

「水の循環系モデリングと利用システム」

平成13年度採択研究代表者

木本 昌秀

(東京大学気候システム研究センター 教授)

「階層的モデリングによる広域水循環予測」

1. 研究実施の概要

本研究は、大気－海洋－陸面過程を総合して表現する気候の数値モデルを用いて、東アジア域を中心とした広域水循環変動の長期予測可能性を探求することを目的としている。

季節ないし年々の時間スケールでの広域水循環の変動を予測するには全球をカバーする大気大循環モデルが必要であるが、現在広く用いられているモデルは水平格子間隔が300 km程度以上であり、梅雨前線やその上で生じる激しい降雨をもたらす気象擾乱の表現はできていない。高分解能のモデルを開発してモンスーンや梅雨前線活動の年毎や季節内の変動の表現を目指す。また、エルニーニョ等に伴う大規模大気海洋相互作用の再現を可能にする大気海洋結合モデルを開発する。解像度だけでなく、格子点以下のスケールの物理過程の高度化を行う。このため、領域・雲解像モデル等も併用する。

モデルの高度化と平行して、過去の事例の予測実験や主要な変動モードの同定とそのメカニズム解析を通じて広域水循環変動について予測可能性の評価を行う。

これまでに、大気大循環モデル、大気海洋結合モデルの高分解能化、高精度化を達成し、雲解像モデルと大循環モデルの融合に着手した。また、広域水循環変動のメカニズム解析に有力なツールとなる湿潤線型モデルを実用化した。これらのモデルを駆使して、東アジア域の長期予測可能性のある天候変動のいくつかのモードを同定し、そのメカニズムの解析を進めている。

2. 研究実施内容

広域水循環の変動予測の強力な道具は、大気大循環モデルである。その高解像度化、物理過程の高精度化に力を注ぎ、現在広く用いられている水平格子の1/3の約100kmのモデルを構築し、各種予測可能性研究に使えるレベルに調整することができた。梅雨前線やその上で生じる激しい降雨をもたらす気象擾乱の表現が向上した。海洋との相互作用を表現する大気海洋結合モデルも高分解能化した。また、格子点以下のスケールの物理過程のさらなる高度化の可能性を探求するため、雲解像モデルを用いた「スーパーパラメタリゼーション」のプロトタイプモデルを作成中である。

広域水循環は大気の大循環と不可分である。大気大循環の変動とそれに伴う降水等水循環の長期予測にはまず、予測可能な成分とその形成維持メカニズムを同定し、数値モデル等を用いて予測可能性を探っていく必要がある。日本を含む東アジア域の天候変動は、熱帯の水循環の変動と、中高緯度ジェット気流の変動の両方によって支配されている。長期観測データにより夏季アジアモンスーン水蒸気フラックス年々変動の解析を行い、あらたに重要なモードを同定することができたので、その形成維持メカニズムと予測可能性の探求を行っている。一方、オホーツク海高気圧など北の気圧システムの長期変動にユーラシア大陸の陸面条件等が大きく影響している可能性が見出され、その実態とモデルによる予測可能性を追求している。

以下に、各種モデルの高度化、および、それらを用いた広域水循環の予測可能性についての研究実施状況をまとめる。研究結果の詳細は巻末に付録としてまとめることとした。

(1) モデルの高精度化

目的：モンスーンや梅雨前線に伴う降雨の年々、季節スケールでの再現性向上を目的として高分解能モデルの開発、格子点以下のスケールの現象のパラメタリゼーションの精度向上を図る。

方法と結果：長期積分を行う大気大循環モデルの標準的な解像度である水平格子約300km、鉛直20層のモデルをもとに、水平約120km、鉛直56層のモデルに拡張し、プログラムの並列・高速化、新規パラメタリゼーションの導入や既存のものへの再調整などの作業を数年来にわたって行ってきた。この結果、高解像度版を広域水循環予測等の研究に耐えるレベルにまで調整することができた。同時に、大気海洋結合モデルも高解像度化、高精度化を行った。大気モデル、結合モデルとも延べ数百年の積分を行い、これまで十分に表現されなかった梅雨前線などの表現が改善された。高分解能大気海洋結合モデルは、大気の水平解像度120km（球面調和関数展開の三角形切断でT106）、鉛直層数56、海洋は、水平 $1/4^{\circ} \times 1/6^{\circ}$ 、鉛直48層を持ち、長期積分を行う気候モデルとしては現在世界で最高解像度を誇るものである。

大気モデルの高解像度化は、細かい地形の効果や、数百～千kmスケールの降水をもたらす気象擾乱の表現が向上することのほかに、大規模基本場の表現向上を通して、解像度依存性が一見小さいと思われる数千kmスケールの長周期変動の表現の向上ももたらす。熱帯の季節内変動やブロッキング現象の表現にその例を見ることができた。詳細な解析によって科学的な知見として確立していく必要がある。

線型モデルについては、本研究において湿潤過程を含むように従来のモデルを拡張することができた。これにより、海面水温に対する大気循環の応答を求める際に、海面水温のみならず大気循環の関数でもある非断熱熱源をアプリオリに与えざるを得ない矛盾から解

放される。エルニーニョに対する大気応答（～異常気象）の解釈に湿潤線型モデルが有効であることを示すことができた。

高解像大循環モデルといえども数10kmスケールの降水現象の再現はまだできない。北陸地方を対象とした領域モデルによるシミュレーション、また、圧密過程を含む多層積雪モデルを開発して、豪雪地域における局地降積雪の予測可能性を探る試みを進めている。1次元モデルとしての積雪モデルの振る舞いは良好である。領域モデル結果は陸面条件の設定に対する感度等を追求してゆく必要がある。

大気大循環モデルのパラメタリゼーションの代わりに2次元（水平一方向一鉛直）の雲解像モデルを用いるスーパーパラメタリゼーション手法の有効性とパラメタリゼーション改良へのインパクトを評価するため、プロトタイプモデルの構築を開始した。大循環モデルとの結合等に関わるコーディング上の制約等から既製の雲モデルは用いず、書き下すことにした。雲モデルのコーディングと大循環モデルへの埋め込み作業は終わっているが、雲モデルを1-2日の短期でなく、長期積分するための調整や、大循環モデルとの変数の双方向のやりとりに伴う問題を解決する必要がある。このうち、双方向ネスティングに伴う問題は、鉛直グリッドの違いから来る計算モードの励起に関係することがわかっており、比較的簡単な操作で当面回避できることがわかった。また、現在は64ノードのPCクラスター計算機で開発を行っているが、低分解能大循環モデルでも全グリッドへの埋め込みには大量の計算時間を要する。パラメタリゼーション向上への重要な基礎研究と位置付け、堅実に進捗させる。

結論：高解像モデルによりこれまで困難であった梅雨前線降雨帯やモンスーン域の季節内変動の表現を向上させることができた。他にも、線型モデルや雲解像モデルなど水循環解明に有用な道具の開発を続けている。

（2）予測可能性評価

目的：季節～年々スケールの広域水循環変動の予測可能性を明らかにする。どのような現象がいかなるメカニズムを経て予測されうるのかに重点をおく。

これまでの研究で、東アジアの天候変動に、日本の南海上の対流活動の影響、ユーラシア大陸上のジェット気流の変動が大きな影響を持つことがわかってきた。また、モンスーン、ジェット気流蛇行の主変動モードとそのメカニズムも明らかになりつつある。このような点に焦点をあて、モデルによる仮説検証を進める。

方法：観測データによる主要変動モードの同定、線型モデル等を用いたそのメカニズムの解析をもとに、特徴ある変動、年に焦点を当てた大気大循環モデルによる事後予測実験、仮説検証のための数値実験を行い、東アジア域の広域水循環変動の長期予測可能性を明らかにする。

結果：まず、新しい仮説として、初夏の東アジアの天候変動に対する晩冬から春にかけてのユーラシア大陸上の循環変動の影響に着目している。春季のユーラシア大陸北部（シベリア）の地表気温は非常に大きな空間スケールを持ち、引き続く初夏のオホーツク海高気圧の活動度に影響を与えていることが明らかになってきた。春のシベリアの気温が高いとオホーツク海高気圧が優勢となる。シベリア気温の変動は晩冬の北大西洋振動（NAO）モードの動向に左右される。シベリアの気温偏差の形成過程、初夏へ続くメモリメカニズムの解析を進めている。また、2003年夏の冷夏に関連して、欧州からシベリア上空を経て東アジアに至る導波管の活動がオホーツク海高気圧の活発化をもたらしたとの仮説のもとに数値実験等による検証を進めている。

夏の東アジアモンスーンの変動は、西太平洋フィリピン東沖の対流活動と密接な関係にある。長期間の水蒸気フラックス変動の解析から、フィリピン沖とインドネシアとの間でシーソー様の対流活動の変動が主要な変動モードとして同定され、Pacific-Indo Dipoleモードと呼んでいる。このモードの形成維持にモンスーンの季節平均場が重要な役割を果たしていることが、線型モデル等による解析によりわかった。このモードは本質的に特定の場所の海面水温変動のような外部強制がなくても存在する。しかし、年々異なったパターンで変動する海面水温は毎回異なった形でこのモードの正負を励起する。したがって、このモードの予測に、特定場所の海面水温インデックスは無効である。大気大循環モデルは複雑に変動する海面水温に対するこのモードの応答をよく再現することがわかった。2004年の猛暑もこのモードが重要な役割を演じており、事後予測実験を実行中である。

このほか、東アジアの冬季天候～北極振動（AO）の励起に秋の東シベリアの積雪偏差が鍵となっていることが事例予測実験によって確認された。また、エルニーニョと夏季東アジアの冷夏傾向のメカニズムについて湿潤線型モデル等による解析を進め、インド洋海面水温の影響、熱帯環状モードの役割が明らかになってきた。さらに、近年の冬季東アジアジェット上の高低気圧活動のトレンドが温暖化と関連している可能性を示す数値実験結果を得た。

結論：降水量の多い日本の夏の天候は、昨年来研究している日本南方での水蒸気変動モードに加えて、シベリアなど北方の影響も受ける。これらを分離しながら過去事例の検討、再現実験を行ってゆく。

[研究結果の詳細]

I. モデルの高精度化

I-1. 大気大循環モデルおよび大気海洋結合モデルの高解像度・高精度化

水平解像度T106（～120km格子）、鉛直56層（L56）（以下T106L56と表記）の全球大気大循環モデルの開発・調整を行ってきた。並列化と高分解能化に伴うプログラムの高速化、海洋など他の気候サブモデルとの結合モジュールの整備などとともに、大気水物質の移流スキームの改良、境界層、対流雲に係る物理過程の高度化等の作業をほぼ終了し、各種の長期積分、予測可能性実験を行っている。

大気大循環モデルの高解像度化によって梅雨前線が表現され、その変動を議論することが可能になった。図1は6月の降水量の気候学的平均値を、観測（CMAPと呼ばれる衛星データによる推定と観測所の雨量計データの融合）、高解像度（T106L56）および中解像度（T42L20；水平格子間隔約290km）大気モデルについて比較したものである。高分解能モデルでは、ヒマラヤやインドネシア、パナマ付近の地形を反映した細かい分布が見られる。緯度40°までしかデータがないためここには示さないが、レーダを搭載したTRMM衛星による観測とはCMAPよりむしろ高解像度モデルの方が一致がよい場合が多い（図は割愛）。また、高解像度モデルにおいては梅雨前線に伴う降雨バンドがよく表現されている。梅雨前線の特徴である水蒸気の大きな南北傾度や、降雨をもたらす前線上の気象擾乱の表現も解像度とともに向上する。

ただ、西太平洋フィリピン東沖の強雨域や、ニューギニアから南東へ伸びる南太平洋収束帯、赤道インド洋の降雨分布など、まだ向上の余地を残す部分も多々残っている。

図2は、夏季（6－8月）日本付近の水平250km格子での日別降水量の強度別頻度分布を中解像度モデルと高解像度版、そして衛星データによる見積もりを比較したものである。中解像度モデルでは、弱い降雨の頻度を過大評価し、逆に強い降雨頻度を過小評価する傾向があるが、

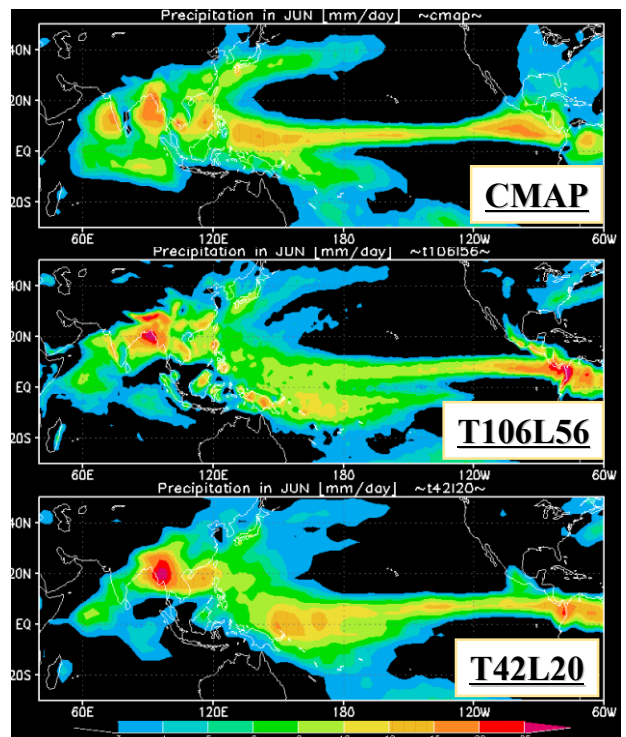


図1 6月の降水量気候値。上から、観測、高解像度、中解像度大気モデル。

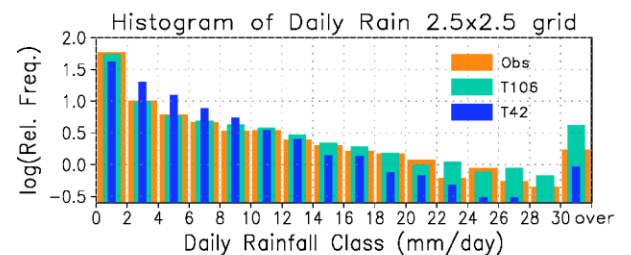


図2 日本付近の夏（6-8月）における日降水量の強度別頻度分布。

高解像度モデルでは改善されている。これにより降雨の平均量、たとえば月平均値だけでなく、強い降雨の頻度の変動の予測可能性を議論することが可能になる。ただし、このような精度向上は、高解像度化のみによるのではなく、格子点以下の雲や境界層過程の調整、例えば不安定成層に伴う積雲対流の生起条件の設定等に強く依存することがわかった。格子点以下の山岳地形による重力波抵抗がジェット気流の南北位置を微妙に変化させ、梅雨前線に伴う降雨バンドの表現に大きな影響を与えることも数値実験から示された。今後、どのような過程がよりよいシミュレーションに必要であるかを科学的知見としてまとめ、具体的事例の検証を通して予測可能性の評価を行ってゆく。

大気大循環モデルによる広域水循環変動の再現性を確認するため、1979年から1998年までの観測された海面水温を与えて高解像度、中解像度大気モデルを積分した。大気のカオス性から来るサンプリングエラーを減ずるため、初期値を変えて各解像度3本ずつのアンサンブル実験を行った。図3は、6-8月平均の鉛直積算水蒸気フラックス半年偏差の観測値とモデル計算値の空間パターン相関を示す。パターン相関はモデルのアンサンブル平均偏差と観測の半年偏差の間で、アジアモンスーン域（東経40°-150°，南緯20°-北緯40°）にわたって積分して求めた。熱帯での水循環偏差は海水温分布に規定される部分が多いので、適当な初期値から始めた長期積分でも現実をある程度模倣できると期待される。

図を見ると、高解像モデルの方がおおむねスコアがよい、すなわちシミュレートされた水蒸気循環の偏差が観測と似ていることがわかる（2002年夏の高解像モデルのスコアが悪いことについては調査が必要と考えている）。しかしながら、長江洪水など顕著な大雨が東アジアを襲った1998年の0.8近い高相関を除くと0.6に達することはまれで、モデルの水循環偏差パターンの逐一をそのまま観測と比べて解釈することにはまだ無理がある。

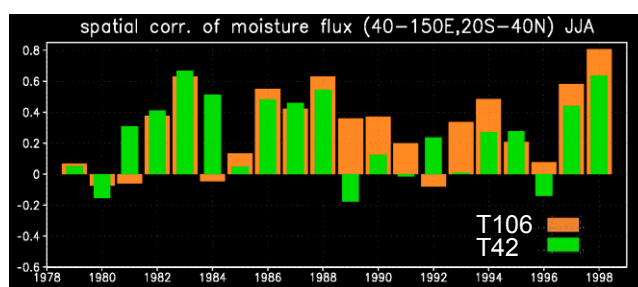


図3 アジアモンスーン域（東経40° -150°，南緯20° -北緯40°）における6-8月平均の鉛直積算水蒸気フラックス半年偏差の観測値とモデル再現値の空間パターン相関。横軸は年（1979-2002）。橙はT106、緑はT42モデル。モデルは両解像度版とも観測された海面水温を与えた長期積分3本のアンサンブル平均。

他の解析結果も総合すると、T42からT106への高解像度化により、大循環、広域水循環の変動再現性は確実に向上する。しかし、その程度は広域変動の予測の困難さを一掃するものではない。変動のモードを抽出し、メカニズムに踏み込んで解析することが必要である。

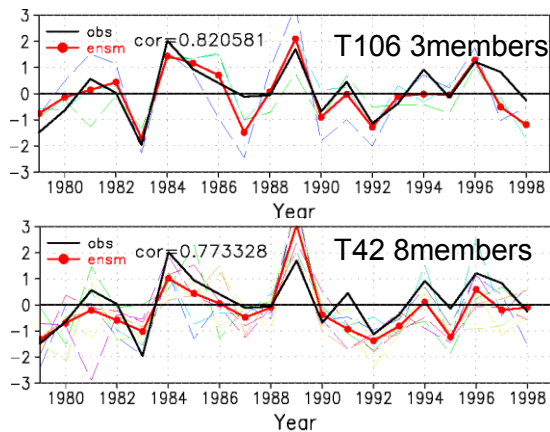


図4 冬季（12-2月）熱帯環状モードの年々変動再現性。太い黒線は観測値、太い赤線はモデルのアンサンブル平均値。細い線はアンサンブル各メンバーの値。（上）T106モデル（アンサンブル数：3）、（下）T42モデル（アンサンブル数：8）。Corはアンサンブル平均と観測時系列の相関係数。

変動モードにもとづく解析の一例として、われわれが少し前に発見した、熱帯環状モード（TAM）の年々変動の再現性を示す北半球冬季（12-2月）時系列を図4に示す。このモードはエルニーニョ等によって効果的に励起され、熱帯のみならず全球的なテレコネクションを生じる。図5は観測された熱帯環状モードに伴う地表気温と500hPa高度の偏差図を示す。500hPa高度偏差を見ると南北半球の中高緯度の偏差パターンの表現はとくに西半球において高解像度モデルの方が格段に観測に近い。

さらに、高分解能化のインパクトを示す例として、夏季インド洋における40-50日周期での大規模雲塊の北進モードの表現を紹介する。図6は観測、T106、T42モデルによる外向き長波放射（OLR；数値が低いほど背の高い雲の存在を示す）の北進のようすを示す。OLRの20-120日周期成分を用い、赤道域5°S-5°N、70°E-90°Eで平均したOLR時系列をキーインデックスとしてそれと他の場所の

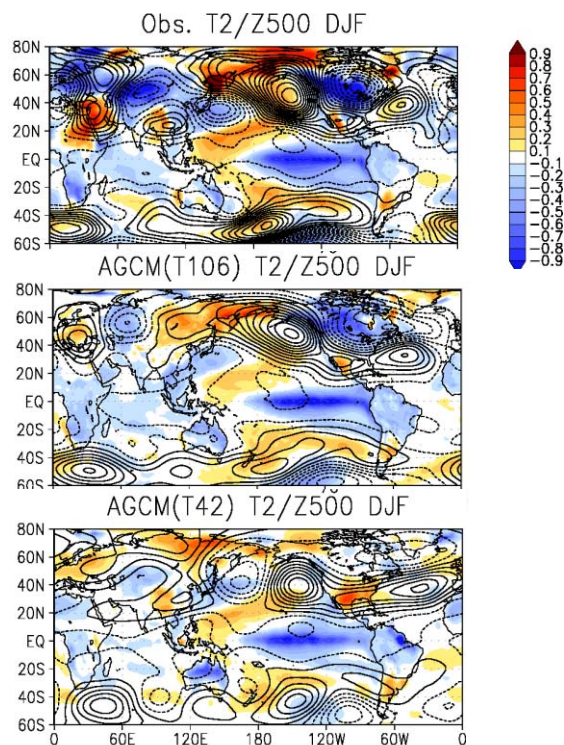


図5 冬季（12-2月）熱帯環状モードの年々変動に伴う全球テレコネクション構造。環状モードの時系列と地表2m気温（陰影）、500hPa高度偏差（等値線）の回帰係数。（上）観測、（中）T106モデル（3メンバーアンサンブル平均）、（下）T42モデル（8メンバーアンサンブル平均）。

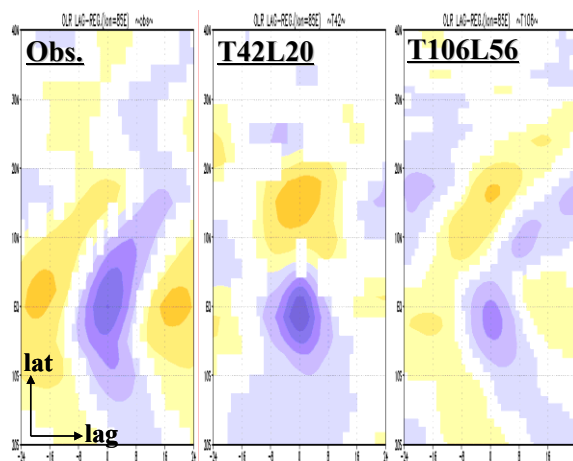


図6 20-120日周期成分OLRの時差-緯度断面図。赤道域5°S-5°N、70°E-90°Eで平均したOLR時系列をキーインデックスとしてそれと他の場所のOLRの回帰係数を計算した。（左）観測値、（中）T42モデル、（右）T106モデル。

20-120日周期成分OLRとの時差回帰係数を計算したものである。85° Eにおける緯度-時差断面を示している。観測およびT106モデルでは赤道域OLRが北進する傾向が現れているが、T42モデルでは赤道域とその北の亜熱帯域で定在波的になってしまっている。T106とT42モデルの違いの理由は、高分解能化によって気候学平均的な下層風場の表現がよくなったことに求められる。図7は、観測、T106、T42モデルによる夏季（6~8月）平均の850hPa風

ベクトルとロスビー波の復元力として働く実効 β と呼ばれる量（ $\beta^* = \frac{df}{dy} - \frac{d^2\bar{u}}{dy^2}$ ； f は

Coriolisパラメータ、 \bar{u} は気候学平均の帯状風成分）を陰影で示したものである。インド半島を南へ迂回する成分が観測、T106モデルでは表現されており、このため、実効 β の大きい領域がより低緯度まで広がっている。このような基本場の違いは赤道で大規模な雲塊が存在したときその北側に生じる低気圧性循環の応答の強さの違いをもたらす。図8は、観測、T106、T42モデルの気候値を基本場にして、インド洋赤道域の雲による加熱を与えたときの循環応答を線型大気モデルによって計算したものである。観測、T106基本場では加熱域北方に低気圧性循環が生じているが、T42基本場では応答が著しく弱い。低気圧性循環域では境界層収束等により水蒸気が蓄積され鉛直安定度が悪くなる。そのため、元赤道にあった雲塊が北方へ移動するものと考えられる。

このような、高解像度化による基本場の表現向上を通じて比較的大きな空間スケールの変動成分の再現性向上につながる、というシナリオは新しい見解として科学的知見へと高めてゆく必要があると考えている。

I-2. 湿潤線型傾圧モデル： El Niñoに対する循環-対流結合系の応答（渡部雅浩）

現実大気やAGCMに現れる大規模な大気循環偏差の力学を理解するための診断ツールとして、線型の力学モデルがこれまで多く使われてきた。とりわけ、プリミティブ方程式系に基づく線型傾圧モデル(以下LBM)は、テレコネクション・パターンにおける熱・山岳強制や短周期擾乱からのフィードバックの役割を定量的に議論するのに有効である。

本来、対流活動偏差のある部分は循環偏差によって作られているはずであるが、El Niñoに対する中高緯度大気の直接的な応答は、LBM赤道上の熱源を与えて解くことで割合よく表現される。これは、対流活動が活発でない中緯度における循環の応答を考えているためであろう。一方、熱帯においては、ある熱源によって強制された大気応答が離れた場所に加熱・冷却源を生じ、それによってまた循環が変わり...という過程が無視できないかもしれない。実際の(例えばEl Niño時の)循環偏差は、こうした循環と加熱の結合した応答として理解されるのではなかろうか。本研究では、こうした動機に基づいて従来の乾燥モデルに海面熱フラックス・積雲対流過程を組み込んだ「湿潤LBM」を構築し、熱帯のENSOテレコネクションの診断を試みた。

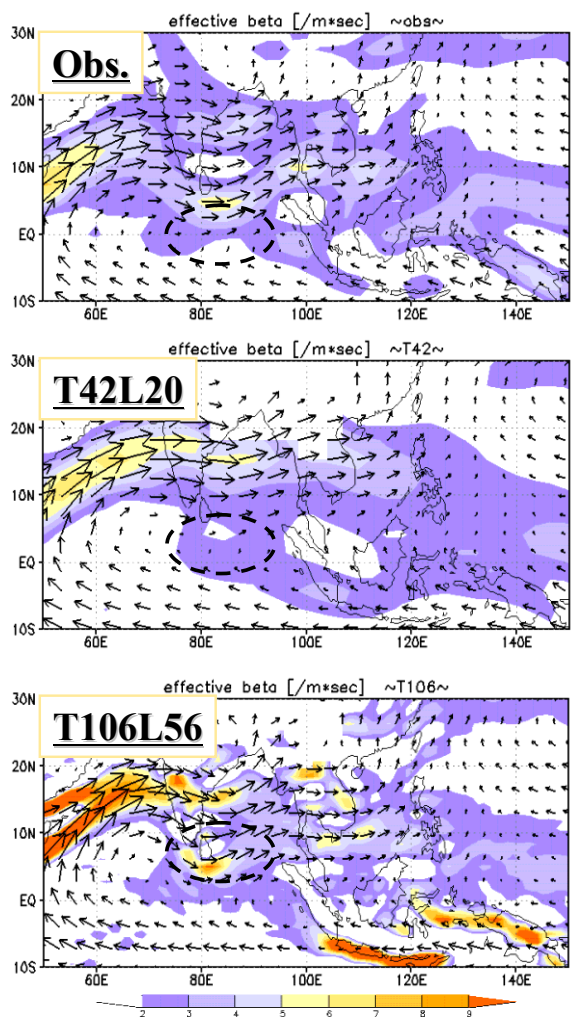


図7 夏季インド洋における気候学的な850hPa風ベクトルと実効 β （陰影）の分布。（上）観測、（中）T42モデル、（下）T106モデル。

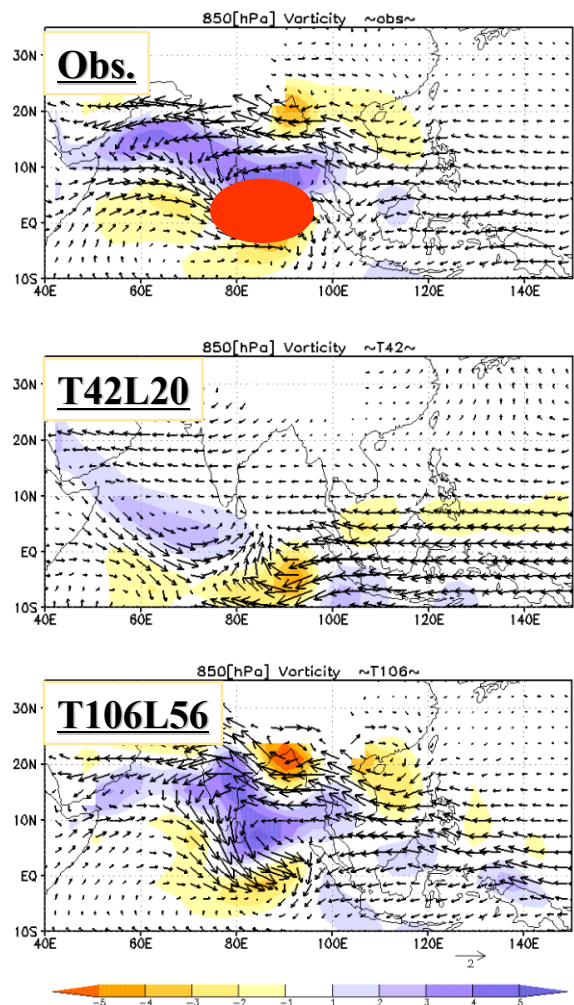


図8 （上）観測、（中）T42モデル、（下）T106モデルの気候値を基本場として上図楕円域に加熱を与えたときの線型応答。ベクトル、陰影は850hPa風と渦度を表す。

■モデル

LBMはWatanabe and Kimoto (2000, QJRMS)のT21鉛直20層版で、NCEPの冬(12-2月)の気候値のまわりで線型化した。モデルは弱い水平・鉛直拡散の他に、境界層 $\sigma \geq 0.9$ 上端 $\sigma \leq 0.03$ で時間スケール1日のレイリー摩擦およびニュートン冷却項を含む。

湿潤LBMの概要は次のようなものである。まず、通常の乾燥LBMにおける定常応答を

$$LX=F \quad (1)$$

と書く。Xは擾乱の変数ベクトルで $X=(\zeta', D', T', \ln Ps')$ 、FとLは強制および線型力学演算子を表す。強制が対流活動によるものと仮定し、FをSST偏差(=Ts')と擾乱Xそれぞれに依存する部分に分ける(すなわち $F=Fi(X) + eF(Ts')$)。従って(1)式は

$$(L-Fi)X=Fe \quad (2)$$

と変形でき、与えられたSST偏差に対して、循環およびそれとコンシステントな対流の応答が求まる。このときXは水蒸気比湿も含んでいる。具体的には、Feは線型海面バルクフラックスのうちSST偏差にのみ依存する項、Fiは海面フラックスの残りと対流スキームにより診断される熱・水蒸気のソース・シンクからなる。積雲対流は線型のBetts-Millerスキームをさらに変更したものを用いた。定常応答はとりあえず時間積分法で求めたが、行列解法でも基本的に同じ結果が得られることは確認済みである。

■ENSOテレコネクションに対する応用

ENSO時の冬には、中部赤道太平洋で対流活動が活発化すると同時に海洋大陸上の対流は抑制され、それとともにしばしばフィリピン付近に高気圧性の下層循環偏差が卓越する(図9 a)。この高気圧循環偏差は温度・水蒸気の移流を通じて日本の冬の天候にも影響する。乾燥LBMを用いた診断から、下層の高気圧偏差は海洋大陸上の対流抑制に伴う冷源偏差によるロスビー応答であることが分かる。では、なぜ海洋大陸上で対流が抑制されるのか？ 湿潤LBMに中東部熱帯太平洋(EI Niño領域)のSST偏差のみを与えた場合、熱帯西太平洋の対流活動は抑制されず、亜熱帯の高気圧応答も現れない(図9 b)。これはSST偏差が熱帯太平洋全体であっても大きく変わらない(図略)。一方、熱帯太平洋に加えインド洋のSST偏差で強制すると、海洋大陸上の対流は観測同様に弱まり、下層高気圧偏差がフィリ

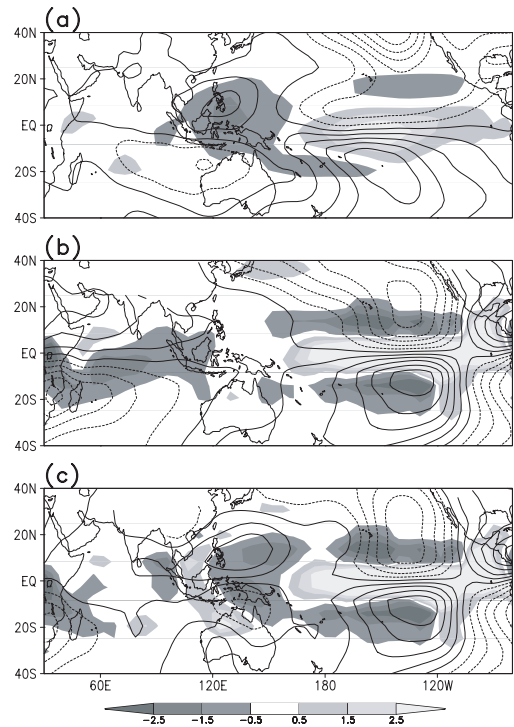


図9 (a) 観測されたEl Niñoに基づく850hPa流線関数偏差(等値線: $2 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$)およびOLR偏差(鉛直平均加熱に換算; K/day)の合成図. 湿潤LBMに(b)熱帯中東部太平洋および(c)熱帯太平洋-インド洋のSST偏差を与えた時の応答(凡例は(a)と同じ).

ピン海に生じる(図9c)。湿潤モデルの応答を調べた結果、El Niñoに伴うインド洋の昇温はウォーカー循環の変化を通して熱帯西太平洋の循環-対流系に影響することが分かった。観測データの解析結果もこれを支持する。

湿潤LBMの診断結果はさらにGCMなどで検証される必要があるが、上の結果が正しければ、El Niñoに対するインド洋大気海洋系の応答をより知ることが日本など東アジアの冬の気候予測に役立つかもしれない。

I-3. 局地降積雪のシミュレーション (熊倉俊郎)

A. 多層積雪モデルの構築と北陸域降積雪特性分布の解析

はじめに

北陸地方は0℃近辺で降積雪が起きる多積雪地域である。通年積雪のある地域以外では、積雪期初期や後期の比較的温暖な期間にどれだけの積雪融雪があるのかを数値モデルで見積もることは現状では難しい。しかし、気候研究に必要な、融雪期の積雪面の振舞いの正確な推定や、局地的な融雪出水量の見積もり、さらに雪崩等の積雪層特性の把握には必要な知見であることは言うまでもない。一方で、雪の観測の自動化には限度があり、定常的な気象自動観測では水平面的な考察に十分なデータが得られないことが多い。ここでは、気象自動観測網AMeDASのデータを用い、0℃近傍の高気温である影響として考えられる、

(1) 降水量観測時に降雪なのか降雨なのか、

(2) 積雪層の中に湿雪が多いか、

の2点について、多層積雪モデルを構築した上で水平的に明らかにしてみる。

モデルの概要と検証

積雪層の層厚と歪測度の関係式から圧密過程を表し、気温の閾値を用いて降水降雪判定を行ない、融雪は簡易的な気温の関数とし、圧縮粘性係数(Shinojima, 1967)、新規積雪の密度(梶川, 1989, 大泉ら, 2000)、降水量計の風速に関連する捕捉率(横山ら, 2003)に対しそれぞれの経験式を適用して、降雪積雪の数値モデルを構築した。圧縮粘性係数は乾雪を仮定し、降水降雪判定の気温閾値は2℃を基本とし、モデル内の積雪層は可変層厚とし、圧密の微分方程式は積分した形で時間発展を解いた。そして、気温、降水量、風速を入力とし、時々刻々の積雪深を算出した。検証は、森林総合研究所十日町試験地で2000年12月から翌年4月までに観測されたデータに基づいて行なった。入力には1990年から2001年までの北陸域のAMeDAS積雪深データを使用した。降水量観測値と積雪深観測値に対して簡単な品質管理を行ない、信頼性の低いデータを季節毎に削除した。

結果と考察

多層積雪モデルの検証実験では、1時間積雪深を積雪期内で平均した値で比べると、観測値に対して18%の過大評価を得たが、全冬季を通じて観測値と良く合った時間推移を確認できた。モデルと観測の積雪深を図10(a), (b)にそれぞれ示す。さらに、AMeDASデータを用いたモデル計算値と観測値の差を符合付きの二乗平均誤差で表した。負値は観測積

雪深が計算積雪深より深い領域、正值はその逆である。積雪水量が同じ場合に圧縮特性に着目すれば、正值の場合は圧縮しやすい積雪層であることを示す。積雪期間の平均気温と比較した散布図が図11で、水平面上にプロットしたのが図12である。また、降水降雪判定を気温閾値0°Cで実験すれば最小限に降雪を見積もった場合と考えられ、それにより降水降雪判別の困難な地域の分離を行なった。それ以外の地域は、積雪層の圧縮特性の推定可能な領域と考えられる。

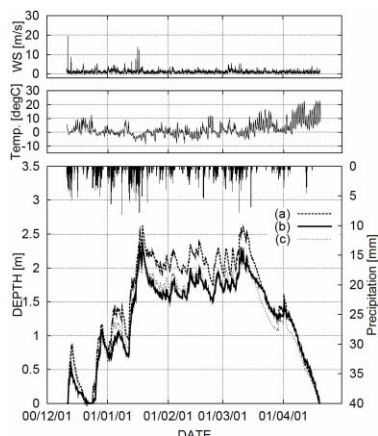


図10 十日町での検証実験結果

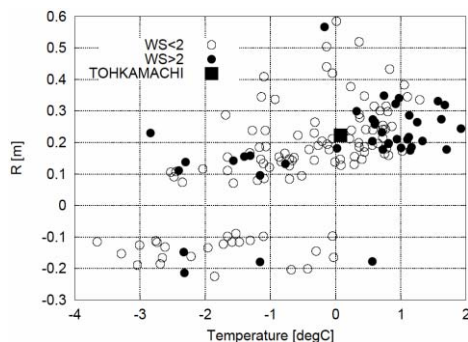


図11 気温と二乗平均誤差

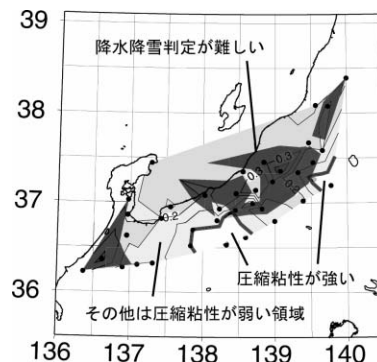


図12 二乗平均誤差の水平分布

B. 降雪数値実験による、降雪に対する陸面の影響に関して はじめに

冬季の北陸域での降雪メカニズムは、北東季節風の進入、日本海収束帯の形成、脊梁山脈のスケールの地形の影響、さらに、カタバ風の海面への進入等により説明されている。雪災害に関わる山域での降雪量把握には局地数値実験が一つのツールとして期待されているが、現状では十分な精度が常に期待できるわけではない。ここでは、局地数値モデルを用いた降雪数値実験により、陸面が与える降雪への影響を考察する。

局地数値モデル

気象庁 NHM (気象庁非静力モデル)を用いた。鉛直38層、水平解像度は、2, 5, 10 km について実験した。モデルの計算領域は境界に山岳域がかからないように選択した。地中グリッドは数点取られ、地温が予測されている。雲物理過程は、水物質の混合比のみを予測する、霰と雹を区別しない3クラスのバルクモデルを用いた。陸面の物理パラメータは一定値を取り、陸面全体の粗度係数を、4 m または 0.1 m にした。大気の初期条件と境界条件は、NCEPの解析データを用いた。海面温度は、観測値を与える。モデルの計算期間は、海岸沿の平野部に雪が観測される里雪型を含む時とし、2001年1月26日00Zから29日00Zま

でとした。最初の 1 日は計算安定のための予備実験期間と考え、27日00Zから29日00Zまでの1 時間毎の出力を解析に用いた。この期間の総観規模の概況は、26日から27日にかけて低気圧が北陸域を通過し、降水が発生しており、その後、冬の北東季節風が強まって、里雪型の降水が発生している。それ以降は山雪型となった。

結果と考察

降水の実況と数値実験結果は、北陸沿岸域で数値実験の降水量の見積もりが小さい結果となった。様々な要因が考えられるが、一つずつ消去していくと陸面の影響と、側面境界条件の問題が残る。ここでは、地表面パラメータを見直し、粗度に注目した。陸面粗度に関しては、本比較期間、比較領域の AMeDAS 観測点の平均風速は約 2.7 m/sで、それらの観測高さは平均で約 7.6 m 程度であるから、中立を仮定した風速の鉛直分布の対数則を用いると観測値が 7.6 m で2.7 m/s であれば、 $Z^*=20\text{m}$ では、粗度が 0.1 m から 1 m 程度であれば3 m/s から 4 m/s 程度でなければならず、粗度値 0.1m の数値実験結果の $Z^*=20\text{m}$ での平均値 7.7 m/s は、強すぎると考えられる。加えて、樹木の分布などを考慮すれば、粗度値を大きく修正することは妥当なものと考えられる。そこで、粗度値を 4.0 m とした実験との降水量の比を示した。それぞれの 28 日 00Z から 12Z までの平均時間降水量(mm/hour)を P_r^n , P_r^z とすれば、 $\log(P_r^z / P_r^n)$ を描いた。濃い影で塗られた領域が能登半島から佐渡ヶ島南部にわたって広がっている。この他にも、陸面での冷氣キャノピー形成についても議論でき、陸面粗度の与える降雪分布への影響は比較的大きい。

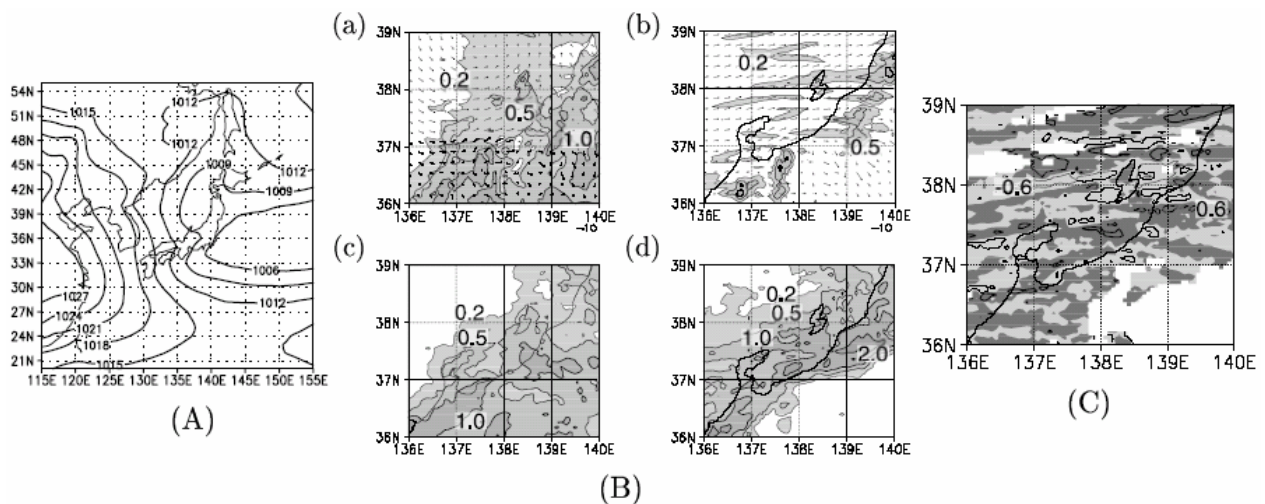


図13 (A):2001年1月27, 28日の2日平均海面更正気圧。(B):(a), (c)は27日全日、(b), (d)は28日00Zから12Zまでの平均時間降水量(mm/hour)。(a), (b)は陸面粗度0.1mの数値実験結果で、(c), (d)はレーダアメダス解析雨量。(a), (b)には $Z^*=20\text{m}$ の平均風速を描いた。(C):28日00Zから12ZまでのN05nの降水量 P_r^n とZ05nの降水量 P_r^z の比を $\log(P_r^z / P_r^n)$ として描いた。0より大きい部分に濃い影をつけ、小さい部分に薄い影をつけた。抜けた部分は降水量の少ない領域である。 -0.6 , 0.6 に等値線を描いた。 $10^{0.6}$ は約 4 である。

II. 季節～年々スケールの予測可能性

II-1. 春季シベリアから初夏東アジアへの天候影響

晩冬の北大西洋振動（NAO）の偏差によって北シベリアの陸面温度、積雪の偏差が誘起され、さらに陸面温度の偏差は東シベリアにシフトし、初夏の東アジアにおける気候偏差、すなわちオホーツク高気圧の頻度や持続性と梅雨域の降雨の多寡に影響を与えていることがデータ解析からわかった（図14-16）。シベリアの気温偏差の形成にはNAOに伴う西風偏差が北大西洋の気候学的暖気を移流すること、春から初夏にかけての気温偏差の東進は、北進してくる気候学的西風による移流が効くことがわかった。

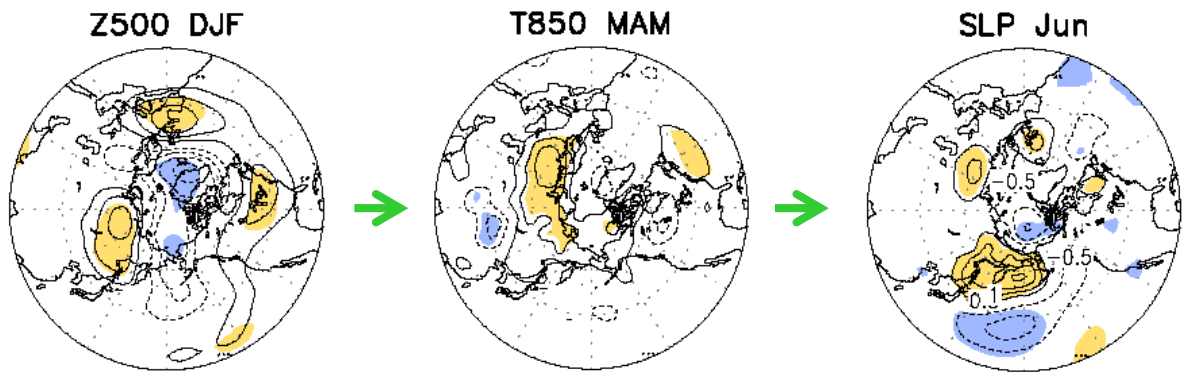


図14 6月オホーツク海域で平均した海面気圧偏差と各種変数の回帰係数図。（右）6月の海面気圧偏差、（中）先立つ3-5月平均の850hPa気温偏差、（左）同じく12-1月平均の500hPa高度偏差。

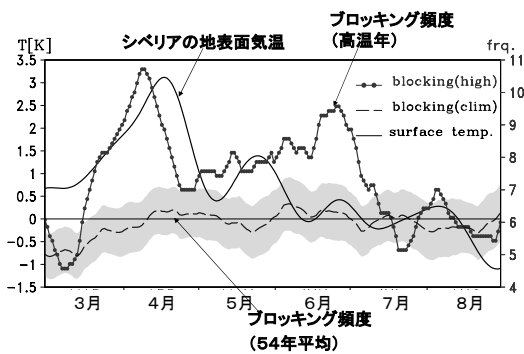


図15 4月シベリア北部の地表気温偏差が大きかった年の極東におけるブロッキング頻度の指数。破線と陰影域は、ブロッキング指数の過去54年間の平均値と1標準偏差範囲。4月のシベリア高温の影響が7月初めまでより下流のブロッキング頻度に影響を与えている。また図は省略するが、ブロッキングの強さ、持続性も平年に比べて増大することがわかった。

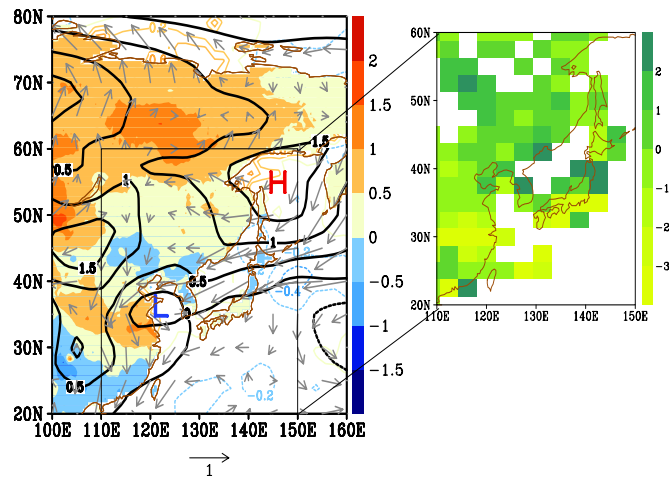


図16 4月シベリア北部の地表気温偏差が大きかった年の5-6月の偏差合成図。（左）陰影は地表気温、等値線は海面気圧、矢印は850hPa風ベクトル、海上の色付き等値線は海面上の気温。（右）降水量偏差。典型的な冷夏型天気図になっている。

地表の高温偏差はブロッキングの頻発化をもたらすが、それはユーラシアでのダブルジェット傾向を強めるためと推察される。より詳しい解析が必要である。ユーラシア大陸が

冷夏、長梅雨など極東の初夏の天候に与える影響は、これまで明らかにされてこなかった。観測データの解析、モデル実験を通して今後十分な検討を要する。その折りも折り、2003年は10年ぶりの冷夏となった。この例ではシベリアの陸面温度はあまり関与していなかったように見えるが、北大西洋からの波動伝搬（テレコネクション）が盛んであったことがわかった。モデルによるhindcast実験を行った結果、北大西洋で5月頃から持続していた海面水温の負偏差パッチによって極東への波動伝搬が活発化することが示され、低温パッチ上空の低気圧偏差の下流側で起こった記録的な欧州熱波と日本の冷夏が関連していたことが示唆された（図17）。

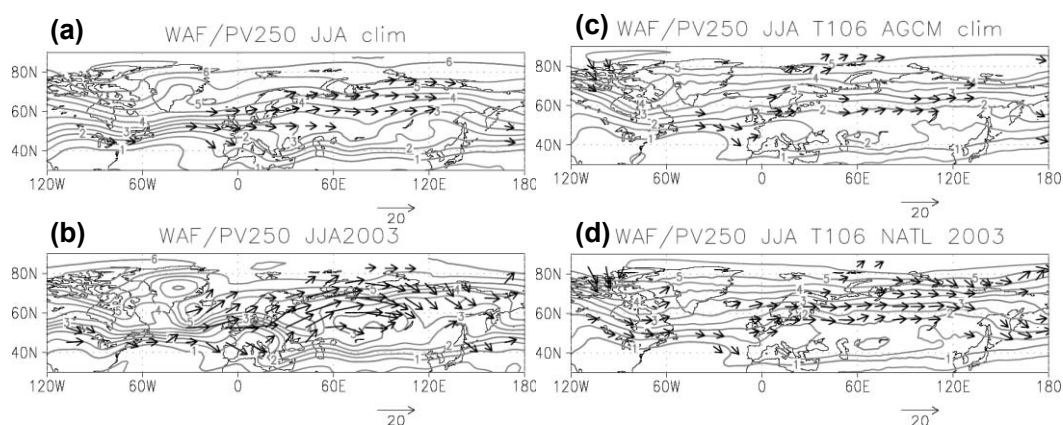


図17 夏季6-8月の月平均偏差波の活動度フラックス（矢印）とポテンシャル渦度（等値線）。(a)観測された気候学的平均値、(b)2003年夏、(c)2003年5月を初期値とするT106大気モデルによる10メンバーアンサンブル積分の結果（海面水温は気候値）、(d)(c)に同じ、ただし、北大西洋の負の海面水温偏差を与えたもの。気候値に比べて2003年はシベリア上空の波伝搬が活発だったことがわかり、それがモデルでもシミュレートされている。

II-2. アジアモンスーン水循環の主要変動モード力学と予測可能性

夏季アジアモンスーン域の水蒸気流束の年々変動偏差を長期間のデータから解析し、図18aに示すパターンを同定した。データ期間、用いる変数等を変えてもこの第1モードに変化はないため、統計的にロバストなモードである。西太平洋フィリピン沖とインドネシア上空の降水偏差のシーソリック変動で特徴付けられるので、Pacific-Indo Dipoleと名づけた。長江洪水の1998年夏、そして記録的な猛暑となった2004年夏はこのパターンが卓越した典型的な年である。

このパターンの成因について、データ解析、大気モデルおよび線型モデルによる数値実験に

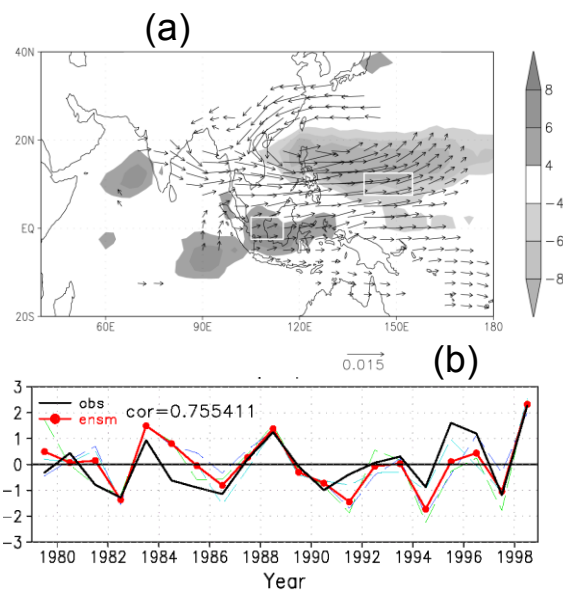


図18 (a) 夏季アジアモンスーン水蒸気フラックス変動の主要モード (Pacific-Indo Dipole)。水蒸気フラックス偏差 (矢印) および降水量偏差 (陰影)。 (b) Pacific-Indo Dipole の観測された年々変動 (黒) と観測海面水温を境界値とする高解像度モデルアンサンブル (メンバー数: 3) によるシミュレーション。両時系列間の相関係数は0.76。

より考察を行った。気候学的平均の海面水温を与えた大気モデルでも生起することなどから、このパターンは基本的には海面水温変動等「外的条件」の強制なしに生じうる大気の「内部変動」モードであることが明らかとなった。しかし同時に、色々な場所の熱帯海面水温偏差の組み合わせがこのパターンを励起できることもわかる。大気モデルを用いた数値実験によれば、このパターンの過去20年の夏の年々変動の分散の58%は観測された海面水温を与えた大気モデルアンサンブルにより再現できる(図18b)。

II-3. 秋の積雪が東アジアの厳冬を誘起

北半球冬季の中高緯度に卓越する変動として北極振動(AO)がよく知られている。本研究では、このモードの励起に関して、冬に先立つ秋のユーラシア大陸東シベリア域の積雪・気温偏差が果たす役割がこれまでの研究で指摘されている。ここでは、典型的な逆符号の例である1988/89年と2000/01年の事例について事後予測実験を行った。降雪があった後の10月の10日間の各日を初期値として翌年の2月まで、海面水温は気候値を与えて大気モデルを積分したところ、観測された符号のAOを励起することができた。初期値を10月の降雪が起こる前へずらすと応答が消えることから、シベリアの下層気温偏差がAO型偏差の励起に有効であることが確認された。

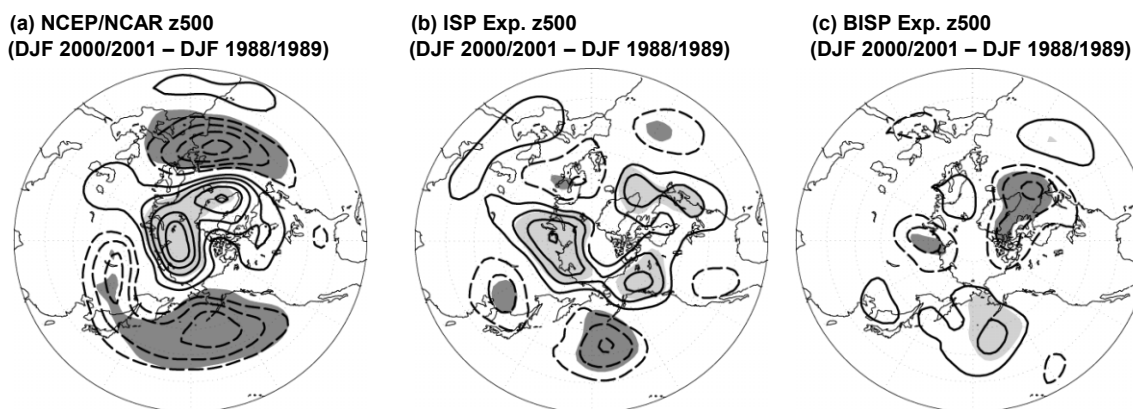


図19 12-2月3か月平均の500hPa高度の2000/01年と1988/89年の差。(a) 観測値。等値線は40m毎。(b) 10月を初期値とするモデルアンサンブル予報値の差。等値線間隔は10m。(c) (b)と同じ。ただし、初期値の日付が(b)より早く、2000年のケースでは降雪の前、1988年のケースでは暖気流入の前。いずれのパネルも95%有意な領域に陰影。

II-4. エルニーニョ年東アジアの冷夏について

統計的に、エルニーニョ年の夏は東アジアでは冷夏になる傾向が強いことが知られているが、そのメカニズムは不明である。過去50年間10ケースのエルニーニョ(および同数のラニーニャ)事例を解析し、東アジアの低温は、ユーラシア大陸中緯度に広く東西帯状に広がる低温偏差の一部であり、下層から上空まで同符号の順圧的なものであることが明らかになった。このテレコネクションの成因を探るため、エルニーニョに伴う海面水温偏差を湿潤線型モデルに与える数値実験を行った。図20に示すように、熱帯太平洋の海水温

偏差だけでは東アジアの低温偏差の大きさの再現は十分でないが、インド洋の海水温正偏差を加えると改善される。エルニーニョ時の東アジアの天候予測に際し、インド洋の海水温の監視の重要性が示唆された。

インド洋の効果は同経度範囲でのハドレー型循環の励起とヒマラヤ等との相互作用によると思われる、現在解析中である。また、偏差形成には熱帯環状モード (TAM) が一定の役割を果たしていると考えられ、これを明らかにする必要がある。

II-5. 東アジアのストームトラックの近年のトレンドと温暖化の関係について

ジェット気流上を伝搬する数日周期の高低気圧集団の活発な領域はストームトラックと呼ばれている。また、ストームは傾圧的に発達すると考えられるのでストームの活動度は上空のジェットの速さに比例すると考えられ、多くの場所では成り立っている。しかし、極東付近はこれに反して、真冬、ジェットがもっとも強くなる時期にストームは不活発になるという逆説的な変化をすることが知られており、mid-winter suppression (ここではMWSと略す) と呼ばれている。

近年、MWS が起こりにくくなってきている、すなわち、真冬のストームが活発になってきているという長期傾向が観測データから指摘されており、地球温暖化との関連が推論されている。

このことを検証するため、現在気候 (1xCO₂) および温暖化条件 (2xCO₂) での高解像度大気大循環モデル実験を行った。図 21 に示すとおり、モデルは現在気候でのMWSをよく表現し、温暖化条件では真冬に活発化することが示された (ここでストームトラックは300hPa面での2-8日周期擾乱の運動エネルギーで定義した)。ジェットも相対的に弱くなっている。これは、温暖化によって海陸の温度差が小さくなり、

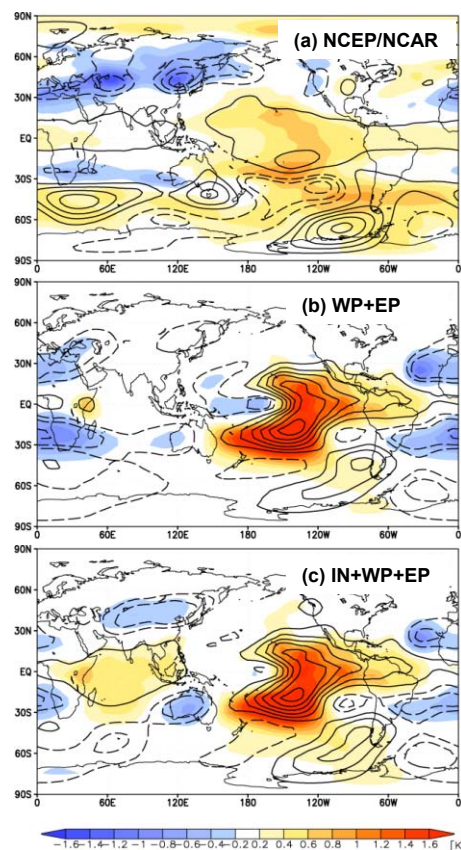


図 20 エルニーニョ時の夏 (6 - 8月) の200hPa高度 (等値線) および気温 (陰影) 偏差の合成図 (10ケースの平均)。(a) 観測。(b) 熱帯太平洋の海面水温を与えた線型湿潤モデルの結果。(c) (b)と同様。ただし、熱帯インド洋の海面水温偏差を加えたもの。

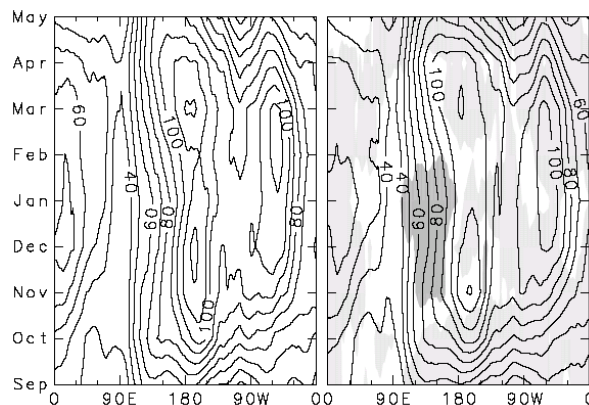


図 21 北緯35-45° 平均のストームトラックの各経度における9月-5月の季節変化。左は1xCO₂実験および右は2xCO₂実験と両実験の差 (陰影; 濃い陰影は正、薄い陰影は負)。

惑星規模の波動の振幅が小さくなり、極東のジェットが弱まることに対応していると考えられる。

II-6. アジアジェット導波管とNAOの下流への伸張 (渡部雅浩)

はじめに

近年の北大西洋振動 (NAO) と北極振動 (AO) に関する議論は、両者のインデックスが高い相関係数を示し、大西洋域の偏差分布に高い類似性が認められる一方で太平洋域の偏差が異なっているという事実により、両者の関係および大気長周期変動を理解する上でどちらがより本質的な「モード」か、ということが論点の一つになっている。そこでは、インデックスに対する海面気圧の回帰などが示すようにAOが半球적、NAOが領域的な変動であることが暗黙の前提になっていると見られる。しかし、本当にNAOはどう解析しても領域的な変動として同定されるのだろうか？ NAOとAOの空間スケールの違いを決める過程は何だろうか？ これらの疑問が本研究の動機である。結論から言えば、NAOは条件さえ整えば半球的な構造をとり得(それ全体を指してNAOと呼ぶのは不適切かもしれないが)、そのことは半球的な構造をもつAOに実体を与える重要な過程の一つであると考えられる。

手法

NAOやAOの偏差は冬季平均あるいは冬季の月平均場を時系列的に繋げて解析することで同定されることが多いが、ここでは月毎の大気偏差場を別々に解析することにする。データはNCEP/NCARの再解析で、12~2月の各月について1948~2002年の55年間の偏差場が使用できる。NAO、AOの偏差はそれぞれ、HurrellおよびThompsonとWallaceのインデックスに対する線型回帰係数(1標準偏差あたり)として定義する。また、力学診断のために水平波数T42で切断した線型の順圧モデルを用いる。モデルの演算子は冬季の各月における300hPa気候値のまわりで線型化されており、4次の粘性項と減衰時間10日のレイリー摩擦を含む。

結果

a. 線型回帰

まずはじめに、月別にNAO/AOインデックスの同時相関係数を見てみると、寒候期の11~4月の全てで0.5以上の有意な相関を示すが、冬季平均の時系列に基づく相関係数を越えて

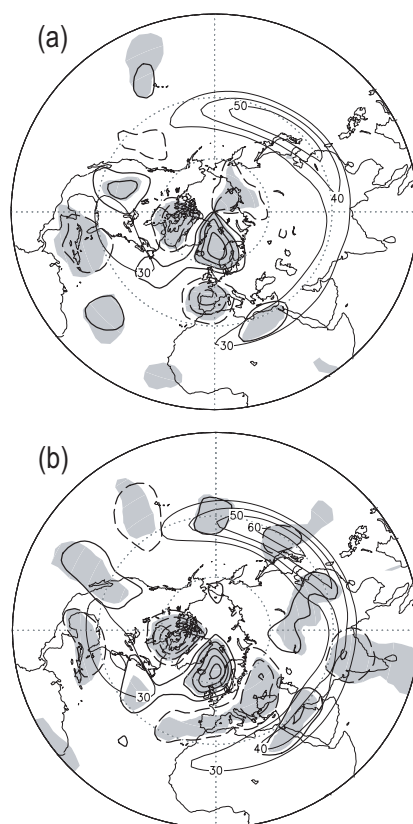


図2. 月平均のNAOインデックスに対する300hPa南北風の線型回帰係数, (a) 12月, (b) 2月. 等値線は1m/sごと, 陰影は95%で有意な領域. 細実線は当該月の300hPa東西風の気候値.

いたのは2, 3月だけであった。とりわけ2月には0.89という最大の相関係数を示す。NAOに対する各月の温度・高度場偏差は大西洋域ではほとんど変わらないものの、2月には東アジアの下層昇温および東アジア～北太平洋上層のリッジを伴い、結果としてAO偏差とよく似た半球的な拡がりを見せる。こうしたNAO偏差の空間スケールは、12月と2月の対流圏上層南北風偏差を比較することでより明確になる(図2)。12月には有意な偏差は北米・北大西洋・北極海に限られているが、2月になると東西方向に連なる波列状偏差が亜熱帯ジェット軸に沿ってユーラシアから北太平洋に現れる。HoskinsとAmbrizzi(1993)やBranstator(2002)の結果を思えば、これは導波管としてのアジアジェットを伝播する定常ロスビー波だと解釈したくなる。実際、同様の回帰図をロスビー波ソースに対して計算すると、2月には地中海から中東にかけてのアジアジェット入り口付近に有意な偏差がいくつかあることが分かる。これらはほとんど fD (ストレッチング)項によるものだが、より具体的にそのうちのどれが最も重要なのかはデータからは確認できない。また、アジアジェットは2月に最も強まるので、導波管がしっかり形成されることが2月のNAO偏差の下流への伸張を助けているという可能性もある。これらの点を確認するために、順圧モデルを用いた診断を行ってみた。

b. 順圧モデルの診断

2月の気候値のもとで、回帰で得たロスビー波ソースの偏差を与えて定常応答を求めると、モデルはほぼ観測された流線関数偏差を再現する。次に、Green関数を用いて、任意のターゲット領域に関する最適渦度強制を推定した。ターゲット領域としては、東アジアの下層昇温に対応する上層のリッジ(図2b)を選ぶ。最適強制の分布は、熱帯インド洋の大きな正負の強制に加えて、アジアジェット入り口の地中海付近に正の極大をもつ。これは、基本場が12月であってもほとんど変わらない。NAOに伴う2月のロスビー波ソースの偏差には確かに同じ地域に正の渦度ソースが見られたことから、NAOが下流に伸張するかどうかは、ジェット導波管の成熟具合ではなくNAO自身が地中海上空に収束偏差を伴うかどうかによると考えられる。実際、2月以外であっても、この条件を満たしていればNAOはAO的な構造をもつことを確認した。地中海の収束偏差は、NAOの(年々の)ちょっとした構造の違いに依存しているようだが、そこに何が関わっているかを明らかにすることは今後の課題である。

3. 研究実施体制

基幹グループ

- ① 研究分担グループ長 木本 昌秀(東大気候システム研究センター、教授)
- ② 研究項目 大気および大気海洋結合大循環モデルの高解像度化に向けた調整
大気大循環モデルによる数値実験の実施

大気モデル開発サブグループ(1)

- ① 研究分担グループ長 野沢 徹(国立環境研究所、主任研究員)
- ② 研究項目 20世紀気候再現実験に向けた境界条件データの整備、モデルの気候感

度解析

大気モデル開発サブグループ（2）

- ① 研究分担グループ長 熊倉 俊郎（長岡技術科学大学、助手）
- ② 研究項目 大気-陸面結合過程の高度化に関する検討

大気モデル開発サブグループ（3）

- ① 研究分担グループ長 江守 正多（地球フロンティア、研究員）
- ② 研究項目 大気大循環モデル、大気海洋結合モデルの高解像度化に向けたプログラム開発、気候感度実験の実施

大気モデル開発サブグループ（4）

- ① 研究分担グループ長 井上 孝洋（高度情報化学技術研究機構、研究員）
- ② 研究項目 大気大循環モデルと領域モデルの結合に関する数値実験

大気モデル開発サブグループ（5）

- ① 研究分担グループ長 斉藤 和雄（気象庁予報部、予報官）
- ② 研究項目 大気大循環モデルの高解像度化、領域大気モデル並列化

予測グループ（6）

- ① 研究分担グループ長 尾瀬 智昭（気象庁気候・海洋気象部、気候モデル開発推進官）
- ② 研究項目 長期予報事例の検討。データ同化手法、モデル物理過程の改良。

4. 主な研究成果の発表

(1) 論文発表

- Watanabe, M. and F.-F. Jin, 2004: Dynamical prototype of the Arctic Oscillation as revealed by a neutral singular vector. *Journal of Climate*, 17, 2119-2138.
- Weng, H., A. Sumi, Y. N. Takayabu, M. Kimoto, and C. Li, 2004: Interannual-interdecadal variation in large-scale atmospheric circulation and extremely wet and dry summers in China/Japan during 1951-2000. Part I: Spatial patterns. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, no.2, 775-788.
- Weng, H., A. Sumi, Y. N. Takayabu, M. Kimoto, and C. Li, 2004: Interannual-interdecadal variation in large-scale atmospheric circulation and extremely wet and dry summers in China/Japan during 1951-2000. Part II: Dominant timescales. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82, no.2, 789-804.
- Inatsu, M. and B. J. Hoskins, 2004: The Zonal Asymmetry of the Southern Hemisphere Winter Storm-Track. *J. Climate*, in press.
- Sakamoto, T., A. Sumi, S. Emori, T. Nishimura, H. Hasumi, Ta. Suzuki, M. Kimoto, 2004: Far-reaching effects of the Hawaiian Islands in the CCSR/NIES/FRCGC high-resolution climate model. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31,

No. 17, L17212, doi:10.1029/2004GL020907, 2004.

- Shige, S., Y. N. Takayabu, W.-K. Tao, and D. E. Johnson, 2004: Spectral Retrieval of Latent Heating Profiles from TRMM PR Data. Part 1: Development of a Model-Based Algorithm. *J. Applied Meteor.*, in press.
- Watanabe, M., and F.-F. Jin, 2003: A moist linear baroclinic model: Coupled dynamical-convective response to El Niño. *J. Climate*, 16, 1121-1139.
- Arai, M., and M. Kimoto, 2004: Relationship between springtime surface temperature over Siberia and early summer blocking activity over the northwest Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, in press.
- Inatsu, M., and M. Kimoto, 2005: Two types of interannual variability of the mid-winter storm-track and their relationship to global warming. *SOLA*, submitted.
- Lombard, A, A. Cazenave, P-Y. Le Traon, and M. Ishii, 2004: Contribution of thermal expansion to present-day sea level change revisited. *Global and Planetary Change*, submitted
- Cha, E.-J., E.-J. Lee, and J.-G. Jhun, 2004: The characteristics and causes of extreme rainfall events in August over Korea. *International J. Climatol.*, in press.
- Ishii, M., M. Kimoto, K. Sakamoto, and S. Iwasaki, 2005: Historical Ocean Subsurface Temperature Analysis with Error Estimates – Revised *Mon. Wea. Rev.*, submitted.
- Inatsu, M., and M. Kimoto, 2005: Difference of boreal summer climate between coupled and atmosphere-only GCMs. *SOLA*, submitted.
- Miura, H., and M. Kimoto, 2005: A Comparison of Grid Quality of Optimized Spherical Hexagonal-Pentagonal Geodesic Grids. *Mon. Wea. Rev.*, in press.
- Kimoto, M., N. Yasutomi, C. Yokoyama, and S. Emori, 2005: Projected changes in precipitation characteristics near Japan under the global warming. *SOLA*, submitted.
- Emori, S., A. Hasegawa, T. Suzuki and K. Dairaku, 2005: Validation, parameterization dependence and future projection of daily precipitation simulated with a high-resolution atmospheric GCM. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L06708, doi:10.1029/2004GL022306.