

# 階層的モデリングによる広域水循環予測

研究代表者  
木本 昌秀

# 階層的モデリングによる広域水循環予測

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)

## 1. 全体の構想

水循環予測に対する社会的な要請と期待は大きく、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たアプローチはこれに応えるもっとも有望な手段の一つである。本研究は、数値モデルを用いて、時間的には季節～年々、空間的にはおよそ 1000km 以上のスケールでの広域水循環変動の予測可能性を明らかにすることを目指す。とくに日本にかかわりの深いユーラシア～東アジア域を中心に考察する。モデル開発、水循環に関する種々の気象現象の解析はこれまでも精力的に行われてきたが、長期予測可能性についての検討は不十分である。本研究では、数値モデルによる広域水循環変動の再現性を高め、その予測可能性について明らかにすることを目指す。既存のモデルによって多数の予測例を稼ぎ点数を評価することを目的とするものではなく、いつ、どのような現象が、なぜ、またどのように予測可能なか、についての検討に重点を置く。

## 2. 研究手法と体制

本研究課題の特徴は、多様なモデルを開発・使用し、さまざまな角度から広域水循環の予測可能性の評価とそのメカニズム解析を行うことである。研究はおおまかに、

- (1) モデル開発
- (2) 予測可能性評価

に分けられる。

文字通り大気に国境はなく、日本のように限られた地域といえども、数週間以上の長期予測となると世界中の他の地域からの影響を受けるため、全球の大気、水循環を表現する大気大循環モデル (Atmospheric General Circulation Model; AGCM) が広域水循環変動の予測のもっとも重要な道具である。しかし、現在広く用いられている AGCM の水平格子サイズは 300km 程度と粗く、梅雨前線や降雨をもたらす気象擾乱の表現が十分でない。また、格子点以下の現象を格子平均量で表現する「パラメタリゼーション」手法を用いざ

るを得ないため、広域水循環の再現性にも課題が多い。ここでは、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モデルの高分解能化、パラメタリゼーションの精度向上を図る。また、長期予測にはエルニーニョなどの大規模大気海洋相互作用の表現も不可欠である。大気海洋結合モデルの高精度化も行う。さらに、大循環モデルで扱えない局地気候を扱ったり、パラメタリゼーション改良に資するために雲解像モデルも用いる。

気候系は複雑な非線形システムであり、そこに生ずる変動のメカニズムの理解には、現実と同様の複雑さをもつ大循環モデル出力の解析のみでは不十分な場合が多い。このため、熱源に対する応答や大規模場のもとでの高低気圧集団 (ストームトラック) の振る舞いなどの定量的解析を行うことができる線形モデルを構築し、メカニズム解析に資する。

大気大循環モデルを中心に上記のような多様なモデルを駆使して、東アジアを中心とした広域水循環の長期変動の主要モードの同定、メカニズムの解析を行い、それをもとに、特徴ある変動、年に焦点を当てた事後予測実験等を行い、予測可能性を評価する。

東京大学気候システム研究センター、国立環境研究所大気物理研究室、地球環境フロンティア研究センターの合同チームを中心にモデルの開発、改良を行っている。長岡技術科学大、北大でもモデル開発と予測可能性研究を進めている。気象庁予報部からは雲解像モデルの提供を受けると同時にモデル開発について情報交換し、気象庁気候・海洋気象部とは予測可能性について研究協力を行っている。

## 3. 研究成果の概要

### 3-1 モデル開発

#### 大循環モデルの高解像度化

東大気候システム研究センター (CCSR) と国立環境研究所 (NIES) の合同チームは、十年来

にわたってCCSR/NIES AGCMの開発を行ってきた。ここ数年来、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110km、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精力的にすすめてきた。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やモンスーン域の季節内変動などが改善された。高分解能大気海洋結合モデルは、大気の水平解像度110km（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。

さらなる高解像度化を目指し、また、大気海洋双方における解像度のインパクトを明らかにするために、大気、海洋の高解像度、中解像度版を互いに差し替えたモデルを構築した実験も行った。

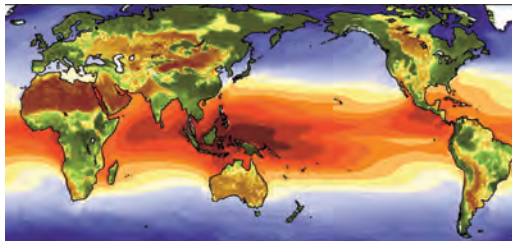


図1 高解像度大気海洋結合モデルでシミュレートされた海面水温と土壌水分量の年平均値。

大気海洋のあらゆる組み合わせにおいて、人為的なフラックス調整なしで、ドリフトのない良好な現在気候を再現することができた。本モデルの最大の課題の一つは熱帯太平洋におけるエルニーニョ現象の振幅を過少評価している点であるが、実験した結合モデルの組み合わせのうち大気海洋双方の最高解像度版（大気約60km、海洋20～30km）では、海面水温の誤差がもっとも少なく、エルニーニョの振幅にも改善の兆しが見られた。現在その要因を分析中である。

### モデルの高精度化

大気大循環モデル及び大気海洋結合モデルの大幅な改良を行った。主な改良項目は以下のようなものである。

- ・多数ノードによる計算に耐えるプログラムの並列効率化、高速化。
- ・各種サブモデルとの結合を行うためのカップラープログラムの整備、モザイク結合の導入。
- ・大気における鉛直ハイブリッド座標オプションの導入。
- ・格子移流スキームの改良、標準オプション化
- ・海洋モデルの自由表面化、ハイブリッド鉛直座標導入。
- ・新規海洋混合層過程の導入と改良。結合モデルでの現実的なエルニーニョ再現等に有効である。
- ・エアロゾル第一種、第二種間接効果の標準化。エアロゾル輸送モデルの結合。
- ・積雲対流のトリガリング過程（成層不安定状態から実際に対流を生起させる過程）の導入。これにより、熱帯域の季節内変動の表現力が大き

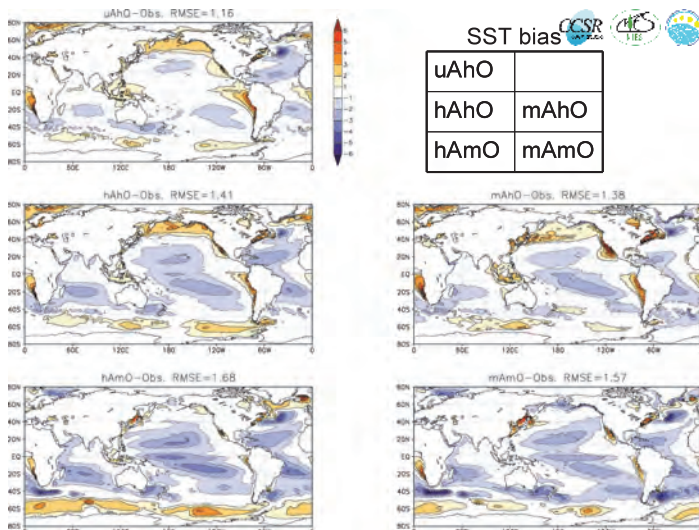


図2 大気海洋結合モデルによって計算された海面水温年平均気候値の観測値との差。各パネルは大気および海洋の解像度が異なる。各パネル上段の「RMSE」は観測値との根平均二乗誤差を表す。

- (左上) 大気水平約60km 鉛直56層、海洋 $1/4^{\circ} \times 1/6^{\circ}$  鉛直48層
- (左中) 大気水平約110km 鉛直56層、海洋 $1/4^{\circ} \times 1/6^{\circ}$  鉛直48層
- (左下) 大気水平約110km 鉛直56層、海洋 $1^{\circ} \times 1.4^{\circ}$  鉛直44層
- (右上) 大気水平約300km 鉛直20層、海洋 $1/4^{\circ} \times 1/6^{\circ}$  鉛直48層
- (右下) 大気水平約300km 鉛直20層、海洋 $1^{\circ} \times 1.4^{\circ}$  鉛直44層

く向上することを見出した。

- ・積雲摩擦、雲頂でのエントレインメント不安定過程の導入。
- ・大気境界層湿潤クロージャの高度化。
- ・雲過程の改良。とくに水雲と氷雲の分配、氷雲の落下過程の改善。このプロセスは、モデルの気候感度（地球温暖化時の昇温の程度など）に決定的な役割を果たしていることがわかった。
- ・放射計算における雲のマキシマムランダムオーバーラップの導入。
- ・雲などに関わる各種診断量の導入。

また、多数の実験から明らかになった大循環モデル物理過程の改良課題は以下のようなものである。

- ・雲微物理過程の改良、とくに雲水、雲氷の独立予報スキームの検討。
- ・境界層雲の再現性の向上。
- ・積雲対流のトリガリング過程の精度向上。境界層、自由大気と積雲の相互作用の精緻化。
- ・積雲や境界層における運動量鉛直輸送。
- ・海洋混合層過程、とくに安定成層時の拡散のコントロール。

### 解像度のインパクト

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ゆく必要がある。

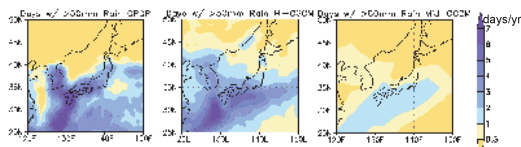


図3 日降水量 50mm 以上の年間日数の気候値。(左) 衛星による推定、(中) 高解像度 (~110 km)、(右) 中解像度 (~300km) 大気大循環モデルによるシミュレーション。

### 湿潤線形モデルの構築

すべてのプロセスを含む大循環モデルは広域水

循環予測のもっとも重要なツールであるが、その複雑さゆえ、現象や予測可能性の要因分析が困難な場合も多い。熱帯の大規模対流の偏差への応答としてどのような循環の偏差が期待できるかといった分析には、大循環モデルの力学部を線形化したモデルが有用である。本課題でもこのようなモデルを構築し、また、世界に先駆けて湿潤過程を含むように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при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）の解釈に湿潤線形モデルが有効であることを示すことができた。

### 局地降積雪のシミュレーション

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。

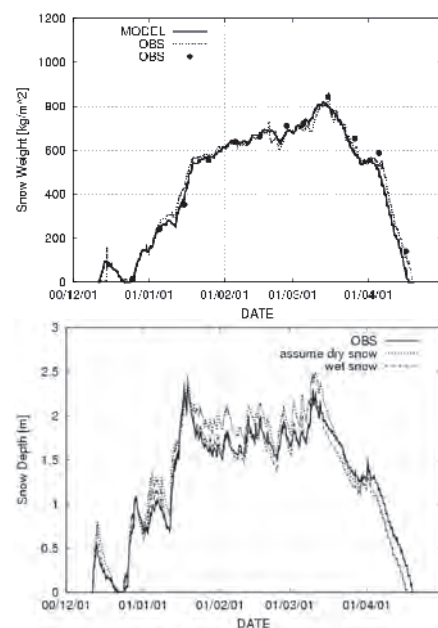


図4 (上) 積雪重量と (下) 積雪深。実線がモデル計算結果で、点線が観測結果、さらに、黒丸はスノーサンプラーを用いた積雪水当量観測結果で、細点線は乾雪を仮定した積雪深である。

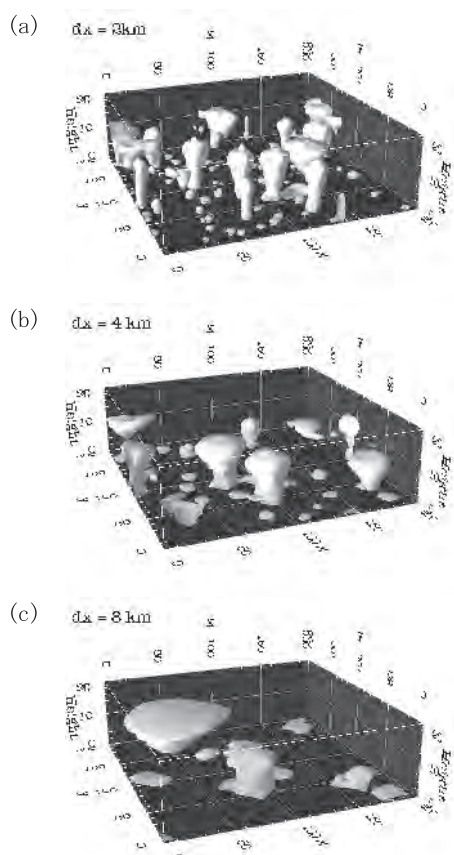


図5 異なる解像度で実験を行った際に、雲解像モデルで表現された雲。水平格子間隔はそれぞれ(a) 2 km, (b) 4 km, および(c) 8 km。

#### 雲解像モデルと大気大循環モデルの結合

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-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を構築した。大循環モデルと雲モデルの結合に伴う鉛直内挿誤差を原因とする計算不安定が生じ、これは擬似拡散の導入や、より理想的には双方向交換性を保障する内挿法の導入によって回避できることはわかったが、雲モデルの長期積分時の安定性やさらに要求される計算資源の大きさ等、解決すべき種々の技術的問題があることが明らかになった。そこで課題後期では、大循環モデルに埋め込むモデルを必ずしも雲の解像できる解像度に限定せず、既存領域モデルと大循環モデルの双方向結合系を構築することとし、現在テストを続けている。本課題期間中には特段の科学的成果をあげるには至らなかったが、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、今後も堅実に進捗させ

る予定である。

また、上記のような雲解像モデルのこれからの用途拡大への準備として、大循環モデルスケールの水熱収支が雲解像モデルの解像度にどのように依存するかを調べる基礎調査を行った。その結果、数 km 格子といえども雲内とその外側の自由大気との間の気塊混合を十分には表現できず、そのために大規模場の水熱収支に系統的な誤差が生じることを明らかにした。

#### 3-2 予測可能性

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の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、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。

#### 春季ユーラシア大陸の東アジア初夏天候への影響

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、引き続き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。この現象は、近年の天候トレンドや温暖化時の気候変化にも大きな意義を持つ。

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ことを数値モデルでも検証し、また、それが欧州熱波

とも関連した北大西洋の低海水温に起因することを数値実験によって示した。

#### 夏季アジアモンスーン水循環の主要変動モード

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、線形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とも存在する。しかし、年々異なったパターンで変動する海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力である。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。

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

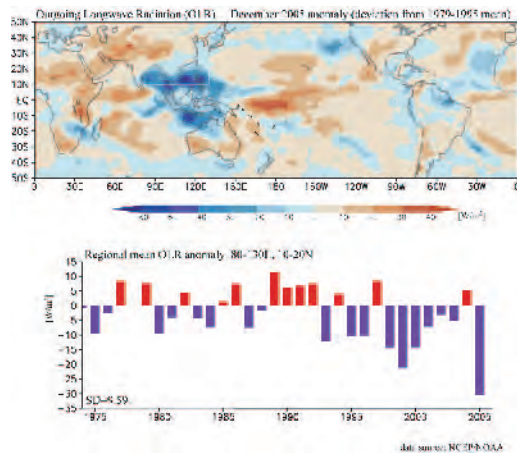


図6 (上) 2005年12月の月平均外向き長波放射(OLR)の偏差分布。暖色系の領域では降水活動が平年よりも不活発、寒色系の領域では活発だったことを表す。(下) インドシナ半島の80°-130°E、10°-20°Nで平均した12月のOLR偏差の長期変化を表す時系列。2005年は異常に大きな負偏差が生じており、対流活動が非常に活発であったことを表している。

傾向のメカニズムについて湿潤線形モデル等による解析を進め、インド洋海水温の影響、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。

#### 2005/2006年の日本の寒冬に関する数値解析

広域水循環と言うと、つい夏の雨や台風が目が行きがちであるが、大規模な異常気象に伴う冬の豪雪も重要な要素である。このことを端的に示したのが昨冬(2005/2006)年の寒冬であった。特に2005年12月には、日本上空には強い寒波が停滞し、日本海側では記録的な大雪にみまわれた。この寒冬をもたらしたメカニズムを、線形モデル、大循環モデルを用いて調べた。

2005年12月の平均的な大気循環は、いわゆる負の「北極振動」に似た偏差を示していた。すなわち、北極域が高気圧、ヨーロッパや東アジアが低気圧性の気圧偏差パターンである。これに伴い、日本上空のジェット気流が蛇行しながら南下し、その北側には大陸からの強い寒気が流れ込んだ。これが、寒冬をもたらした状況であった。北極振動そのものは、我々の最近の研究成果が示すように、中高緯度大気循環に内在する変動で、1ヶ月を越えるような予測は困難であると考えられる。

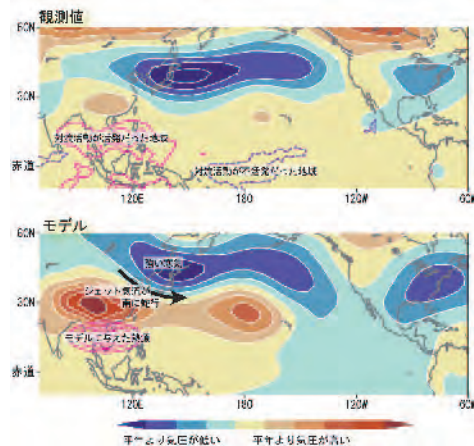


図7 (上) 2005年12月の観測された月平均の500hPa面高度場偏差。赤色は対流圏の気圧が平年よりも高いことを、青色は低いことを示す。熱帯域の実線と破線は、図3に示されたOLRの偏差が各々 $-20\text{W/m}^2$ 以下、 $20\text{W/m}^2$ 以上の領域。(下) インドシナ半島に楕円形の非断熱加熱を与えて解いた500hPa高度場偏差の定常応答。

しかしながら、今回の寒冬をもたらした負の「北極振動」の出現には、通常と異なり、低緯度の降水活動が深く関わっていたことが分かってきた。図6（上）は、2005年12月で平均した外向き長波放射（OLR）の偏差（平年からのずれ）分布図であり、赤色の領域では平年よりも雨が少なかったことを、青色の領域では多かったことを表す。全体として、ラニーニャ出現時の様子に似ているが、注目すべきはインドシナ半島付近の大きな負偏差である（青色の濃い部分）。実際、2005年12月にはインドシナ半島付近で停滞する対流活動が何度か観測されており、領域平均したOLR偏差の時系列を見ても、このときの偏差はデータの存在する1974年以降で最大であることが分かる（図6下）。

熱帯のある領域で対流活動が活発であれば、そこでの非断熱加熱の余分な放出は広域の大気循環を変化させる要因となり得る。そこで、線形モデルに理想化したインドシナ半島付近の熱源を与えて、中緯度大気の定常応答を求めた（図7）。観測では、日本上空から北太平洋にかけて強い気圧の谷が見られているが（図7上の青色部分）、モデルによる応答でも同様であった（図7下）。半球全体の偏差分布（図略）も、線形モデルの診断結果は観測された負の「北極振動」パターンによく似ており、このことから、インドシナ半島付近で降水活動が活発化したことが、豪雪をもたらした今回の寒冬の重要な要因であったと結論づけることができた。さらに、なぜインドシナ半島で降水が多かったのかを明らかにするために、気象庁数値予報データを詳細に解析したが、対流活動の活発化はラニーニャ的なSSTの変動に必ずしも

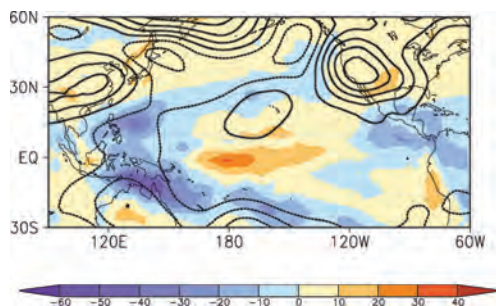


図8 2005年11月初旬を初期値とし、観測された海面水温を与えた大気大循環モデルによる2005年12月の外向き長波放射（OLR）偏差（陰影；単位  $W/m^2$ ）および500hPa高度偏差（等値線；10m毎）。10メンバーアンサンブル平均。

帰するわけではないらしいことが分かってきた。従って、今回の診断では湿潤線形モデルよりも、図7に示した乾燥モデルの方が適切であった。

今回の事後解析では線形モデルによる要因分析の有用性を示すことができた。しかし、実際の予測に用いられる大循環モデルはどの程度まで、今回の寒冬をシミュレートできるだろうか。今回は実際に観測されたSSTを境界条件として与えた、11月初旬の異なる（1日ずつずれた）初期値から始めた10のアンサンブル積分によってこのことを見てみる。なお、用いたモデルは水平解像度約300kmの大気大循環モデルである。

図8の陰影は、モデルアンサンブル平均による2005年12月のOLR偏差を示している。先の図6（上）に対応する。問題のインドシナ半島の負偏差は、観測ほどの大きさではないものの、西太平洋での全体的なパターンはよく再現されていると言ってよいだろう。図8の等値線は同じく12月の500hPa高度偏差である。やはり定量的には観測に及ばないものの、日本付近で北西の季節風が強化されるような気圧配置はおおむね再現されている。

図9は観測と大循環モデルによる500 hPa高度偏差を北半球スケールで見たものである。観測は確率過程の一実現値であるのに対し、モデルではアンサンブル平均をとっているため、偏差の大きさが小さくなってしまっているが、前述した負の北極振動的な要素はモデルでもある程度再現されていることが興味深い。

大循環モデルの実験では観測されたSSTを全球で与え、かつ、初期値も観測値を用いているため、このような再現性のよさがどの要因から来る

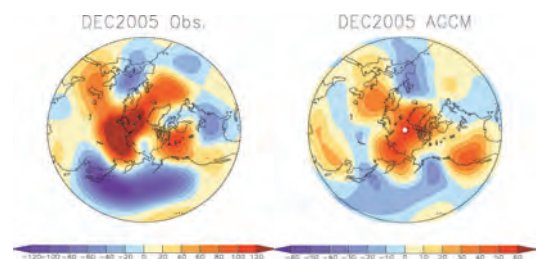


図9 2005年11月初旬を初期値とし、観測された海面水温を与えた大気大循環モデルによる2005年12月の500hPa高度偏差。(左)観測、(右)モデル（10メンバーアンサンブル平均）。観測とモデルでは陰影のスケールが異なることに注意。

のかは追加実験が必要である。しかし、インドシナ付近の対流の活発化が今回の重要な要因の一つであったことは強く示唆されている。果たして、対流の活発化が特定領域の SST 偏差によるものか、あるいは全体のパターンが問題となるのか、また、乱雑で予測不可能な循環変動の中から偶々生じたものであるのか、より詳細な解析が必要である。

### 大気海洋結合モデルによる過去 20 年の事後予測実験

広域水循環の数か月以上の予測は究極的には観測データで初期値化された大気海洋結合モデルで行われるべきものである。しかし、現状ではモデル、データ同化ともに課題が多く、熱帯太平洋のエルニーニョ現象のような大振幅の気候変動を除いては有用な予測を行うに至っていない。

本課題は、必ずしも過去の事例を網羅した予測実験を行い、そのスキルの多寡を論ずることを旨とするものではないが、一方で事例解析、事後の要因分析だけでは、有用な予測実現への道は開け

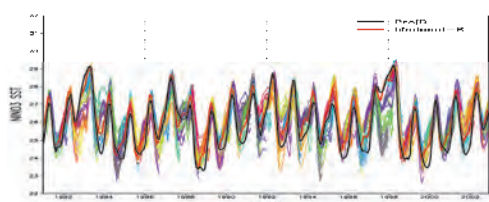


図10 エルニーニョ監視海域 (5S-5N, 150W-90W) における海面水温の時系列。黒太線：観測値、赤太線：実験 B の初期値、細線：実験 B の予測値。

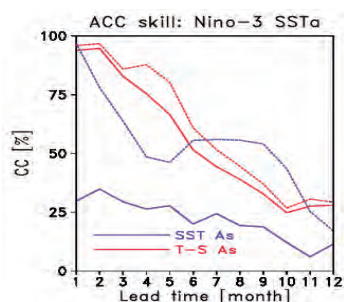


図11 エルニーニョ監視海域 (5S-5N, 150W-90W) での海面水温偏差の予測精度 (20 年間 80 事例の相関係数)。(青) 海面水温のみを同化した実験 A、(赤) 表層 700m までの水温を同化した実験 B。実線は、観測値に対する検証、点線は初期値に対する検証。

ない。

そこで、今回構築した大気海洋結合モデルが実際の予測にどの程度耐えるものか、研究の将来展開を睨んで事後予測実験を開始した。

結合モデルにおいては実際とモデルの気候値との誤差が無視できず、初期値化の方法が適切でないとモデル気候値へのドリフトによって予測がスポイルされてしまうことがよく知られている。今回は、ナッジングと呼ばれる手法によって結合モデルの海水温を観測値に近づけつつ長期間 (1981-2002 年) 積分して、結合系の初期値を構築する方法を取った。従来研究では、海面水温のみを同化していたが、今回はその方法 (実験 A) に加えて、我々が構築した過去 50 年間の全球表層海洋の水温客観解析データセットを用いて、700m 深までの水温を同化する方法 (実験 B) も試した。

図 10 は、実験 B での NINO3 と呼ばれるエルニーニョ監視海域における海面水温の観測値、初期値、予測値 (8-メンバーアンサンブル) の時系列である。図 11 は、NINO3 の海面水温の全事例に渡る予報精度を相関係数で表したものである。観測値に対する検証結果である実線を見ると実験 B の方が格段に精度がよいことがわかる。海面水温のみの同化では、海洋内部の水温、力学場が正しく初期化されず、予報開始とともに始まるモデル気候値へのドリフトが予測結果を深刻に汚染していることになる。

通例のエルニーニョ予測では、最初の数か月は力学予測よりも持続性予測、すなわち、予報開始時の偏差が予測期間中持続とする予測法の方が成績がよいのが通例で、持続予測と力学予測を

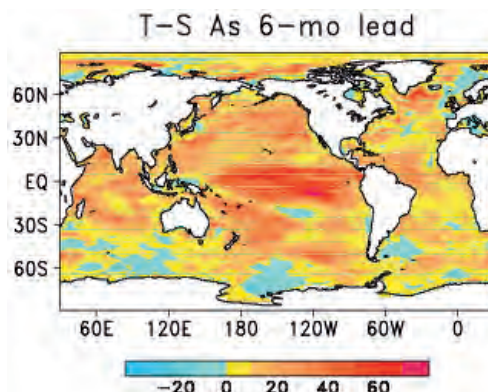


図12 実験 B の 6 か月アンサンブル平均予測結果の観測された海面水温偏差に対するスキル (相関係数)。



予測期間によってブレンドして用いる場合が多い。今回の実験 B ではそのような操作は行っていないが、予測初期も高いスキルを示しており、結合モデルの初期値化法として有用であることが示された。

今回は大気データを用いない初期値化であるため、大気循環の予測精度は十分でない。今後の大きな課題である。

#### 4. まとめと今後の課題

大気大循環モデル、大気海洋結合モデルについて、高解像度化、高精度化を行い、また、湿潤線形モデルの構築、積雪モデルの改良を行って、広域水循環予測に関する要因分析、予測システムの基礎を築くことができた。

東アジアの広域水循環の長期予測可能性について、梅雨期や冬季の降水変動に関わる Pacific-Indo ダイポールや北極振動に関連して一定の予測可能性があることが明らかになってきたが、予測として実用的なレベルにはまだ程遠い。今後は、大循環モデルを中心とし、データ同化、初期値化を含めた予測システムを構築し、より精度の高い予測実験へ進むべきである。同時に線形モデルや事後実験を駆使した要因分析、とくに顕著な変動事例でのキーファクターの解析を進める必要がある。

前節最後に紹介した結合モデルによる事後予測実験は実用的な予測システム構築への希望を抱かせるものであると考える。また、2005/2006 年の寒冬事例の分析例等を通じ、予報現業機関と研究コミュニティが連携したりリアルタイムの異常天候分析の体制が整備されつつあり、本課題の大きな波及効果の一例であると考えられる。

大循環モデルは、格子点以下の小スケール現象のパラメタリゼーションが 40 年来の課題であったが、計算機の進歩とともに、雲解像モデルをはじめとした小スケール現象を陽に解像できるモデルを用いた改良の新しい道筋が開けてきたばかりである。この方向は、今後数 10 年にわたって有望なものと考えられるので基礎的な調査を含めて研究を大いに推進すべきである。

このようなモデル改良、予測システムの構築は実際の観測データと遊離して行われることはありえない。モデルとデータの単なる比較ではなく、データ同化等、より有機的な両者の融合が広域水

循環予測の精度向上への王道であると考えられる。

#### 5. 主な研究成果

【査読付き論文 (印刷・受理済)】

- Arai, M., and M. Kimoto, 2005: Relationship between springtime surface temperature over Siberia and early summer blocking activity over the northwest Pacific. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 83 (2005) No. 2 pp. 261-267.
- Cha, E.-J., E.-J. Lee, and J.-G. Jhun, 2004: The characteristics and causes of extreme rainfall events in August over Korea. *International Journal of Climatology*, in press.
- Chen, X., M. Kimoto, and M. Takahashi, 2005: Changes in ENSO in response to greenhouse warming as simulated by the CCSR/NIES/FRCGC coupled GCM, SOLA, 1,149-152, doi: 10.2151/sola, 2005-039
- Emori, S. and S.J. Brown, 2005: Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate, *J. Geophys. Res.*, Vol. 32, No. 17, L17706, doi: 10.1029/2005GL023272
- 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
- Hirota, N., M. Takahashi, N. Sato, and M. Kimoto, 2005: Recent Climate Trends in the East Asia During the Baiu Season of 1979-2003, SOLA, Vol. 1, 137-140, doi: 10.2151/sola, 2005-036
- 稲津 将, 2005: 南半球冬季ストームトラックの東西非対称性の形成について～2005 年度山本・正野論文賞記念講演～, *天気*, 53 巻, 7 号 537-549.
- Inatsu, M., and M. Kimoto, 2005: Two types of interannual variability of the mid-winter storm-track and their relationship to global warming. SOLA, Vol. 1, 61-64.
- Inatsu, M., and M. Kimoto, 2005: Difference of boreal summer climate between coupled

- and atmosphere-only GCMs. SOLA, Vol. 1, 105-108.
- Ishii, M., M. Kimoto, M. Kachi, 2003: Historical ocean subsurface temperature analysis with error estimate. *Monthly Weather Review*, 131, 51-73.
- 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.*, Vol. 62, No. 2, pp. 155-170.
- 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.
- Kikuchi, K. and Y. N. Takayabu, 2003: Equatorial circumnavigation of moisture signal associated with the Madden-Julian Oscillation (MJO) during boreal winter. *J. Meteor. Soc. Japan* vol. 81, 851-869.
- Kikuchi, K. and Y. N. Takayabu, 2004: The development of organized convection associated with MJO during TOGA COARE IOP: Trimodal characteristics. *Geophysical Research Letters*, in press.
- Kimoto, M., 2005: Simulated change of the east Asian circulation under global warming scenario. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 32, No. 16, L16701, doi:10.1029/2005GL023383.
- Kimoto, M., N. Yasutomi, C. Yokoyama and S. Emori, 2005: Projected changes in precipitation characteristics near Japan under the global warming, SOLA, 1, 85-88, doi: 10.2151/sola.2005-023.
- 木本昌秀, 2004: 欧州熱波と日本の冷夏 2003. *日本気象学会誌天気*, vol. 52, no. 8, 608-612.
- Kobayashi C., S. Maeda, A. Ito, Y. Matsushita, and K. Takano, 2005: Relation between SSTs and predictability of seasonal mean precipitation over the western tropical Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 919-929.
- 熊倉俊郎, 早川典生, 2004: 降雪数値実験による北陸地方の降雪予測に関する研究. *水工学論文集*, 48, 277-282.
- 熊倉俊郎, 山野井克己, 早川典生, 2004: 積雪の多層圧密モデルを用いた北陸地方の降積雪現象の解析. *日本雪氷学会学会誌「雪氷」* 第66巻, 第1号, P. 35-50.
- Lombard, A, A. Cazenave, P-Y. Le Traon, and M. Ishii, 2005: Contribution of thermal expansion to present-day sea level change revisited. *Global and Planetary Change*, Vol. 47, Issue 1, 1-16.
- 前田修平, 佐藤均, 小林ちあき, 2005: 2003年夏の北半球ダブルジェット. *天気*, 52, 586-590.
- Miura, H., and M. Kimoto, 2005: A Comparison of Grid Quality of Optimized Spherical Hexagonal-Pentagonal Geodesic Grids. *Mon. Wea. Rev.*, 133, No. 10, 2817-2833.
- 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.
- Sumi, A., M. Kimoto, and X.-S. Shen, 2005: Simulation studies of the Asian monsoon using the CCSR/NIES AGCM In East Asian Monsoon (Ed. C.-P. Chang), World Scientific, 332-353.
- Watanabe, M., and F.-F. Jin, 2003: A moist linear baroclinic model: Coupled dynamical-convective response to El Nino. *J. Climate*, 16, 1121-1139.
- 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.

【査読付き論文（審査中）】

Imada, Y., and M. Kimoto, 2006: Improvement of thermocline structure that affect ENSO performance in a coupled GCM. SOLA, submitted.

Kobayashi C., and S. Maeda, 2006: Phase shift of the seasonal cycle in the Hadley Circulation in recent decades. *Geophys. Res. Lett.*, submitted.

Miura, H., M. Sekiguchi, and M. Kimoto, 2006: Mechanisms responsible for systematic biases in a simulated radiative-convective equilibrium state with insufficient horizontal resolution. *J. Atmos. Sci.*, sub judice.

【査読なし論文・報文・著書等】

石井正好, 坂元賢治, 木本昌秀, 2003: 気候の監視と予測のための全球海洋データ同化. *グロースベッター*, 41, 15-21.

木本昌秀, 2002: 「北極振動」の力学、励起メカニズムについて. *グロースベッター*, 40, 28-36.

木本昌秀, 2002: 今年の夏はエルニーニョが怖い? *電気協会報*, no. 932, 25-27.

木本昌秀, 2003: 地球環境の数値モデルと衛星観測. 「宇宙から見る地球の姿」(住 明正編), 156-164.

木本昌秀, 2003: 中緯度および熱帯における再帰的な変動モードとその予測可能性. *グロースベッター*, 41, 89-94.

木本昌秀, 2004: コンピュータで地球の将来がわかるのか?—気候モデルとそれをういた研究について—. *河川文化：河川文化を語る会講演集（その16）*, (社)日本河川協会, 51-118.

木本昌秀, 2005: 異常気象の謎を追って—2004年度学会賞受賞記念講演—, *日本気象学会誌「天気」*, vol. 52, no. 6, 439-448.

木本昌秀, 渡部雅浩, 2004: 北極振動の中立モード理論. *気象研究ノート第206号* (「北極振動」山崎孝治編), 11-22.

木本昌秀, 2005: 2004年異常気象と地球温暖化, *Safety Eye* (損保ジャパン広報誌), 2005年

2月号, 2-9.

木本昌秀, 異常気象への挑戦, 岩波書店「科学」, vol.75, no. 10, 1138-1140.

木本昌秀, 宮坂隆之, 荒井美紀, 2005: 欧州熱波と日本の冷夏2003. *気象研究ノート* 210号「2003年日本の冷夏」, 155-160.

前田修平, 伊藤明, 松下泰広, 2003: 気象庁における力学的季節予報実験. *グロースベッター* 第41巻, 1-14.

前田修平, 2006: 2005年12月の異常低温と大気大循環. *科学*, 76, 233-236.

前田修平, 佐藤均, 伊藤明, 2006: 2003/04年夏のオホーツク海高気圧の1か月予報. *月刊海洋*, 号外44, 24-31.

高藪 縁, 2003: モンスーンの季節内振動. *気象研究ノート* 第204号「モンスーン研究の最前線」 p41-67.

高藪縁, 2004: クローズアップ「エルニーニョを吹き飛ばした赤道上の積雲群」, *パリテイ*, vol. 19, No. 3, 丸善, p55-61.

渡部雅浩, 木本昌秀, 2004: NAOの力学と長周期変動. *気象研究ノート* 第206号 (「北極振動」山崎孝治編), 23-48.

渡部雅浩, 2006: 2005～2006年の寒冬のメカニズム 大雪はなぜ起こったか? 特集「気象を知って危害を回避」. *月刊養殖* 2006年6月号.

安富奈津子, 木本昌秀, 2004: 夏季アジアモンスーン域の主要変動モード. *グロースベッター*, 42, 19-31.

【学会発表】(略: 275件)

【取材、一般向け講演等】(2005-2006年分のみ)

荒井(野中)美紀, 2006 *チャンネルYou* 知りたいたい 「長い梅雨まだなお一週間」, *毎日新聞* 2006年7月24日夕刊. (取材)

荒井(野中)美紀, *科学・いま&未来* 「100年後の日本? 温暖化影響じわり 長引く梅雨」, *毎日新聞* 2007年7月26日朝刊. (取材)

木本昌秀, 2005: 異常気象と地球温暖化, 岩田伊津樹著, *読売新聞調査研究本部「調研クォーター」*, 2005年春号 (No.15), 194-207.

木本昌秀, 2005: 異常気象 これだけ地球が壊れたワケ. *週刊文春*, 2005年5月19日号,

- 48-51.
- 木本昌秀, 2005: 将来の天候について. テレビ朝日スーパーモーニング, 2005年5月26日 OA.
- 木本昌秀, 2005: 水資源学シンポジウム「国連水の日—気候変動がもたらす水問題」気候変動がもたらす水問題について熱心な議論を展開. 月刊「ポータル」2005年5月号, 32-35.
- 木本昌秀, 2005: 台風など研究状況取材 (GCM 検討会取材). 韓国 KBS TV
- 木本昌秀, 2005: 水をめぐる知、地をめぐる水. JST News, vol.2, no.4, 4-7.
- 木本昌秀, 2005: 「大型台風」増えるか. 東京新聞 2005年9月8日朝刊. (取材)
- 木本昌秀, 2005: 集中豪雨増加の背景. TBS テレビ, みのもんたの朝ズバッ! 2005年7月12日 OA.
- 木本昌秀, 2005: トヨタ ECO スペシャル「生命の海に迫る危機! 追跡! マグロ大回遊!!」中京テレビ 2005年7月18日 OA.(資料提供)
- 木本昌秀, 2005: 異常気象への挑戦, 岩波書店「科学」, vol. 75, no. 10, 1138-1140, 2005年10月号
- 木本昌秀, 2005: 地球温暖化と台風. テレビ朝日スーパー J チャンネル 2005年10月2日放送.
- 木本昌秀, 2005: 地球温暖化と異常気象. テレビ朝日スーパー J チャンネル 2005年12月29日放送.
- 木本昌秀, 2006: 地球温暖化はコンピュータで予測できるのか?, 日経エコロジー, 2006年2月号 (1月8日発売)
- 木本昌秀, 2006: 今さら聞けない 寒波. 朝日新聞日曜版 Be, 2006年1月22日. (取材)
- 木本昌秀, 2006: 記録的な寒波と大雪の原因について. フジ TV 報道 2001, 2006年1月15日出演.
- 木本昌秀, 2006: 地球温暖化はコンピュータで予測できるのか?, 日経エコロジー, 2006年2月号 (1月8日発売)
- 木本昌秀, 2006: 温暖化はコンピュータで予測できるのか? 日経エコロジー 2006年2月号.
- 木本昌秀, 2006: 加速する地球温暖化 京都議定書をまもっても止められない —「気候モデル」を使った「地球温暖化予測実験」結果, ビッグイシュー日本版, 53号, 18-19ページ, 2006. 7. 1&15 合併号.
- 木本昌秀, 2006: 気候変動と降雨～豪雨に備える, NHK ラジオ第一「ニュースアップ」, 2006年7月10日 OA.
- 木本昌秀, 2006: ここまで来た「異常気象」台湾ガニ・クマゼミが列島北上中, 週刊文春, 143-145 ページ, 2006年7月13日号.
- 木本昌秀, 2006: 豪雨について, 読売新聞, 2006/7/25. (取材)
- 木本昌秀, 2006: 異常気象について, NHK 総合 TV ニュースウォッチ 9, 2006年7月26日 OA.
- 木本昌秀, 2006: 豪雨について. 読売新聞, 2006年7月25日. (取材)
- 木本昌秀, 2006: 異常気象と地球温暖化について. テレビ朝日スーパーモーニング, 2006年8月10日 OA. (取材)
- 木本昌秀, 2006: 異常気象と地球温暖化について. テレビ朝日スマステーション 5, 2006年9月1日 OA. (取材)
- 木本昌秀, 2005: 気候予測・気象予測への挑戦, 第1回気象大学校柏コンファレンス「気候予測の新たな展開」(基調講演), 気象大学校, 2005年3月24日.
- 木本昌秀, 2005: コンピュータによる地球温暖化の将来予測, 平成17年度神奈川県環境・公害研究合同発表会特別講演, 横浜市教育文化センターホール, 2005年6月2日
- 木本昌秀, 2005: 地球シミュレータによる地球温暖化予測, 東京大学大学院理学系研究科・理学部第8回公開講演会「意外と身近な理学研究」, 東京大学安田講堂, 2005年11月11日.
- 木本昌秀, 2005: 地球温暖化と異常気象, NTTグループ環境担当者勉強会, NTT 武蔵野研究開発センター, 2005年12月1日.
- 木本昌秀, 2005: 気象予測の新たな展開, 第14回伊藤忠シンポジウム, 伊藤忠商事本社, 東京, 2005年12月19日
- 木本昌秀, 2006: 異常気象, 地球温暖化の科学, 朝日カルチャーセンター・大阪, 2006年3月25日
- 木本昌秀, 2006: 地球温暖化と異常気象. (基調講演), ISO 友の会第8回総会, 2006年4月12日, 経団連会館

木本昌秀, 2006: 地球温暖化と異常気象, 環境講演会, 富士通株式会社川崎工場岡田記念ホール, 2006年6月28日

木本昌秀, 2006: 地球温暖化と異常気象, 東京都高度建設技術研修, 東京都職員研修所, 2006年7月28日

木本昌秀, 2006: 地球規模の異常気象と地球温暖化, 地球温暖化・ヒートアイランド対策講演会, 高輪区民センターホール, 2006年8月8日

渡部雅浩, 2005: 想定外!? 大寒波. 毎日新聞 2005年12月19日. (取材)

渡部雅浩, 2006: 大寒波メカニズム再現. 東京新

聞 2006年1月20日. (取材)

渡部雅浩, 2006: インドシナ半島の対流活発化⇒日本に大寒波. 北海道新聞 2006年1月26日. (取材)

渡部雅浩, 2006: 日本の寒波招き入れ ラニーニャ現象が遠因. 日経新聞 2006年1月30日. (取材)

渡部雅浩, 2006: のりゆきのトーク DE 北海道「雀の大量死は寒波が原因!?!」. 北海道文化放送 2006年4月13日放送. (取材)

渡部雅浩, 2006: ここが変だぞ地球. 大阪朝日放送 2006年5月3日放送. (取材)