

「様々な結合過程がもたらす異常気象の実態と そのメカニズム」に関する研究集会の報告

廣岡俊彦*1・伊藤耕介*2・小守信正*3
山口春季*4・江口菜穂*5・野口峻佑*6
竹村和人*7・釜江陽一*8・榎本剛*9

標記研究集会は、2017年11月20日～21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13回目で、第4回観測システム・予測可能性研究連絡会との共催である。「台風」、「季節予測」、「予測・解析システム」、「成層圏1」、「成層圏2」、「年々変動」、「中高緯度」の7つのセッションにおいて行われた28件の講演を40名を超える参加者が聴講し、幅広い観点から活発な討論が行われた。以下、各セッションの座長が概要を報告する。なお、講演要旨は<https://u.kyoto-u.jp/5fvng>に掲載されているので、参照いただきたい。(廣岡俊彦・榎本剛)

1. セッション1「熱帯低気圧」

熱帯低気圧のセッションでは5件の発表があった。伊藤耕介(琉球大理)は、気象庁による台風強度の発表予報誤差が2000年代中盤以降増加傾向にあることを紹介し、気候変動に伴い海洋貯熱量が増加していることが理由の一つとして考えられるとした。

吉岡大秋(京大理)は、低緯度で発生した台風の数値実験結果について紹介した。ダウンスケールを実施したことにより、低解像度の初期値を用いた場合には起きなかった再発達ライクな現象が再現されることが分かった。

中野満寿男(海洋研究開発機構)は、北緯25度以北で発生する台風に関する研究について紹介した。このような台風は8月に最も多く発生し、北西太平洋モンスーンインデックスが小さいときに多いことを示した。

藤原圭太(九大理)は、移動性高気圧の東進による黒潮海域での潜熱フラックスおよび東向き水蒸気フラックスの強化が台風Tokage(2004)を強めた可能性があることを感度実験や流跡線追跡によって示した。

吉田康平(気象研気候)は大規模アンサンブルシミュレーションd4PDFに基づき熱帯低気圧の将来変化傾向について調べた。その結果、台風の総数および猛烈な台風の発生数は世界的には減少するものの、日本の南からハワイ付近、メキシコの西にかけてなどでは猛烈な台風の数が増え、これが海面水温の上昇や鉛直シアの弱まりで説明されることを示唆した。

(伊藤耕介)

2. セッション2「季節予測」

本セッションでは、以下の4件の講演が行われた。千葉丈太郎(東大大気海洋研)は、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(d4PDF)の全球大気モデルによる過去実験(100メンバー)を利用し、内部変動が卓越する冬季の日本付近

*1 Toshihiko HIROOKA, 九州大学大学院理学研究院。

*2 Kosuke ITO, 琉球大学理学部。

*3 Nobumasa KOMORI, 海洋研究開発機構。

*4 Haruki YAMAGUCHI, 気象庁数値予報課。

*5 Nawo EGUCHI, 九州大学応用力学研究所。

*6 Shunsuke NOGUCHI, 気象庁気象研究所。

*7 Kazuto TAKEMURA, 気象庁気候情報課。

*8 Youichi KAMAE, 筑波大学生命環境系。

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

における季節予測可能性を調査した。冬季平均の500 hPa 高度の年々変動には、東シベリア付近において、JRA-55再解析データと d4PDF に有意な相関があり、これにはベーリング海から西進するブロッキング高気圧の寄与が示唆された。さらに、ブロッキング高気圧の発生頻度・持続性・強度には、北東太平洋での基本場の応答を通じて、熱帯太平洋の海面水温 (SST) 変動という外部強制が寄与していることが定量的に示された。

市川悠衣子 (北大理) は、初期値に依存する誤差の上限を解析とアンサンブル平均予報の共分散に関連付けることにより、完全モデルを仮定せずに潜在的予測可能性を推定する新たな手法を提案した。S2S プロジェクトに参画する欧州中期天気予報センター・気象庁・米国国立環境予測センターの過去予測と再解析にこの手法を適用してマッデン・ジュリアン振動 (MJO) の予測限界を推定し、MJO の対流活動が比較的活発な時期に予測可能期間が長くなることを示した。また、マルチモデル解析が容易である利点を活かし、予測開始時に MJO の対流中心がインドネシアにある場合に予測可能期間が最も長くなることを明らかにした。

小守信正 (海洋研究開発機構) は、将来的なマルチモデル化を視野に入れ、準現業的に運用されている季節予測システム SINTEX-F1/F2 と同様に SST だけを観測値へ強く緩和して初期値化を行うシステムを、大気海洋結合モデル CFES を用いて構築し、その予備的な結果を報告した。1983年以降、6メンバーでの6ヶ月予測を3ヶ月毎に実施したところ、熱帯太平洋の予測はある程度可能であること、既存の SINTEX-F システムとは異なる特性を持つことが示された。今後は、アンサンブルメンバー数の増強が急務である。

土井威志 (海洋研究開発機構) は、最新の季節予測システム SINTEX-F2-3DVAR (12メンバー) を基に時間ずらし平均法によりアンサンブルメンバー数を108へ増強し、6月上旬からの季節予測を1983年から2015年まで実施した。11月・12月平均の Nino3.4 水温偏差で評価したエルニーニョ・南方振動 (ENSO) の予測スキルは、メンバー数を増強しても有意な改善が見られず、世界の多くの現業システムで採用されている10メンバー程度での ENSO 予測の妥当性が示唆された。一方、発生確率が稀な極端現象に対する確率予測のスキルは中緯度域を中心に改善しており、農業や感染症など、社会応用面での活用が期待される。

(小守信正)

3. セッション3 「予測・解析システム」

本セッションでは以下の3件の発表が行われた。

山口春季 (気象庁数値予報課) は、気象庁の従来の台風・週間・1か月アンサンブル予報システム (EPS) を2017年3月に統合した「全球 EPS」の仕様や予測精度について発表した。全球 EPS では、予報モデルの更新や特異ベクトル法と局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) により得られたそれぞれの摂動を組み合わせた大気初期摂動の採用、海面水温摂動の導入などの改良を行い、従来の台風・週間 EPS と比較して、台風進路予測、降水予測などに改善がみられた。また、1か月 EPS と比較して、熱帯対流活動には大きな予測特性の変化が見られた。北半球中高緯度の予測精度が概ね改善したほか、成層圏突然昇温等の現象に着目した予測特性に変化が見られた。質疑では初期摂動の構成理由について問われ、LETKF による初期摂動のみでは予測のスプレッドが不足する課題があり、特異ベクトル法を併用していると回答した。

山崎 哲 (海洋研究開発機構) は、AFES と LETKF からなるアンサンブルデータ同化システムで作成された ALERA2 と、そのシステムへの EFSO 手法の導入について紹介した。EFSO は、データ同化に使われる個々の観測が6時間先の予報を改善するか改善するかを診断的に定量化する手法で、この導入によって ALERA2 に EFSO 値を新たに出力するようになったことを紹介した。EFSO の導入が、OSE などの観測デザイン研究に実際に役立つかを調べるため、北極・中緯度・熱帯域での各3点のラジオゾンデを取り除いた1冬季分 OSE テストと EFSO 値との比較結果が発表された。中緯度の3点については EFSO 値と OSE テスト結果の時間相関が小さいことがわかり、これは観測システムだけでなく、大気大循環に起因するのではないかと、といった議論が質疑でなされた。

榎本 剛 (京大防災研) は、水平離散化に距離基底関数 (RBF) を用いた浅水波モデルについて発表した。最小エネルギー節点と球面螺旋節点とを比較し、後者の方が生成が非常に容易で、一様性が高いことを示した。さらに RBF 法による浅水波モデルのテストケースの結果から、球面螺旋節点でも最小エネルギー節点と遜色なく、スペクトル (高次) 精度が得られる

ことが報告された。会場からは並列化に適するかを問う質問があり、行列で表される微分演算子をベクトルで表される予報変数に適用する行列ベクトル積は並列化が可能で袖領域は不要だが多量の通信を伴うと回答した。

本セッションでは、モデル開発力学コアの開発や、モデル変更の詳細には触れられなかったが気象庁全球EPS更新の効果が発表された。また、アンサンブルデータ同化では、全球EPSへの導入や、EFSOの実装といった展開がみられた。今後のさらなる進展に期待したい。(山口春季)

4. セッション4「成層圏1」

本セッションでは、以下の4件の研究が報告された。

最近、成層圏が対流圏に与える影響、特に積雲対流に与える影響に関する研究が活発化している。江口菜穂(九大応力研)らは、全球非静力学モデルNICAMデータを用いて、2010年1月の成層圏突然昇温(SSW)発生時にインド洋南西部で発達した積雲対流、および台風に関する解析結果の報告を行った。成層圏南北循環場の強化により、熱帯下部成層圏及び熱帯対流圏界面遷移層内を低温域が下降することで、安定度の弱い領域が時間と共に下降し、それが積雲対流活発域の上空約14 km付近に到達することで、より積雲対流が活発化することを示した。

成層圏の対流圏への影響に関する研究として、小寺邦彦(名大宇宙地球環境研)らは、2016年夏の猛暑について、成層圏の上昇流が積雲対流活動の季節進行、特に北進を促進し、結果的に東アジアモンスーン域の積雲対流活動や南北循環場を変調させていることを報告した。気象庁の1ヶ月予報を調べた結果、この猛暑をもたらした循環場の変化は熱帯成層圏の寒冷化が始まる1週間前までは予測できていなかった。予測が不成功であった原因として、モデルでは成層圏循環に対する熱帯積雲対流の感度が低いか、あるいは成層圏循環の変化の原因となった、南半球対流圏のプロッキング現象の発生の予測の不成功が考えられる。

上記2件以外に、成層圏の対流圏への影響を、数値実験の観点から、河谷芳雄(海洋研究開発機構)らが成層圏2セッションで発表を行ったので、そちらも参考にされたい。

加藤諒一(九大理)らは、2016年に発生した成層圏準2年周期変動(QBO)の異常について、その成因

と微量気体成分の分布に与える影響を報告した。このQBO異常は、1953年の観測以来初めて、その周期(約28ヶ月)が乱れ、東風域が急激に成層圏下層約40 hPaに発生した事象である。本発表では、Newman *et al.* (2016) 等で原因が指摘されている40 hPaにおける南半球からの東風にともなう、各種微量気体成分(オゾン、二酸化窒素、一酸化炭素等)の変動を捉えることができた。また水蒸気に関しては、気温による影響が大きいため、その影響が分布に現れにくい点が指摘されていた。

黒田友二(気象研気候)は、太陽活動の冬季における極域の北大西洋振動(NAO)、および海洋に与える影響について、観測データを用いて統計解析を行った。その結果、上部成層圏での太陽活動による南北温度差を起源とする信号は、極夜ジェット振動(PJO)を通じて対流圏へと下降伝播し、地表面気圧では太陽極大年の2月をピークとした正のNAO型の信号として現れた。さらに、北大西洋域の海面水温(SST)は、NAOに対応して現れやすいとされるアメリカ東岸から東に延びる正偏差域とその南北で負偏差となる南北三極子的信号が太陽極大年から3年遅れて最も顕著となった。さらに海面下500 m程度までの海水温度について年単位で遅延信号応答を調べたところ、SSTの南北三極子の南(北)域では表層に対して3(2)年程度の遅れで下降するが、アメリカ東岸から東に延びる中域では表層から500 m程度まで信号はほぼ遅延無しで伝播していることが分かった。

(江口菜穂)

5. セッション5「成層圏2」

このセッションでは「成層圏1」に引き続き、成層圏に関する以下の4件の講演が行われた。

野口峻佑(気象研気候)は、高エネルギー粒子の降り込みが下層大気循環に与える影響を気象研究所地球システムモデルを用いた感度実験を行うことで調べた。大規模なSSW後に生じる成層圏界面上昇イベントに焦点を当て、成層圏界面上昇により強化される中間圏・下部熱圏領域の残差下降流によって、上部境界条件として与えた窒素酸化物が下方へ効果的に輸送される様子を示した。また、輸送された窒素酸化物が上部成層圏におけるオゾン破壊を引き起こし、それによって生じた成層圏力学場の変化の影響が地表にまで及び、春季に正の北極振動的な偏差として現れることを示した。

向川 均（京大防災研）は、2009年と2010年に生じたSSWの予測可能性を比較した。各SSWに対して開始日を1日毎にとったアンサンブル予報実験を行い、得られたアンサンブル平均予報場に対して、球面順圧渦度方程式を用いた安定性解析を実施した。その結果、予測可能性の低い2009年のSSW発生の直前に、成長率の大きな不安定モードが上部成層圏において出現することを示し、成層圏循環自体に内在する予測障壁が存在することを指摘した。

原田やよい（気象研気候）は、対流圏上層における東西波数2の惑星規模波増幅イベントに関する統計解析の結果について報告した。波数2成分の増幅後に、成層圏への顕著な波の上方伝播が見られた場合と下方伝播が見られた場合についての合成解析を行い、各場合の循環場の特徴を記載した。その結果、前者ではアラスカ付近のブロッキング高気圧の発達および成層圏周極渦の分裂が見られる一方で、後者ではヨーロッパ付近のブロッキング高気圧の発達と成層圏のアリュシャン高気圧の強化が見られることを示した。

河谷芳雄（海洋研究開発機構）は、MIROC-AGCMでモデル上端および鉛直解像度を変化させた実験を行うことにより、気候モデルにおける成層圏の扱いが、対流圏循環および降水帯形成に及ぼす影響について調べた。長期間積分結果の比較から、モデルの上端が低く成層圏に十分に解像されていないと冬極へ向かう残差下降流が欠如するため、成層圏の極夜ジェットが過剰に強化されるが、その影響は、それに伴う対流圏ジェットの極側へのシフトに留まらず、対流圏下層循環場および降水帯の変調としても現れることが示された。また、成層圏の鉛直解像度や中間圏の有無の影響も相応に大きく、赤道域準2年振動の表現や極夜ジェットの構造の変化を通じて、下層にまで及ぶことが指摘された。（野口峻佑）

6. セッション6「年々変動」

このセッションでは4件の講演が行われ、ENSOや沿岸エルニーニョ、PJパターン、およびそれに伴う熱帯の大気循環や北半球のテレコネクションパターンの特徴などについての報告が行われた。

足立典之（気象庁気候情報課）は、2017年1月～3月を中心に南米北西部で発生した大雨に関して、沿岸エルニーニョとの関連に着目した事例解析の結果を報告した。この期間では、ペルー沖での貿易風が平年と比べて弱いことが、周辺海域でのSSTの上昇に寄与

し、SSTが26～27°C以上の領域が対流圏下層における水蒸気収束や対流活動の活発化とよく対応することを示した。さらに、相関解析により、ペルーにおける各年1月～3月の積算降水量が多い年には、太平洋東部での高いSSTや活発な対流活動がみられる傾向があり、2017年の海況や大気循環場と整合することを示した。

塩崎公大（京大理）は、2015/2016年に発生したエルニーニョ現象について事例解析を行い、1982/1983年や1997/1998年の事例と比較した結果を報告した。2015/2016年の事例では、極東域～日本の東海上で高度偏差の四極構造がみられたことと関連して、日本では暖冬傾向であった一方、中国付近では気温は平年並であったことを示した。また、他の2事例と比較して、SSTは東部太平洋赤道域の高温偏差が西側に広がり、かつインド洋～太平洋で全体的に平年より高いこと、赤道域における水深200mまでの水温偏差の振幅が弱く、特にインド洋では著しく弱いこと、ウォーカー循環が西側に偏り、フィリピン付近の対流圏下層における高気圧性循環偏差が弱いことを示し、これらの海況や大気循環の特徴が東アジアにおける冬季の気温に影響した可能性を示唆した。

戸川裕樹（気象庁気候情報課）は、2017年夏の海況や大気循環場の特徴と日本の天候への影響に関する解析結果を報告した。2017年夏のSSTは、太平洋西部の熱帯域で高温偏差、太平洋東部では8月以降は低温偏差となり、夏の平均場でみられる海洋大陸付近での活発な対流活動と関連した可能性を示した。また、8月上・中旬には、熱帯の季節内振動に伴う対流活動の不活発な位相が海洋大陸～フィリピン付近にみられ、負のPJパターンに対応して太平洋高気圧の本州への張り出しが弱まったこと、および東シベリアでのブロッキング高気圧の発達に伴うオホーツク海高気圧の発生が、北・東日本太平洋側の寡照や北日本を中心とした低温に寄与したことを示した。さらに、沖縄・奄美では8月～9月を中心に顕著な高温となり、多照や対流圏下層での暖気移流、周辺海域での高いSSTなどが高温に寄与した可能性を示唆した。

竹村和人（気象庁気候情報課）は、ラニーニャ現象発生時にみられる熱帯の対流活動がシベリア高気圧の強化に影響を及ぼすメカニズムに関して、統計解析や数値モデルを用いた検証結果を報告した。ラニーニャ現象が発生した冬季におけるシベリア高気圧が強まった事例では、東南アジア付近での活発な対流活動、中

国南部～東シベリアの波列パターンとそれに伴うシベリアでのブロッキング高気圧の西進がみられ、関連する合成図解析やラグ相関解析にみられる特徴と整合することを示した。さらに、線形傾圧モデルを用いた実験結果より、東南アジア付近の活発な対流活動が、東シベリアにかけての偏差パターンの波源のひとつである可能性を示唆した。

ENSOは、熱帯の対流活動のみならず、中・高緯度域のテレコネクションパターンの変調を伴い、世界各地の天候に大きく影響を及ぼすため、社会的な関心が非常に高い。本セッションでは、官学双方よりENSOに伴う大気循環場の特徴やその影響に関する研究成果について情報共有が行われ、活発な議論が行われた。本研究会での議論が、今後のさらなる調査研究活動の発展に繋がれば幸いである。(竹村和人)

7. セッション7「中高緯度」

このセッションでは4件の講演が行われ、中緯度の異常気象の発現に関わる温帯低気圧と偏西風波動、およびそれらに対する熱帯・高緯度からの影響に関する研究報告が行われた。

釜江陽一(筑波大生命環境系)は、中緯度を東進する温帯低気圧に伴って発生する大規模な水蒸気の極向き輸送帯の東アジア降水への影響に関して、気候学的特徴とENSOに対応した年々変動について調査した結果を報告した。Atmospheric Riverと呼ばれる水蒸気の輸送帯は、東アジア暖候期の総降水量の1～4割、豪雨発生日の半分程度を説明し、冬季エルニーニョ発達後の初夏から秋にかけて、西日本を中心に豪雨の発生確率が増加することを報告した。

佐藤令於奈(福岡大理)は、冬季日本付近で500hPa高度の下降時に全雲量が増える関係があることから、中緯度の定在ロスビー波に伴うトラフと、雲量の季節内変動との対応関係を調査した結果を報告した。東側に雲量のピークを伴うトラフの東進は、ユーラシア大陸と北米大陸上で明瞭に確認することができる一方、海上では定在ロスビー波の鉛直構造の違いから、特に下層雲量については、東西対応関係が海上とは異なる様子を見出した。

築地原 匠(九大理)は、近年、北海道で増加する傾向にある強風事例が、北海道南岸を通過する爆弾低気圧頻度の増加と対応しており、これが特に北進するタイプの南岸低気圧の増加によるものであることを報告した。北進タイプは東進タイプよりも、温暖コンベ

アーベルトを介した水蒸気フラックスによる潜熱解放が強く、より発達しやすい性質があり、近年のベンガル湾における対流活発化が北西太平洋の循環場偏差を励起し、北海道南岸を通過する爆弾低気圧数を増加させている可能性を指摘した。

菅野湧貴(東北大理)は、等温位面以下に存在する大気によって北極域の寒気を定義し、中緯度への寒気流出の将来予測を、複数の気候モデルによる将来予測実験から検証した結果を紹介した。従来の気温や風による研究と異なり、両方を用いることの重要性を主張し、将来には総寒気質量は減少し、中緯度へ南下する寒気質量フラックスは減少することが、複数モデル・複数シナリオ実験で一貫して確認されることを示した。

日本を含む東アジアの気候変動・変化をより正確に予測する上で、冬季・夏季における中緯度の気候システムが、熱帯や高緯度からの強制に対してどのように応答するのかを検証することは欠かせない。身近な異常気象の発生機構を理解し、予測精度を向上させるためにも、今後も観測データおよび数値モデルの両面からの研究の進展を期待したい。(釜江陽一)

謝辞

一部の参加者の旅費補助や開催経費には、京都大学防災研究所一般研究集会(29K-06研究代表者 廣岡俊彦)の支援を受けた。

略語一覧

- 3DVAR: Three-dimensional Variational Data Assimilation 3次元変分法データ同化
- AFES: AGCM for the 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
- ALERA: AFES-LETKF experimental ensemble reanalysis AFES-LETKF 実験的再解析
- CFES: Coupled Atmosphere-Ocean GCM for the Earth Simulator 地球シミュレータ用大気海洋海水結合モデル
- 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
- EFSO: Ensemble-based Forecast Sensitivity to Observations アンサンブルに基づき推定した観測に対する予報感度

- ENSO : El Niño Southern Oscillation エルニーニョ・南方振動
- EPS : Ensemble Prediction System アンサンブル予報システム
- LETKF : Local Ensemble Transform Kalman Filter 局所アンサンブル変換カルマンフィルタ
- MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate 東京大学大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構で開発された全球気候モデル
- MJO : Madden-Julian Oscillation マッデン・ジュリアン振動 (熱帯季節内振動)
- NAO : North Atlantic Oscillation 北大西洋振動
- NICAM : Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model 東京大学大気海洋研究所・海洋研究開発機構で開発された全球雲解像モデル
- OSE : Observing-System Experiment 観測システム実験
- PJ : Pacific-Japan テレコネクションパターンの名称
- PJO : Polar-night Jet Oscillation 極夜ジェット振動
- QBO : Quasi-Biannual Oscillation 成層圏準2年周期変動
- RBF : Radial Basis Function 距離基底函数
- 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

参考文献

- Newman, P. A., L. Coy, S. Pawson and L. R. Lait, 2016: The anomalous change in the QBO in 2015-2016. *Geophys. Res. Lett.*, **43**, 8791-8797.