

第5回メソ気象セミナー開催報告

メソ気象セミナー事務局

(鵜沼 昂*1・吉住蓉子*2・春日 悟*3・下瀬健一*4・加藤亮平*5
 栃本英伍*6・渡邊俊一*7・末木健太*8・津口裕茂*9・横田 祥*10)

1. はじめに

メソ気象セミナーは、「メソスケール気象学の研究について、これまで・現在・これからを把握すること」をコンセプトとし、セミナー形式で議論を行うことでメソスケール気象学(以下、メソ気象)の理解を深めることを目的とした集いである。当セミナーは、メソ気象研究連絡会の傘下で活動しており、活動内容は Web ページ (<http://meso.sakura.ne.jp/mesosemi> 2018.9.13閲覧) または開催報告書(下瀬ほか 2014, 2016; 栃本ほか 2016; 渡邊ほか 2017) を参照されたい。

第5回目となる今回のセミナーは、「米国と日本とで大雨をもたらす中小規模大気現象の理解にむけて」というテーマで、米国コロラド州立大学の Russ Stanley Schumacher 博士を招聘し、2018年6月15~16日に東京大学大気海洋研究所で開催した。内容

としては、米国で大雨をもたらすメソ対流系の実態・メソ対流系からもたらされる雨量の対流圏下層の水蒸気に対する感度・アンサンブル予報と機械学習を用いた確率的降水予報についてそれぞれ講演をしていただいた。加えて日本側から日本で大雨をもたらすメソ対流系の実態・特別観測で得られたデータの応用・アンサンブル手法を用いた豪雨・突風現象の再現と解析といった話題を提供することで、日米双方から話題を持ち寄りつつ自由に議論する時間を2日間設けた。今回の参加者数は本セミナーで過去最多の56名となり、参加者の所属も研究機関・大学・企業・官公庁など多岐に渡っていた(第1図)。

2. Schumacher 氏による基調講演

2.1 米国で大雨をもたらすメソ対流系の実態

一つ目の基調講演では、米国で研究されてきた大雨の基礎・応用についてレビューをしていただいた。まず初めに、構成要素ベース(ingredient-based)の考え方が提示された。これは、ある現象が起こるために必要な何かを知る、という考え方である。この考え方は、我々の知っていることに基づくため、我々の知識による制約を受ける一方、重要な要素の見逃しを防ぐ役割も担うものである。大雨の構成要素は深い湿潤対流である。その発生に重要な要素として、湿度・安定度・持ち上げの効果がそれぞれ挙げられた。

Doswell *et al.* (1996) で提唱された大雨に必要な要素は、次の二つの関係式で表される。それらは、1) 積算降水量はある期間の平均降水強度とその継続時間との掛け合わせ、2) ある期間の平均降水強度は降水効率・上昇流・単位面積当たりの水蒸気量の掛け合わせ、といったものである。降水効率は周辺大気の

*1 (連絡責任著者) Takashi UNUMA, 気象庁観測部観測課観測システム運用室。

t.unuma@met.kishou.go.jp

*2 Youko YOSHIKUMI, 九州大学大学院理学府。

*3 Satoru KASUGA, 新潟大学大学院自然科学研究科。

*4 Ken-ichi SHIMOSE, 防災科学技術研究所。

*5 Ryohei KATO, 防災科学技術研究所。

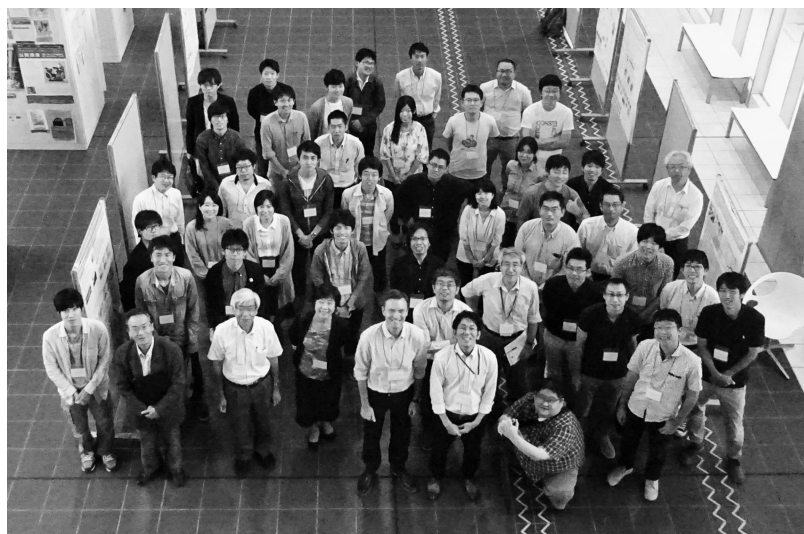
*6 Eigo TOCHIMOTO, 東京大学大気海洋研究所。

*7 Shunichi WATANABE, 気象業務支援センター。

*8 Kenta SUEKI, 理化学研究所計算科学研究センター。

*9 Hiroshige TSUGUTI, 気象庁気象研究所。

*10 Sho YOKOTA, 気象庁気象研究所。



第1図 セミナー参加者との集合写真。

相対湿度や湿潤対流の組織化と密接に関係し、水平風の鉛直シアもまた対流の組織化に関係する (Lamb 2001)。対流の組織化という観点では、大雨は単一の湿潤対流からもたらされることは無い。言い換えると、個々の湿潤対流がなんらかの形で組織化する必要があるということである。このため、古くから対流の動きや伝播・系の動きといったことに着目されてきた。対流系の動きについては、系の動きと対流の動きとが直交する場合にはある地点での積算降水量は多くなりやすい一方、系の動きと対流の動きとが平行の場合にはある地点での積算降水量は多くなりやすい (Chappell 1986 ; Doswell *et al.* 1996 ; Corfidi 2003)。特に、米国で大雨をもたらすメソ対流の形態として、Training line/Adjoining stratiform 型や Back building/Quasi-stationary 型が提案されている (Schumacher and Johnson 2005)。

平成29年7月九州北部豪雨を例として、対流不安定の重要性について触れられた。この事例では、対流が起こっている上流側が対流不安定で、かつ水平収束が生じていることが興味深い点であると指摘された。さらに、鉛直断面を観ると、局所的に Convective Available Potential Energy (CAPE) の値が大きい層があることを示し、CAPE の局所的増大と山岳による強制滑昇とでバックビルディング (back-building) 型の形成過程により大雨が生じていたのであろう、という考え方が示された。

先に述べた CAPE は、対流が発達するうえで必要なエネルギーであるものの、そのエネルギーは空気塊が自由対流高度よりも上空へ持ち上げられない限りは潜在的なものである。このような観点から、湿潤対流が発生する必要条件の一つとして、空気塊の持ち上げ効果の重要性について、主に1988年に出版された二つの論文を比較することで講演は進められた。一つ目は、Rotunno *et al.* (1988) の cold-pool—shear interaction によるメカニズムである。これ

は、降水による雨滴の蒸発に伴って生じる冷気外流出と水平風の鉛直シアとのそれぞれの鉛直循環によって空気塊が持ち上げられるという考え方である。もう一方は、Crook and Moncrieff (1988) であり、総観規模スケールの上昇流によって空気塊が持ち上げられるという考え方である。Crook and Moncrieff (1988) で想定されるような総観規模条件として、寒冷渦がほぼ停滞するような条件下で生じた大雨に着目した結果が示された。cold-pool—shear interaction による効果があったとすれば、地上付近の温位偏差は 10K 程度と想定される一方、寒冷渦がほぼ停滞するような条件下を想定した実験では、数 K 程度であった。このような数値モデルの結果から、gravity wave stagnation が生じていたことが提案された (Schumacher and Johnson 2009 ; Schumacher 2009)。また、伝播するメソ対流系内での上昇流 (持ち上げ効果) を cold-pool—shear interaction によるものかメソスケールあるいは総観規模スケールによるものを区別する指標も提案された (Peters and Schumacher 2016)。

2.2 メソ対流系からもたらされる雨量の対流圏下層の水蒸気に対する感度

一つ目の講演で、Schumacher 氏は対流圏内の水蒸気が湿潤対流の発生に重要であることを指摘した。中でも、降水予報の精度向上という観点で降水量や多量の降水をもたらすメソ対流系の形態と対流圏下層の水

蒸気との関係に着目した研究が十分に行われていないことに着目し、二つ目の講演では対流圏下層の水蒸気もたらず役割について一歩踏み込んだ内容が紹介された。

まず、Schumacher氏は、メソ対流系による降水は対流圏下層の熱力学的プロファイルのわずかな変化への感度が高い点に着目し、地上から高度約1 kmまでの水蒸気量を減少させた感度実験を行った結果を示した。その結果、標準実験よりも降水量が減少することが示され、地上付近の空気の対流域への持ち上げが抑制されたことが要因であることが指摘された。また、標準実験ではバックビルディング型の形成過程により、降水系が維持されていたことが示された (Schumacher 2015)。また、対流圏下層の水蒸気量を増加させた感度実験では、標準実験よりも積算降水量が増加した。しかし、バックビルディング型の形成過程が生じていた領域での積算降水量は、対流圏下層の水蒸気量が少ない実験でより卓越していた。このことから、対流圏下層の水蒸気量が標準実験よりも少ない場合にバックビルディング型の形成過程が生じやすいということが示唆された (Schumacher and Peters 2017)。

次に、Plains Elevated Convection at Night (PECAN) 特別観測中に2015年6月24-25日にアイオワ州で観測されたメソ対流系の解析結果が紹介された。この事例では、メソ対流系の東側でoutflow boundary (OFB) が形成され、このOFBに沿ってメソ対流系は南東方向へ移動することが示された。このメソ対流系がある高層観測点から別の高層観測点に移動するまでの4時間にCAPEは増加し、CINは減少した。一方、気象数値モデルによる再現実験では対流圏下層の水蒸気量が観測値よりも少なく予測されたことにより、CAPEは過小、CINは過大となっていた。また、メソ対流系の位置は観測された位置よりも北東方向へ移動していたことに着目し、この位置のずれは気象数値モデル内で表現される対流圏下層の水蒸気量の過少評価や、自由対流高度の過大評価に関連することが示された (Peters *et al.* 2017)。

2.3 アンサンブル予報と機械学習を用いた確率的降水予報

三つ目の講演では、アンサンブル予報による降水予報の改善と、機械学習による現業予報に資する情報の改善について紹介いただいた。まず、Schumacher氏は、近年の計算機および気象モデルの改良により降水

予報の的中率は改善してきているが、米国では予報官による予報の的中率のスコアを上回ることはこれまでなかったことを指摘した。予報官によって受け継がれてきた技術力の高さを讃えると同時に、気象数値モデルによる局地規模の降水予報の難しさが指摘された。また、決定論的降水予報には限界があるとし、確率論的な考え方に転換していく必要性が指摘された。確率論的予報の一例として、アンサンブルモデルにおいてあるグリッドの予報降水量がある閾値 (例えば50 mm/6 hr) を超えたメンバー数を全メンバー数で割ったものを降水確率と定義し、その有効性が示された。前述の定義での確率論的予報では捉えきれない降水事例があることから、現在のアンサンブルモデルに改良の余地があることが指摘された。その解決策として、最適なメンバー数の調整・摂動の与え方 (初期値・境界値、パラメタリゼーション、確率論的物理学 (stochastic physics))・データ同化手法などが挙げられた。また、同時にこれらの項目全てに共通する問題点として計算コストの大きい点が強調された。

次に、現在米国で用いられているアンサンブルモデルを用いた降水予報の例として Storm Prediction Center (SPC) の High Resolution Ensemble Forecast (HREF) が紹介された。HREFは、前述の計算コストの問題を4つの異なる研究機関の計算機を用いることで解決し、さらに、time-lagging (異なる時刻の初期値による複数の特定時刻の予報データ) のメンバーも合わせた8メンバーで1時間ごとのアンサンブル予報を行うものである。また、過去に National Center for Atmospheric Research で実験的にアンサンブルモデルを用いていたことも話題として触れられ (<http://ensemble.ucar.edu/> 2018.9.13閲覧)、現在は改良版が開発中とのことである。National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) では現業のメソ予報モデルである High Resolution Rapid Refresh に対し time-lagging を適用し一つのアンサンブル予報として公開しており、今後は time-lagging によらないアンサンブルモデルの確立を目指しているという。さらに、NOAAでは Experimental Forecast Program と称し、“warn-on-detection (実況に基づく警報)” から “warn-on-forecast (予測に基づく警報)” な警戒システムへの移行を目指し、様々なアンサンブルモデルが試行されていることが紹介された。

続いて、アンサンブルシステムが改良されても後処

理(例えば、ガイダンスなど)は変わらずに必要となることが指摘された。後処理には基本的に長期間の過去の予報データを要する。長期間の過去の予報データを使用せず、Hamill *et al.* (2013) で提案された同一モデルで過去を再び予報することで長期間に渡る均質な予報データセットを作成する手法に Schumacher 氏は着目し、その手法を適用した結果が紹介された。航空機の離陸可能条件を予報するためには、機械学習として約3年の学習期間が必要(Herman and Schumacher 2016)となる一方、降水・洪水予報への適用は単純ではないことが示された。この解決策として、降水(豪雨)の判定には地域差を考慮し Average Recurrence Intervals (ARI: 地域ごとの数年に一度に相当する降水量)を用いる手法が提案され、機械学習の降水予報への適用可能性が示唆された。機械学習を用いた現在のアプローチとしては NOAA Weather Prediction Center の Excessive Rainfall Outlooks (EROs) による洪水の危険度予報がある。現在、雲解像気象数値モデルの計算結果は1日先程度までしか利用出来ないため、1日より先の予報の参考になる定量的なデータとして活用できる機械学習アンサンブルシステムの構築を目指し、研究が進められている。この機械学習を用いた予報を用い、“first guess (第一推定値)”として実験的に EROs に適用する試み(Flash Flood and Intense Rainfall experiment)が2017年の6~7月に行われ、結果は良好とのことである。また、NOAAの現業の予報モデルである Global Ensemble Forecast System や European Centre for Medium-Range Weather Forecasts の予報よりも機械学習を用いたアンサンブルモデルの方が精度の良いことが示された(Herman and Schumacher 2018a, b)。上記内容のリアルタイム予報は、コロラド州立大学のHPで公開されている(http://schumacher.atmos.colostate.edu/gberman/expcp_ml.php 2018.9.13閲覧)。

最後に、Schumacher 氏は洪水災害の観点では、気象学のみならず様々な学問や行政・地域の関わりや、最終的には個々人の判断が災害リスクを左右することを強調し、分野横断型の洪水研究の必要性を提案した。その理念に基づいて開催した、Studies of Precipitation, flooding, and Rainfall Extremes Across Disciplines (SPREAD) workshop の内容が紹介された(Schumacher 2016)。

3. 日本側話題提供、一般口頭・ポスター発表

日本側からの話題提供として、気象庁気象研究所の津口裕茂・気象庁の鶴沼 昂より日本で大雨をもたらすメソ対流系に関する研究・解析の現状について話題提供した。防災科学技術研究所の清水慎吾氏(代理発表:同研究所の加藤亮平)には二重偏波レーダーやマイクロ波放射計といった観測データの応用について話題提供をいただいた。気象庁気象研究所の横田 祥は、データ同化・メソアンサンブルといった新たな切り口によるメソ現象の解析について、最新の研究成果を発表した。

一般口頭発表セッションでは、まず名古屋大学の篠田太郎氏から、最新のレーダーデータを用いた霰の分布と上昇流との関係を調べた発表があり、線状のメソ対流系に伴って霰が多く発生していることが述べられた。次に、東京大学の新野 宏氏より島根県に発生した2つの豪雨事例についての紹介があった。1983年7月23日の事例については、地形による水平収束と強制滑昇の両方が重要であることが示され、2013年7月28日の事例については、竜巻の発生は確認されていないものの Updraft helicity の大きいスーパーセルに似た特徴を持つ事例であることが報告された。最後に東京大学の齊藤和雄氏より関東地域での局地的な降水予測についてメソアンサンブル結果の紹介があり、3つの異なる局地風による水平収束により局地的な降水が生じていたことが示された。

一般ポスター発表セッションでは、第1表に示すように、降水に関係するさまざまな時空間スケールの大気現象に関する研究の発表があった。発表時間を約2時間設けたため、十分な議論が出来たと同時に発表者同士の交流も深まったようである。

4. 総合討論

総合討論では、日・米で大雨をもたらす中・小規模大気現象の一つであるメソ対流系のこれまでの理解について整理し、日米間での共通点・相違点を本研究集会の参加者全員で議論した。

まず、共通点として、対流圏下層の水蒸気量の多さ・水平風の鉛直シアーの大きさ、メソ対流系の形態が挙げられた。次に、相違点としては、メソ対流系の水平規模が大きく異なることが挙げられた。米国では水平規模が数百 km に及ぶ一方、日本では数十 km 程度の場合が多い。メソ対流系の寿命の相違も指摘された。寿命の定義に依存して解釈が異なることもあるもの

第1表 一般ポスター発表の氏名・所属・発表タイトル一覧。

| 氏名 | 所属 | 発表タイトル |
|-------|------------------|---|
| 末木 健太 | 理化学研究所計算科学研究センター | Numerical convergence for statistics of deep moist convection |
| 玉置 雄大 | 北海道大学大学院理学院 | Heavy rainfall duration bias in dynamical downscaling and its related synoptic patterns in summertime Asian monsoon |
| 渡邊 俊一 | 気象業務支援センター | Formation of convergence zones in a cold air outbreak |
| 林 修吾 | 気象庁気象研究所 | Idealized experiment of line-shaped precipitation system |
| 平田 英隆 | 名古屋大学宇宙地球環境研究所 | Impact of latent/sensible heat supply from the Gulf Stream on a powerful bomb cyclone in the early of January 2018 |
| 辻 宏樹 | 東京大学大気海洋研究所 | Distinction between precipitation related to a front and that to an interplay of an atmospheric river and a cut-off low |
| 横山 千恵 | 東京大学大気海洋研究所 | Future projections of precipitation characteristics around Japan in early summer combining GPM DPR observation and CMIP5 large-scale environments |
| 春日 悟 | 新潟大学大学院自然科学研究科 | The structure and environmental characteristics of upper level cutoff low and trough associated with tornados |

の、任意の地点の雨量の継続時間や、ある形状の系の寿命などにより比較可能との意見も出された。また、メソ対流系の層状域の広さやその拡がり方にも相違があるという意見もあり、具体的には米国では日本と比べて層状域の面積が比較的広く分布する傾向にあるのではないかと、いうものである。さらに、cold-pool-shear interaction の効果は対流圏中層が乾燥した条件下ではメソ対流系の発生・発達に有意に影響するものの、対流圏中下層が湿潤な環境条件下ではその影響は小さくなること指摘された。さらに、日本の梅雨期でも対流圏中下層が湿潤となる場合が多く、その環境下で生じるバックビルディング型のメソ対流系については共通しているのではないかと、いう議論に発展した。また、米国では停滞前線の寒気側で大雨をもたらすようなメソ対流系が生じやすい一方、日本では停滞前線の暖気側で生じやすいことも相違点として指摘された。CAPE の値についても米国に比べて日本では小さい傾向にあることが指摘された。日本でCAPE の値が小さくなりやすい要因として、中層が湿潤で仮温位が大きくかつ中立的な大気状態となりやすいことが議論された。さらに、地形の影響も議論された。地形の影響についてはさまざまな要因があることが指摘された上で、山岳地形の傾斜度合い・形状、さらには地形の複雑度合いといった地理的要因との関連も議論された。そのほか、Schumacher 氏の講演内で触れられた、持ち上げメカニズムを診断するには、メソスケールや総観規模スケールの水平スケールの違いに注意する必要があることが議論された。

大雨をもたらすメソ対流系の今後の研究の方向性と

して、以下の事項が挙げられた。まず、これまでに指摘されてきた大雨発生に対する対流圏下層の暖湿流に関するさらなる研究が必要であることが強調された。具体的にどのように大雨と関連するかについて詳細を詰めていくという方向性が議論の中で述べられた。大雨の起こりやすい総観規模状況として、台風の影響がしばしば指摘される一方で、台風に関連する大雨の研究は台風の力学や構造の研究とは独立していることが指摘された。気象学の中でも、対象とする現象に対し細分化した分野の横断的な見方の必要性も指摘された。

新たな観測手法・観測機器で得られたデータを用いることで、新たな知見を得る可能性があることが本研究集会で示された。特に、メソスケール気象数値モデルへのアンサンブル予報の応用・データ同化手法の適用、さらに、機械学習を用いた後処理といった解析手法にも新知見の芽が育ちつつあることが確認された。

以上のように、日米での大雨をもたらすメソ対流系のこれまでの知見を整理するとともに今後の研究の方向性について議論することが出来た。

5. まとめ

今回のメソ気象セミナーは、「米国と日本とで大雨をもたらす中小規模大気現象の理解にむけて」というテーマで開催され、Schumacher 氏による基調講演及び日本側からの発表、一般口頭・ポスター発表、参加者全員による活発な議論が行われた。Schumacher 氏の基調講演では、博士論文研究から近年の研究までの一連の成果をトピック毎にまとめて紹介していただい

た。

総合討論では日・米で大雨をもたらす中・小規模大気現象の一つであるメソ対流系のこれまでの理解について整理し、日米間での共通・相違点、今後の研究の方向性をセミナーの参加者全員で議論した。

今回、メソ気象セミナーとしては初となる、海外の講師招聘を行った。当初、面識も無い日本人からのお願ひなんか断られるだろうと思っていた。しかし、講師から快諾いただけたのは非常に幸運であった。雑談の中で、Schumacher氏に本セミナーの講師を引き受けようと思った理由を訊いてみたところ、「内容が面白そうだと思ったし、米国には同様のコミュニティが無いから行ってみたいと思ったからだよ」と仰っていた。興味は研究者の原動力であることを感じるとともに、コミュニティとしての繋がり的重要性を改めて感じた。今後もメソ気象セミナーがメソ気象学の理解を深める場を提供する役割を担っていきたいと考えている。

なお、Schumacher氏の講演の詳細については、Schumacher (2017) も参照されたい。

謝 辞

本セミナーを開催するにあたり、東京大学大気海洋研究所の柏地区共同利用研究集会（受付番号104, 2018）の助成を受けました。日本気象学会の国際学術研究集会出席補助金（国内で開かれる国際学術研究集会）より講師招聘に掛かる旅費の一部補助を受けました。講師の招聘にあたり、東京大学大気海洋研究所の国際・研究推進チームの金井秀雄様、同研究所の新野宏客員教授、伊賀啓太准教授、日比野英美様にお世話になりました。日本気象学会事務局より事務用品を借用するにあたり、事務局長の横手嘉二様にご対応いただきました。また、Schumacher氏に観測設備を紹介した際に、防災科学技術研究所水・土砂防災研究部門と気象庁気象研究所気象衛星・観測システム研究部第三研究室の方々に見学対応をしていただきました。ご協力いただいた皆様に対し心より御礼申し上げます。

参 考 文 献

- Chappell, C., 1986: Quasi-stationary convective events. *Mesoscale Meteorology and Forecasting* (P. Ray, Ed.), Amer. Meteor. Soc., 289-310.
- Corfidi, S. F., 2003: Cold pools and MCS propagation: Forecasting the motion of downwind-developing

MCSs. *Wea. Forecasting*, **18**, 997-1017.

Crook, N. A. and M. W. Moncrieff, 1988: The effect of large-scale convergence on the generation and maintenance of deep moist convection. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 3606-3624.

Doswell III, C. A., H. E. Brooks and R. A. Maddox, 1996: Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Wea. Forecasting*, **11**, 560-581.

Hamill, T. M., G. T. Bates, J. S. Whitaker, D. R. Murray, M. Fiorino, T. J. Galarneau Jr., Y. Zhu and W. Lapenta, 2013: NOAA's second-generation global medium-range ensemble reforecast dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1553-1565.

Herman, G. R. and R. S. Schumacher, 2016: Using reforecasts to improve forecasting of fog and visibility for aviation. *Wea. Forecasting*, **31**, 467-482.

Herman, G. R. and R. S. Schumacher, 2018a: Money doesn't grow on trees, but forecasts do: Forecasting extreme precipitation with random forests. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 1571-1600.

Herman, G. R. and R. S. Schumacher, 2018b: "Dendrology" in numerical weather prediction: What random forests and logistic regression tell us about forecasting extreme precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 1785-1812.

Lamb, D., 2001: Rain production in convective storms. *Severe Convective Storms* (C. A. Doswell III ed.), **50**, Amer. Meteor. Soc., 299-321.

Peters, J. M. and R. S. Schumacher, 2016: Dynamics governing a simulated mesoscale convective system with a training convective line. *J. Atmos. Sci.*, **73**, 2643-2664.

Peters, J. M., E. R. Nielsen, M. D. Parker, S. M. Hitchcock and R. S. Schumacher, 2017: The impact of low-level moisture errors on model forecasts of an MCS observed during PECAN. *Mon. Wea. Rev.*, **145**, 3599-3624.

Rotunno, R., J. B. Klemp and M. L. Weisman, 1988: A theory for strong, long-lived squall lines. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 463-485.

Schumacher, R. S., 2009: Mechanisms for quasi-stationary behavior in simulated heavy-rain-producing convective systems. *J. Atmos. Sci.*, **66**, 1543-1568.

Schumacher, R. S., 2015: Sensitivity of precipitation accumulation in elevated convective systems to small changes in low-level moisture. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 2507-2524.

Schumacher, R. S., 2016: The studies of precipitation, flooding, and rainfall extremes across disciplines

- (SPREAD) workshop: An interdisciplinary research and education initiative. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 1791-1796.
- Schumacher, R. S., 2017: Heavy rainfall and flash flooding. *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*, doi:10.1093/acrefore/9780199389407.013.132
- Schumacher, R. S. and R. H. Johnson, 2005: Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 961-976.
- Schumacher, R. S. and R. H. Johnson, 2009: Quasi-stationary, extreme-rain-producing convective systems associated with midlevel cyclonic circulations. *Wea. Forecasting*, **24**, 555-574.
- Schumacher, R. S. and J. M. Peters, 2017: Near-surface thermodynamic sensitivities in simulated extreme-rain-producing mesoscale convective systems. *Mon. Wea. Rev.* **145**, 2177-2200.
- 下瀬健一, 津口裕茂, 栃本英伍, 鶴沼 昂, 2014: 第1回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **61**, 947-951.
- 下瀬健一, 津口裕茂, 栃本英伍, 鶴沼 昂, 加藤亮平, 2016: 第2回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **63**, 125-129.
- 栃本英伍, 渡邊俊一, 末木健太, 吉住蓉子, 下瀬健一, 津口裕茂, 加藤亮平, 鶴沼 昂, 2016: 第3回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **63**, 929-935.
- 渡邊俊一, 下瀬健一, 栃本英伍, 末木健太, 横田 祥, 加藤亮平, 鶴沼 昂, 春日 悟, 2017: 第4回メソ気象セミナー開催報告. *天気*, **64**, 827-833.
-