメトリック (メトリックは評価指標のこと) やアジアメトリックの話にも関連する。

もうひとつ、「春一番」の将来予測に関する解析例を示す (Nishii *et al.* 2009). 春一番は、日本海上の低気圧発達に伴って立春から春分までの間に初めて吹

く強い南風で、気温上昇を伴う (第4図). 判定の時空間スケールは共に小さく、CMIP3データで直接解析できるものではない.

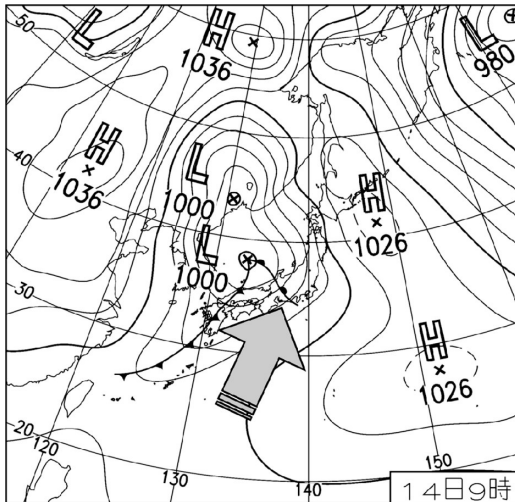


第2図 (a~h) 20世紀再現実験における Emanuel and Nolan (2004) の発生ポテンシャル (陰影) と台風年間発生頻度分布 (等値線). (i) ERA40による発生ポテンシャル (Yokoi *et al.* 2009).



第3図 20世紀再現実験の成績のよいモデルによる、(a) 台風発生数の変化率 (21世紀予測実験の地上気温上昇1°Cあたりについての変化数) と、(b) 発生ポテンシャルの変化率. 実線の等値線は増加、破線は減少を示す. 陰影は5モデル以上が同じ符号を示す領域 (Yokoi and Takayabu 2009).

春一番は、元々長崎県の漁師の間で災害をもたらす春先の強風を警戒して生まれた言葉である。Nakamura (1992) は、温帯低気圧活動が真冬に一時弱まる現象を発見したが、春一番はそれが春先に再活発化する際に伴う強風と考えられる。春一番の早かった年と遅かった年との低気圧活動の季節変化を調べる



第4図 2007年2月14日に春一番が発生した際の日本付近天気図(中村 尚氏提供)。

と、遅かった年では早かった年に比べて冬の低気圧活動の弱화가しっかりみられる(第5図a)。つまり、低気圧活動が弱化しない年は、定義にかなう期間にはいった途端に春一番が宣言されてしまうといったところである。

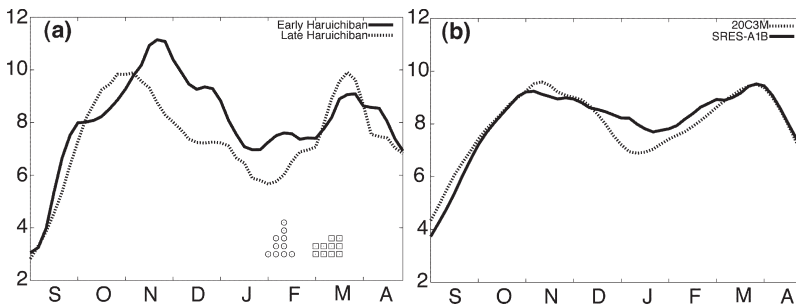
CMIP3モデルの中から現在気候での冬の低気圧活動強度極小がよく再現されるものを選択して温暖化実験結果を調べると、21世紀実験では現在よりも真冬の低気圧活動の弱화가顕著でなくなる傾向にあり、したがって、春一番が早まる傾向が示唆される(第5図b)。これは、温暖化に伴って、真冬の亜熱帯ジェット軸の南下が起こりにくくなるためと診断される。

#### 4. マルチモデルによる不確実性の軽減

さて、25もの気候モデル出力が使えるとなると当然、「どの気候モデルが一番よいのか」という問いが発生する。近年、気候モデルによる全球気候値の再現性を評価するGlobal Model Performance Index (GMPI) が提案されている(例としてReichler and Kim 2008; Glecker *et al.* 2008)。これは気候場状態を表す代表的な力学、熱力学変数を選択し、それぞれ月毎の全球分布を観測データと比較し、変動度で規格化した二乗誤差の規格化平均である。

Reichler and Kim (2008) は、この値を用いたモデルの気候場再現パフォーマンスの比較から、(どのモデルが良くどのモデルが悪いという結論を出すのではなく)、CMIP1, CMIP2, CMIP3と、モデルグループの成績が時代と共に着実によくなっていること、マルチモデル平均の気候場がどの1つのモデルよりも再現性がよいことを指摘した。

GMPIは気候モデル評価の指標として単刀直入にわかりやすい試みである。しかし、アジア域の気象は、アジアモンスーンの様相に大きく左右される。そこでアジアの気象を扱うならば、アジア気候場の指標



第5図 (a) 1963~1999年に東京で「春一番」が最も早く観測された10年(実線)と最も遅く観測された10年(破線)についてそれぞれ平均した、850hPa 南北渦熱フラックスで表した、日本付近の低気圧活動( $K \cdot m/s$ )の季節変化(9~4月)。各半旬に「春一番」が観測された年数を、早い10年は○、遅い10年は□の数で右下に示す。(b) (a)と同様。ただし、20世紀再現実験において日本付近の低気圧活動の再現性の高い8個の気候モデルの20年平均(1980~99年)に基づく季節変化(破線)と、同じ8個のモデルのSRES A1Bシナリオ実験に基づく21世紀終盤(2080~99年)の季節変化(実線)。いずれもモデルごとに評価した低気圧活動の20年平均値を8個のモデルで平均した量(Nishii *et al.* 2009)。

(AMPI) を考えた方がより有効かもしれないとも考えられる。また一方、全球、アジアいずれの指標にせよ、変数の選び方や最終的な指標化における重み付けなどに任意性が残っている。その辺りをいかに克服するかがチャレンジングな課題である。

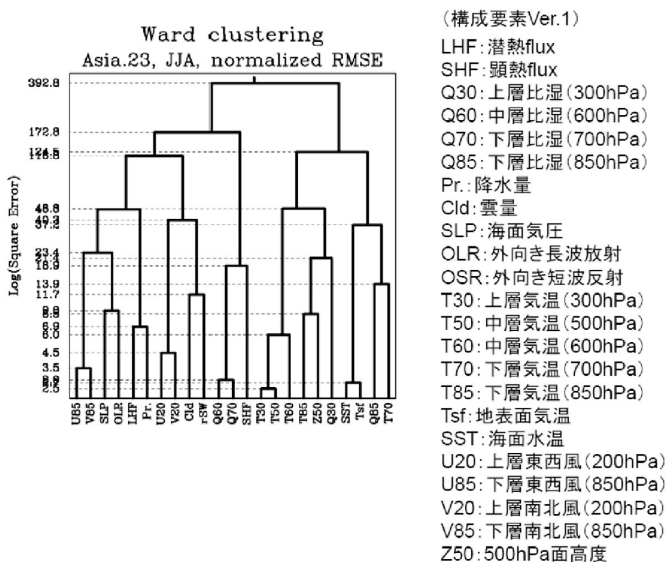
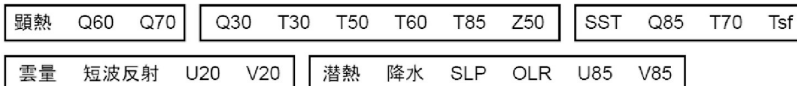
手始めの試みとして、「アジア域」を(50°N-15°S, 60°E-160°W)に設定し、第6図右下に示す23個の気象海洋の変数を選び、二乗誤差値(RMSE)を利用してAMPIを求めた。ここで、AMPIの構成要素の冗長性(相関する要素のダブルカウント)を削減するために、各要素についてのマルチモデルのパフォーマンスパターンを利用してクラスター解析を試みた(第6図)(Yokoi *et al.* 2011)。つまり、23個の各変数(例えば500hPaの高度、850hPaの東西風等々)について、CMIP3のモデル(24個)各々と観測値とのRMSEが(24個)求まる。モデル順に並べた24RMSEのパターンを変数同士で比べ、パターン

の変数をグループ化していく。この操作を繰り返し、統計的に飛びの生じるところでグループ数を決める。第6図の例では、変数は5つのグループに纏められた。

同様に、20世紀気候における現象の再現性の評価指標についてもモデル間のパターンで、クラスター解析を試みた(第7図)。この例では、現象が6つのグループに分かれている。以上の結果を用いて比較解析してみると、同じグループに分けられた現象は、気候場メトリックの5つの変数クラスターのRMSE成績分布が近い傾向が見られる(詳細は省略)。このことは、現象群と気候場要素とが効果的に対応付け可能であることを示唆している。

クラスター解析により気候場指標の構成要素の冗長性を排除したとして、次にそれぞれの要素群がいかなる重みで現象に効いてくるかという問題にたどり着く。これは台風発生ポテンシャルの問題と共通である。結局その答えに近づくためには、各現象が「調節」に果たす役割の理解に基づいた考察が必要になるだろう。

JJAの分割(最適分割数:5)

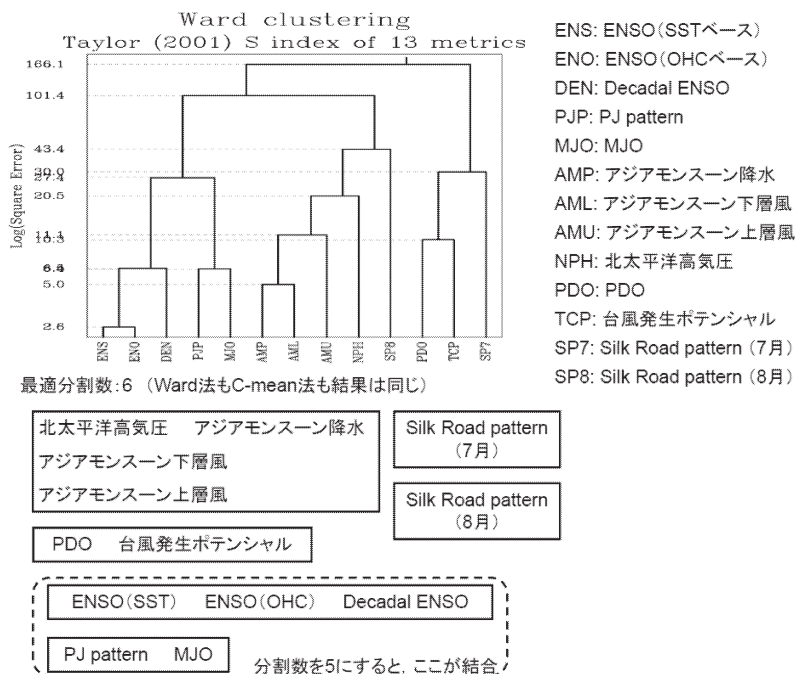


第6図 アジアメトリックの試算要素のクラスター解析。アジア域(50°N~15°S, 60°E~160°W)での、気象・海洋の23の変数について観測値との二乗平均誤差(RMSE)で各変数のモデルメトリックを計算し、モデル誤差分布の近さを利用した変数をクラスター解析でグループ分けした結果(環境省推進費S-5-2アジアメトリックワーキンググループによる)。

## 5. 今後の展開：温暖化予測をいかに捉えるか

気候モデルのパフォーマンスをうまく評価することができたら、その結果をどのように利用できるだろうか。身近な現象がどのように変化するかということにより具体的に理解することは、温暖化問題に対して私たちの態度を決める際に重要な情報となる。特に防災、農業、林業、漁業、商業など、具体的に生活がかかってくる問題に関しては、その目的に応じた詳細な情報も必要になるだろう。

先に、気候モデルの水平格子間隔で表現できない現



第7図 様々な大気海洋現象の20世紀再現性メトリックの近さについてのクラスター解析の結果（環境省推進費S-5-2アジアメトリックワーキンググループによる）。

象の変化について、一段大きなスケールの現象や場の変化から診断的に推測する研究の例を挙げたが、農業などにおける対応を考える際には、より数値的な情報が必要になる可能性がある。ひとつの手法としては、地域モデルを全球モデルにネスティングして用いるダイナミックダウンスケーリング（山崎ほか 2008）がある。よく指摘されることだが、地域モデルの出力は親とする全球モデルの性能に大きく依存する。そこで、気候モデルの性能評価の結果を利用して、より信頼性の高いダウンスケーリングを目指すという方向が考えられる。

もっともシンプルには、全球気候モデルの評価性能の高いモデルを親モデルとすることだろう。また、評価の高い複数の全球モデルを親モデルとした地域気候モデルの結果を目的に合わせて複合して使うことも考えられるが、計算コストがかかるだろう。

もうひとつの対応策として「疑似温暖化実験」という試みがある。これは、マルチモデルアンサンブルによる月平均気候場の変化を、現在の日々の再解析データに足し込んだものを親モデルとする（例：Kawase

*et al.* 2009）。計算コストが節約でき、「気候場の表現はマルチモデルアンサンブル平均が成績がよい」という知見から有効な試みであり、大規模場の評価指標も上手く利用できる。ただし、気候の変化に伴って日々の現象自身の変化がさほど大きくないという前提が成り立つ場合に限定されるので、その応用範囲については注意が必要だろう。

この注意点はつまり、全球モデルにおいて気候場の状態と日々の変動との関係をより正確に表現することの重要性に帰着する。現在、次期のIPCCレポートに向けた重要な課題として、全球気候モデル自体も20km、7kmと高解像度化が図られたり、全球モデルによる30年程度の近未来

についてより確度の高い気候予測実験が準備されたりしている。しかし現時点で手に入る材料を用いて温暖化時の現象変化予想の不確実性を減らすには、ここで紹介したCMIP3程度の中解像度実験結果をより正しく解釈する必要がある。そのためには、気候場の変化と現象の変化との関係をメカニズム的に理解し定量化していくことが、やはり科学的に着実な手段だろう。CMIP3などのマルチモデルデータの有効利用により、様々な解析が可能になり、問題解決へのアプローチの道が広がった。解析グループとモデルグループとの上手な連携により、得られた知見を次世代のモデルにフィードバックしていくことも、心がけたい重要なポイントである。

## 謝辞

本稿の一部に、環境省地球環境推進費戦略的研究S-5プロジェクトテーマ2とテーマ3の研究成果を利用している。また、解析に当たっては、PCMDIによるCMIP3データを利用し、文部科学省「データ統合解析システム（DIAS）」の協力を得ている。ここに

併せて謝意を表したい。

#### 参 考 文 献

- Emanuel, K. A. and D. S. Nolan, 2004: Tropical cyclone activity and the global climate. Preprints, 26th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, Amer. Meteor. Soc., 240-241.
- Gleckler, P. J., K. E. Taylor and C. Doutriaux, 2008: Performance metrics for climate models. *J. Geophys. Res.*, **113**, D06104, doi:10.1029/2007JD008972.
- Gray, W. M., 1975: Tropical Cyclone Genesis. Dept. of Atmospheric Science, Paper No. 234, Colorado State University, 121pp.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. IPCC, 996pp.
- Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, F. Kimura, T. Yasunari, B. Ailikun, H. Ueda and T. Inoue, 2009: Intermodel variability of future changes in the Baiu rainband estimated by the pseudo global warming downscaling method. *J. Geophys. Res.*, **114**, D24110, doi:10.1029/2009JD011803.
- Nakamura, H., 1992: Midwinter suppression of baroclinic wave activity in the Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **49**, 1629-1642.
- Nishii, K., T. Miyasaka, Y. Kosaka and H. Nakamura, 2009: Reproducibility and future projection of the midwinter storm-track activity over the Far East in the CMIP3 climate models in relation to "Haru-Ichiban" over Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 581-588.
- Reichler, T. and J. Kim, 2008: How well do coupled models simulate today's climate? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **89**, 303-311.
- 山崎 剛, 岩崎俊樹, 高藪 出, 木村富士男, 余田成男, 中井専人, 菅野洋光, 2008: 日本気象学会2008年度秋季大会シンポジウム要旨集 地域の詳細な気象と気候の再現を目指して—ダイナミックダウンスケール技術の高度利用—. 日本気象学会東北支部, 30pp.
- Yokoi, S. and Y. N. Takayabu, 2009: Multi-model projection of global warming impact on tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 525-538.
- Yokoi, S., Y. N. Takayabu and J.C.L. Chan, 2009: Tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific simulated in medium-resolution coupled general circulation models. *Clim. Dyn.*, **33**, 665-683.
- Yokoi, S., Y. N. Takayabu, K. Nishii, H. Nakamura, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, M. Kimoto, Y. Kosaka, T. Miyasaka, K. Oshima, N. Sato, Y. Tsushima and M. Watanabe, 2011: Application of cluster analysis to climate model performance metrics. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **50**, 1666-1675.

#### 後注

SRES (Special Report on Emissions Scenarios) A1B シナリオ：人為起源温室効果ガスの将来における排出源シナリオのひとつ。A1シナリオファミリーの概要としては、経済発展を続けながらも地域間の技術的文化的交流度が高い状況を想定する。A1Bは其中で、化石エネルギーと非化石エネルギーのバランスを取りながら対策技術などの進歩と共に発展するシナリオで、地域毎に対策をとらずに経済発展を目指すA2と、対策が非常に進むB1の中間的なシナリオとなっている。将来予測の議論に比較的標準的に利用される。