

研究集会「季節予測システムの進展と 異常気象の要因分析」の報告

小林 ちあき^{*1}・上田 学^{*2}・竹村 和人^{*3}
若松 俊哉^{*4}・小守 信正^{*5}・時長 宏樹^{*6}
野口 峻佑^{*7}・榎本 剛^{*8}

標記研究集会は、2018年11月21日～22日に京都大学宇治キャンパスで開催された。通称「異常気象研究会」の第14回目で、第5回観測システム・予測可能性研究連絡会との共催である。2018年度は表題のとおり「季節予測システムの進展と異常気象の要因分析」をテーマとして、「対流・熱帯低気圧」、「異常気象と気候変化」、「季節予測・解析」、「年々変動」、「成層圏」で構成した。例年「異常気象」は初日に、「気候変化」は2日目に置くことが多いが、「平成30年7月豪雨」や猛暑、台風などの災害をもたらした事例について、事例解析と温暖化の影響評価を議論するため、同じ「異常気象と気候変化」のセッションで発表していた。

小林ちあき（気象研）を代表者として、女性・若手の研究者・学生の参加促進を掲げて京都大学防災研究所一般研究集会に応募したが、残念ながら不採択となった。旅費の補助ができなかったにも関わらず、前

年度並みの27件の発表があり、40名超の参加者を得て、盛会となった。以下、7名の座長からセッションの概要について報告する。（小林ちあき・榎本 剛）

1. 対流・熱帯低気圧

本セッションでは以下の4件の発表が行われた。

小寺邦彦（気象研）は、近年の熱帯循環の変化に及ぼす非常に深い陸上の対流活動の役割について調べた。熱帯域の対流活動の経年変化の調査や水平風の収束発散と鉛直流に対して行ったSVD解析から、近年、アフリカ・ユーラシア大陸域で対流活動強化が見られることを示した。また、GPCPの雨量データを用いてアフリカのサヘル域の雨量は長期的に見て増加していることを示し、サヘル域において雲頂高度の高いメソスケールの対流が増加しているという Taylor *et al.* (2017) の研究を紹介した。さらに、この陸上での深い対流活動の影響は ENSO に起因する対流活動と比べ、より高高度まで及ぶことを示唆した。

吉岡大秋（京大理）は、WRF を用いて、低緯度で発生した2016年ハリケーン Pali を対象にコリオリパラメータのみを変更する感度実験を行った結果を発表した。実験間でハリケーンの進路に大きな差異はなく、コントロール実験から緯度+3～+6度相当のコリオリパラメータを与えた実験でハリケーンがより発達し、それらの実験や+10度の実験では傾度風よりも強く下層接線風の吹く領域が明瞭に見えることを示した。また、各実験でのCAPE消費量積算を比較したところ、+3～+6度実験で特に多くなっており、効

^{*1} Chiaki KOBAYASHI, 気象庁気象研究所

^{*2} Manabu UEDA, 気象庁数値予報課

^{*3} Kazuto TAKEMURA, 気象庁気候情報課

^{*4} Shunya WAKAMATSU, 気象庁気候情報課

^{*5} Nobumasa KOMORI, 海洋研究開発機構

^{*6} Hiroki TOKINAGA, 京都大学白眉センター／京都大学防災研究所（現所属：九州大学応用力学研究所）

^{*7} Shunsuke NOGUCHI, 気象庁気象研究所

^{*8} (連絡責任著者) Takeshi ENOMOTO, 京都大学防災研究所, enomoto.takeshi.3n@kyoto-u.ac.jp

率的にハリケーンが発達していたことを示した。

藤原圭太（九州大）は、CReSSを用いて、秋台風である2010年台風第14号のシミュレーションを行い、台風発達における黒潮の遠隔影響を調べた。まず、移動性高気圧と台風の間で北東風が卓越し、黒潮からの水蒸気供給を受けた空気塊が境界層を通して台風域で上昇し潜熱を放出する過程を後方流跡線解析により示した。黒潮域の潜熱フラックスを減少させた実験を行ったところ、台風進路に大きな違いは見られなかったが、黒潮から台風へ輸送される水蒸気が相対的に減少したことに加えて、大気境界層内の鉛直安定度も強化されたことで、台風内部での潜熱放出が小さくなり、台風の発達が弱まることを示した。

上田 学（気象庁数値予報課）は、気象庁がWGNEの活動の一環として1991年から実施しているWGNE熱帯低気圧検証から得られている知見を紹介した。各国気象機関が運用する全球モデルによる熱帯低気圧予測の比較を行い、進路予測誤差が減少傾向であること、多くのモデルにおいて、北西太平洋域では転向後のスローパイアスが存在し、中心気圧が低い熱帯低気圧を浅めに予測する傾向があることを示した。また、ベストトラックよりも中心気圧を低く予測する過発達事例が存在することを示し、熱帯低気圧の発達が過剰な場合、GSMにおいてモデルが異常終了する恐れがあることを述べた。検証から判明している予測特性に対するGSMの開発の方針や現状についても紹介を行い、近年のGSM更新では物理過程の改良により過発達を抑制したことを示した。（上田 学）

2. 異常気象と気候変化 1

このセッションでは4件の講演が行われ、平成30年7月豪雨や同年夏の東・西日本を中心とした記録的な高温に関する大気循環場の特徴やその予測に関する報告が行われた。

竹村和人（気象庁気候情報課）は、平成30年7月豪雨の背景となる循環場の特徴について報告した。西日本付近で大雨のピークとなった7月5～7日平均の循環場より、ユーラシア大陸の対流圏上層では寒帯前線ジェット気流および亜熱帯ジェット気流の大きな蛇行が対流圏下層の循環場と関連し、活発な梅雨前線の停滞に影響したことを示した。また、西日本付近では、東シナ海における活発な積雲対流活動に伴う対流圏中・下層での南西からの気流および太平洋高気圧の縁に沿う対流圏下層での南からの気流が、多量の水蒸気

を含んだ状態で持続的に合流し、その強さは1958年以降では最も強かったことを示した。

若松俊哉（気象庁気候情報課）は、2018年夏の東・西日本を中心とした記録の高温と関連する海況・大気循環場の特徴について報告した。夏（6～8月）平均の循環場より、シルクロードパターンやPJパターンに関連した太平洋高気圧やチベット高気圧が日本付近に張り出し続けたことを、高温の主な要因として挙げた。さらに、気象庁1か月予報モデルを用いた海面水温の感度実験より、太平洋における南北非対称な海面水温偏差の分布が、日本付近を含む北半球中緯度帯における高温と関連した可能性を示唆した。

山田 崇（気象庁気候情報課）は、気象庁全球アンサンブル予報システムによる平成30年7月豪雨の予測可能性、およびその予測に影響を与えた要因に関する分析結果を報告した。同年6月29日以前の初期値において西日本のまとまった降水が予測できなかった要因として、台風第8号の発生・発達や中央シベリア～北日本の準定常ロスビー波束の伝播が予測できなかったことを挙げた。さらに、特定の領域を解析値に近づけた同予報システムによる緩和実験を通して、亜熱帯ジェット気流に沿った波束伝播や朝鮮半島付近のトラフの予測もまた、西日本の降水予測に影響した可能性を示唆した。

榎本 剛（京大防災研）は、平成30年7月豪雨をもたらした西日本付近の活発な梅雨前線の再現性に対する、台風第7号の進路予測による影響に関する解析結果を報告した。ECMWFのモデルを用いた予報実験より、同年7月5～7日の梅雨前線の位置の再現性は、6月30日12UTC以降の初期値による予測において高くなることを示した。また、前線の再現性の向上には、台風が日本海を北東進する予測と大きく関連し、台風の進路予測には台風の渦の強さと高さが関係する可能性を示唆した。さらに、前線形成関数に基づく梅雨前線の収支解析より、本事例における前線の形成への寄与は、風のシアによる効果は小さく、風の合流項による効果が最も重要である可能性を示した。

2018年夏は、7月上旬を中心とした大雨や夏全体の記録的な高温等、顕著な現象が相次いで発生し、本セッションではその要因に関する最新の解析結果が報告され、活発な議論が行われた。本セッションでの議論が、異常気象の要因分析のさらなる高度化に繋がることを期待したい。（竹村和人）

3. 異常気象と気候変化 2

本セッションにおいては、前セッションに続けて平成30年7月豪雨や夏の高温を取り扱いながら、それに限らない様々な異常気象等について範囲を広げて取り上げた。ここでは合計3件の講演が行われた。

松信 匠（筑波大）は、アンサンブル予報による平成30年7月豪雨の予測可能性について、太平洋高気圧の張り出し及び梅雨前線の角度等の再現性に着目しながら、モデルごとの気候値の確率密度関数を用いる確率的予報の手法を用いることによって解析した。初期値とモデルの寄与を調べるために、NCEPのアンサンブル初期値NCEP-GEFSからECMWF-OpenIFSモデルで予報する初期値交換実験を行ったところ、降水分布がECMWFの予報に近くなったことから、予測可能性には初期値よりもモデルの影響の方が大きいことの可能性を示した。

山崎 哲（海洋研究開発機構）は、新潟での里雪・山雪と、偏西風のジェット気流の変動及びブロッキングとの興味深い関係について取り上げた。新潟では、北部の里域で主に降る里雪と南部の山域で降る山雪、その両方で降る里山雪の3種類の降雪パターンが知られており、先行研究もなされているところ、里雪・山雪・里山雪型それぞれを引き起こす際の大気循環場を合成してみると、地上気圧では里山雪型は西高東低の気圧配置となる一方で、里雪型は西高、山雪型は東低という違いがはっきりと表れたことを示した。さらに亜熱帯ジェット気流または寒帯前線ジェット気流に沿ったロスビー波シグナルやブロッキング発生頻度に着目して解析を進めると、3種類の降雪パターンそれぞれに特徴が見られたことを示した。

水田 亮（気象研）は、大規模アンサンブル気候実験であるd4PDFを用いて、極端降水の将来変化について解析した内容を報告した。ここでは、頻度の小さい強い降水ほど将来はより増加することに着目し、その増加はClausius-Clapeyronの式が示す大気中の飽和水蒸気量の増加率6～7%/°C及びその空間パターンと必ずしも一致していないことを疑問の出発点として、各グリッドで極端降水の起きる日での気温・鉛直速度をコンポジットして熱力学的寄与及び力学的寄与を見積もったところ、鉛直速度変化に伴う力学的寄与が地理分布や頻度・時間スケール間の増加率の差異に寄与していることを示した。

本セッションでは、新潟の里山雪という興味深い現象を取り扱った研究や、確率的予報や大規模アンサン

ブル気候実験といった近年登場してきた手法を駆使した解析といった、注目に値する話題が多く、発表後の質疑応答では大いに議論が盛り上がった。ここでの議論が、異常気象及び気候変化に関する研究の発展につながることを期待したい。（若松俊哉）

4. 季節予測・解析 1

このセッションでは4件の講演が行われ、気象庁や気象研究所で行われている季節予測のための研究や技術開発の現状と展望についての報告があった。

前田修平（気象庁気候情報課）は、季節予報現業予報システムの現状と今後の展望を示した。3か月予報やさらに長い予報に用いる予報システムは、モデルのバージョンアップごとに予測精度が向上しているが、生産計画策定などに活用するには不十分な段階であり、さらなる予測精度向上が必要となっている。大気の内変動動的要素が強いので予測可能性が低いと長年考えられてきた北極振動/北大西洋振動の予測精度が飛躍的に向上したという、英国気象局の季節予報モデルによる最近のブレイクスルーを例示しつつ、アルゴ計画により近年増加している海洋表層観測データの利用技術の高度化、大気に比べロスビー変形半径が一桁小さい海洋の中規模渦を解像するための海洋モデルの高解像化などの季節予報モデルの改善によって、季節予測の精度向上が期待できることが報告された。長年、季節予報に携わった講演者が「季節予報の未来は明るい」とはっきり述べたことが印象的であった。

高谷祐平（気象研）は、大気海洋結合モデルによる夏季アジアモンスーンの季節予測の進展について報告した。アジアモンスーン域の季節予測は大気海洋結合モデルを導入したことで、その再現性や予測精度が大幅に改善されてきている。さらに、夏季アジアモンスーン変動の要因として、インド洋キャパシタ（コンデンサー）効果などによるENSOの遅れた影響や北西太平洋の大気海洋相互作用の影響などの変動形成メカニズムの理解が進んでおり、潜在的予測可能性を持つアジアモンスーン変動は、モデルの改善によりさらに予測精度向上の可能性を示した。

大気海洋結合モデルによる季節予測を行う際、海洋部分の初期値の作成には、全球海洋データ同化システムが利用されている。藤井陽介（気象研）は、気象庁現業システムへの導入を目指して開発中の4次元変分法を用いた海洋データ同化システム（MOVE-G3）の特徴と解析精度について報告した。赤道不安定波に伴

う SST 変動や台風に対する SST 応答に関して改善がみられることが示され、さらに同化システム中の予報モデルを大気海洋結合モデルに変えることによる簡易的な結合同化手法についての検討も行われていることが示された。

小林ちあき（気象研）は、気象研究所で開発中の大気海洋結合同化システムによる短期間の再解析実験を SST-降水量関係を使って評価した結果を報告した。結合同化システムを用いて作成された初期場は、大気海洋結合モデルによる予報初期の“イニシャルショック”の軽減とともに、SST-降水量間の負のフィードバックの表現の改善が期待される。結合同化システムによる再解析実験の結果は SST-降水量関係の表現の改善を示したが、再解析の降水量の表現は同化した大気観測データの影響を強く受けて決まっており、結合同化の効果は降水量の表現より SST の表現に現れていることが示された。

気候システムには、季節予報の予測精度向上に寄与するとみられる予測可能性のソースが多く存在しており、現在の現業季節予測システムではその可能性を十分に生かし切れていない。大気海洋結合モデルの改良や、初期値作成方法の改善を通して、季節予測精度の改善への努力が引き続き行われる予定であり、今後のさらなる展開に期待したい。（小林ちあき）

5. 季節予測・解析 2

本セッションでは、以下の 3 件の講演が行われた。

土井威志（海洋研究開発機構）は、SINTEX-F1 から F2、F2-3DVAR へと至る季節予測システムの開発・改良の過程を振り返った後、SINTEX-F2-3DVAR を基にアンサンブルメンバー数を 12 から 108 へ増強することにより、これまでは困難であったエルニーニョ・南方振動（ENSO）やインド洋ダイポール（IOD）の極端なイベントを捉え得ることを示した。一方、ENSO 予測においてアンサンブルスプレッドが RMS 誤差よりも過小となる問題に対しては、メンバー数の増強では解決しなかったものの、西風バーストや東風サージを模した風応力を確率的に与えることにより改善する可能性を示唆した。

小守信正（海洋研究開発機構）は、大気海洋結合モデル CFES を用いて、SINTEX-F2 と同様に海面水温だけを観測値へ強く緩和して初期値化を行う実験的季節予測システムを構築し、SINTEX-F2/F2-3DVAR との部署内マルチモデルアンサンブルにより、

予測スキルがやや向上することを確認した。今後は、海水の初期値化が予測に与える影響の評価などが、課題となる。

佐藤令於奈（福岡大）は、冬季中緯度域における雲量の季節内変動に関する解析結果を報告した。衛星観測データと再解析データから、等価順圧な鉛直構造を持つロスビー波に伴う雲量極大は、極東域を除き、上層ではリッジのすぐ西側に、中層ではトラフの中心付近に位置し、かつ後者は降水との対応が良いことを明らかにした。一方、極東域では、東経 130° 付近に腹を持つ定在波がトラフからリッジに反転するタイミングで上層雲量が卓越することを示した。（小守信正）

6. 年々変動

本セッションでは、経年から 10 年程度の時間規模における大気海洋変動に関する計 4 件の研究が報告された。

神山 翼（東大理）は、黒潮続流域とメキシコ湾流域で観測される海面水温の同期現象について講演を行った。Boundary Current Synchronization (BCS) と名付けた西岸境界流の同期現象が黒潮続流域とメキシコ湾流域で実際に見られることを観測データから示し、BCS は大気における北半球環状モードの低周波成分と海洋における太平洋十年規模振動の内部変動が共有する変動成分であることを説明した。また BCS は海洋側の環状モードとしても理解できる可能性を示すと同時に、ジェットの内偏を通して日本の異常気象と密接に関係することを示唆した。

時長宏樹（京大白眉センター／京大防災研）は、エルニーニョ／南方振動（ENSO）の持続性が大西洋ニーニョ現象の発生に及ぼす影響について発表した。ENSO と大西洋ニーニョ現象はそれぞれ冬季と夏季に最も卓越する大気海洋結合モードとして知られており、従来、それらは互いに独立なモードであると考えられてきた。それに対し、複数年連続で発生する ENSO イベントのみに注目すると、東部太平洋上に中心を持つウォーカー循環の偏差が春季に熱帯大西洋の大気下層に西風偏差をもたらし、それがピヤークネスフィードバックを介して夏季の大西洋ニーニョ現象を励起させることを示した。

塩崎公大（京大理）は、エルニーニョ現象時に観測される極東域の暖冬・寒冬事例について、NCEP/NCAR 大気再解析データセットを用いた合成図解析の結果について発表した。暖冬事例では、エルニー

ニョ現象と正のインド洋ダイポール現象の卓越とともに、西部太平洋で負の海面水温偏差が発達し、大気では日本付近に双極子状の WP テレコネクションパターンが発達しやすいことを示した。また、寒冬事例ではインド洋ダイポール現象と西部太平洋の海面水温偏差の発達は見られず、エルニーニョ現象に励起される PNA テレコネクションパターンが出現する傾向があることを示した。

直井萌香（筑波大）は、ENSO の季節進行に伴う夏季北太平洋 Atmospheric River (AR) の変調について講演を行った。d4PDF を用いた合成図解析により、冬季から夏季にかけての ENSO の発達・遷移が AR の経年変動に重要であることを示した。前年の冬季から ENSO が発達した場合にはインド洋キャパシタ効果を介して AR の頻度が増減するのに対し、夏季に ENSO が出現している場合には北太平洋高気圧の変化を介して AR が南北シフトすることを示した。

本セッションでは、近年注目されている ENSO の多様性に着目した遠隔影響に関する研究、中高緯度独自の大気海洋変動の存在とそれが気候に重要な役割を果たす可能性について活発な議論が行われた。これらは気候の季節予測にも重要と考えられる大気海洋変動であり、気候研究の新展開を予感させるセッションであった。今後の更なる研究成果に期待したい。

(時長宏樹)

7. 成層圏

本セッションでは、近年の季節予測においてその無視できない影響が認識されてきている成層圏の変動に関して、以下の 5 件の発表が行われた。

名本彩乃（九大理）は、海水・海面水温が冬季成層圏循環に及ぼす影響について、AFES による長期積分結果を解析することにより調べた。基準実験に加えて、近年の海水減少を反映した境界値を与えた実験と、近年の海水減少と海面水温変動の両者を反映した実験を行い、それらの結果を比較した。これにより、海水減少単体では冬季における惑星規模波の上方伝播量の増加および成層圏周極渦の弱体化が引き起こされるが、近年の海面水温変動は惑星規模波の上方伝播量を減少させて海水減少の影響を少し弱めることが示された。

野口峻佑（気象研）は、気象庁長期再解析 JRA-55 とその従来型観測限定同化版である JRA-55C からのアンサンブル再予報実験を行うことで、衛星データの同化が成層圏突然昇温 (SSW) の再現性に及ぼす影

響を調べた。衛星データの同化がない場合には、SSW の生起をほぼ確実に再現可能な 5 日前からの予報においてその捕捉率が 20% 程低下してしまう他、成層圏から対流圏への下方影響の有無を反映して SSW 後 1~2 カ月程続く地表にまで及ぶ差異が生じる場合もあることが示された。

原田やよい（気象研）は、2018 年 2 月に生じた大規模 SSW の特徴についての解析結果を示した。今回のような顕著な波数 2 型 SSW の生起は前回の 2009 年から実に 9 年ぶりであり、過去の波数 2 型 SSW との比較も行われた。特に、Kinoshita and Sato (2013) による新しい 3 次元波活動度フラックスを用いた解析により、この SSW 時に特徴的であった東風領域での波の上方伝播が描写され、成層圏内での小規模擾乱の重要性も示唆された。

松山裕矢（九大理）は、成層圏における惑星規模波の反射についての統計解析結果を示した。下部成層圏における波活動度フラックスの鉛直成分に着目し、卓越波数や下方伝播領域により条件分けして合成解析を行うことで、顕著な反射が起きる際の 3 次元循環場構造について議論した。対流圏への下方伝播領域は従来から指摘されていた西半球だけでなく東西に広く分布する他、成層圏における高気圧性循環の強化および波の伝播不可能領域の出現と下方伝播がよく対応しているが他の要因の考慮も重要であることが示された。

山下陽介（海洋研究開発機構）は、冬季から初夏における南半球大気赤道域準 2 年振動 (QBO) に対する応答についての解析結果を示した。経験的直交関数解析により得た中部成層圏および下部成層圏の QBO 指標を用いた回帰分析によって、南半球成層圏の極渦強度偏差中心のシフトダウンが QBO により変調される過程が説明された。中部成層圏指標と関係した子午面循環は中高緯度での波の伝播過程に影響を与えて晩冬から春季のシフトダウンのタイミングを変えるが、晩冬に下部成層圏指標と関係した寄与も存在することが示された。

(野口峻佑)

略語一覧

3D-VAR: 3-dimensional Variational Data Assimilation 3次元変分法データ同化

AFES: AGCM for Earth Simulator 地球シミュレータ用大気大循環モデル

AGCM: Atmospheric General Circulation Model: 大気大循環モデル

- AR : Atmospheric River 大気の流れ、細長く水蒸気が集中した帯
- BCS : Boundary Current Synchronization 西岸境界流の同期現象
- CAPE : Convective Available Potential Energy 対流有効位置エネルギー
- CFES : Coupled Atmosphere–Ocean GCM for the Earth Simulator 地球シミュレータ用大気海洋結合モデル
- CReSS : Cloud Resolving Storm Simulator 雲解像非静力学モデル
- d4PDF : database for Policy Decision making for Future climate change 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース
- ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 欧州中期予報センター
- ENSO : El Niño Southern Oscillation エルニーニョ・南方振動
- GEFS : NCEP Global Ensemble Forecast System 米国国立環境予報センター (NCEP) で開発されている全球アンサンブル予報システム
- GFS : NCEP Global Forecast System 米国国立環境予報センター (NCEP) で開発されている全球大気大循環モデル
- GPCP : Global Precipitation Climatology Project 全球降水気候計画
- GSM : Global Spectral Model 気象庁の全球モデル
- IOD : Indian Ocean Dipole インド洋ダイポール
- JRA-55 : Japanese 55-year Re-Analysis 気象庁55年再解析
- MOVE-G3 : Multivariate Ocean Variational Estimation–Global version 3 全球版海洋データ同化システム
- NCEP : National Centers for Environmental Prediction 米国国立環境予測センター
- OpenIFS : ECMWF が運用している統合的 global 予報システム IFS (Integrated Forecasting System) のコミュニティ版
- PJ : Pacific–Japan テレコネクションパターンの名称
- PNA : Pacific/North America テレコネクションパターンの名称
- QBO : Quasi-Biennial Oscillation 成層圏準2年周期変動
- SINTEX-F : Scale Interaction Experiment–Frontier 日欧協力の下で開発した海洋研究開発機構の大気海洋結合モデル
- SST : Sea Surface Temperature 海面水温
- SSW : Sudden Stratospheric Warming 成層圏突然昇温
- SVD : Singular Value Decomposition 特異値分解
- WGNE : Working Group on Numerical Experimentation (世界気象機関の) 数値実験作業部会
- WP : Western Pacific テレコネクションパターンの名称
- WRF : Weather Research and Forecasting NCAR, NCEP などで開発されている領域気象モデル

参 考 文 献

- Kinoshita, T. and K. Sato, 2013: A formulation of unified three-dimensional wave activity flux of inertia-gravity waves and Rossby waves. *J. Atmos. Sci.*, **70**, 1603–1615, doi: 10.1175/JAS-D-12-0138.1.
- Taylor, C. M., D. Belušić, F. Guichard, D. J. Parker, T. Vischel, O. Bock, P. P. Harris, S. Janicot, C. Klein and G. Panthou, 2017: Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, **544**, 475–478, doi:10.1038/nature22069.