

第3回メソ気象セミナー開催報告

メソ気象セミナー事務局

(栃本英伍^{*1}・渡邊俊一^{*2}・末木健太^{*3}・吉住蓉子^{*4}

下瀬健一^{*5}・津口裕茂^{*6}・加藤亮平^{*7}・鵜沼 昂^{*8})

1. はじめに

メソ気象セミナーは、「メソ気象研究のこれまで・今・これから」をコンセプトとしてセミナー形式で議論を行い、メソ気象研究への理解を深めることを目的とした集いである。具体的には、数多くの観測的・数値的・理論的な研究により明らかにされてきた『メソ気象』について、

- ・これまでどこまで理解されているのか
- ・現在ではどのような研究がおこなわれているのか
- ・さらに今後どのような研究を行っていくべきか

について議論を行う。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、活動の詳細はWebページに掲載している (<http://meso.sakura.ne.jp/mesosemi>を参照)。なお、企画・運営は手弁当で行われている。

第3回目である今回は、「数値実験と統計解析」をテーマとして取り上げ、2016年7月9日-10日に静岡市の静岡県男女共同参画センター「あざれあ」で開催した。今回の参加者数は34名であり、参加者の所属は研究機関・大学・企業・気象庁など多岐に渡っていた

(第1図)。講師として、数値実験や統計解析を用いたメソ対流系の研究で著名である竹見哲也氏をお招きした。同氏は、現在、京都大学防災研究所の准教授を務められており、メソ対流系の研究にとどまらず、都市気象や台風に関連した研究にも精力的に取り組んでおられる。今回のセミナーは、以下の内容で行われた。

- ・局地的大雨に関する予測検討会
- ・竹見氏による基調講演
- ・簡易事例解析
- ・参加者によるポスターセッション
- ・総合討論

基調講演では、竹見氏が学生時代に取り組んだ研究から最新の研究までの話題に加え、メソ気象研究に関する今後の展望についてもお話しいた。総合討論では、数値モデルを用いた今後のメソ気象研究についての議論が活発に行われた。次節以降、セミナー内容の詳細を報告する。

2. 基調講演

2.1 メソ気象学における竹見氏のあゆみ

はじめに、竹見氏の博士論文の研究テーマであった乾燥地におけるスコールラインについての講演が行われた。中国ゴビ砂漠で発生したダストストームのデータ解析の結果から、乾燥地域におけるスコールライン発生時の特徴を示した。それは、対流混合層が非常に厚いため、その上端と自由対流高度の差が小さく、水蒸気も対流混合層内でよく混合されているという点である。この結果から、竹見氏は対流混合層内の水蒸気プロファイルに着目し、水蒸気の鉛直分布に対するスコールラインの感度を数値実験により調べた。水蒸気が上部まで混合されている場合、対流混合層上部の対

^{*1} (連絡責任著者) Eigo TOCHIMOTO, 東京大学大気海洋研究所, 〒277-8564 千葉県柏市柏の葉5-1-5. tochimoto@aori.u-tokyo.ac.jp

^{*2} Shunichi WATANABE, 東京大学大気海洋研究所.

^{*3} Kenta SUEKI, 東京大学大気海洋研究所.

^{*4} Yoko YOSHIZUMI, 九州大学大学院理学府.

^{*5} Ken-ichi SHIMOSE, 防災科学技術研究所.

^{*6} Hiroshige TSUGUTI, 気象庁気象研究所.

^{*7} Ryohei KATO, 防災科学技術研究所.

^{*8} Takashi UNUMA, 津地方気象台.



第1図 第3回メソ気象セミナーの参加者。

流有効位置エネルギー (CAPE) が大きくなる。また、対流混合層上部では自由対流高度 (LFC) との差が小さくなり、持ち上げられる空気塊が LFC に到達しやすくなるため、対流が維持されることを明らかにした。このように、竹見氏は対流混合層の鉛直構造を CAPE の鉛直分布に置き換えて解釈することで、乾燥地域でのスコールラインの維持メカニズムを明らかにした。

続いて、講演の内容は熱帯のスコールに関する話題に移った。竹見氏は、海洋地球研究船「みらい」による熱帯域の観測に参加し、湿度変動の重要性を認識されたとのことであった。観測データの解析から、対流圏中・上層が湿っている期間には背の高い積乱雲の割合が増えることを示した。さらに、この観測事実を基にした数値実験により、対流圏上層まで湿った環境条件下では、背の高い積乱雲による降水の割合が大きくなることを明らかにした。

2.2 数値実験による湿潤対流のダイナミクスの研究

竹見氏は、乾燥地域あるいは熱帯域における対流に関係した研究を経て、気温・湿度といった熱力学的条件や水平風の鉛直シアといった力学的条件が対流に与える感度に着目するようになった。このような考えの基で、スコールラインを対象とした環境条件を系統的に変化させる感度実験により、環境条件の違いによるスコールラインの違いを明らかにした研究が紹介された。中緯度のスコールラインに対しては、対流圏中・上層の湿度が同じ条件であれば、対流圏下層が湿っている場合に対流の発達に好条件であること、可降水量が同じ条件であれば、対流圏下層が湿っている

場合に対流の発達に好条件となることを明らかにした。一方、対流圏下層が乾燥していると対流圏中層が湿っていても好条件にはならないことが示された。また、対流圏中層が乾燥しているほど、対流圏下層の鉛直シアと冷氣プールの相互作用の効果が対流の発達や強度に重要であることを明らかにした。

次に、竹見氏は、熱帯と中緯度の気温の鉛直分布の

違いに着目し、スコールラインに対する気温減率の感度実験の結果を示した。中緯度域のように気温減率が大きい気温の鉛直分布では、浮力が大きく、強い上昇流が発生しやすくなるため、エントレインメントが起きにくく強い降水系が形成されるのに対し、熱帯のような気温減率の小さな気温の鉛直分布では、浮力が小さく上昇流が弱いため、エントレインメントの影響により降水系は弱くなることを示した。気温減率が同程度の場合は可降水量が多いほど、また CAPE が大きいほどスコールラインの発達に好条件であることが示された。このような系統的な感度実験は、気温と湿度は互いに独立ではないため、単純ではない。しかしながら、可降水量や CAPE といった環境パラメータを固定するという絶妙なアイデアで系統的な感度実験を実現している。このような部分に竹見氏の思慮深さが伺える。

竹見氏は、約一年間 NCAR に滞在していた経験があり、その際、Rotunno 博士に師事していた。講演の中では、竹見氏が Rotunno 博士から受けた教えとして、「Philosophy」を大切にすることという紹介された。研究について議論をする際、Rotunno 博士は竹見氏に対し常に「この解析を行った意図は何か？ Philosophy は何だ？」と問いかけていたそうである。本講演においても、常に「どんな考え・意図で、何をするのか？」という主張が込められており、竹見氏の持つ Philosophy を強く感じられた。

2.3 統計解析による湿潤対流とその環境条件の研究

次に、夏季の局地的豪雨の発生と環境条件との関係の統計解析についての講演が行われた。関東平野と濃

尾平野について、特定の条件に基づいて降水日を抽出し、その環境条件についての解析を行った。降水日と非降水日をK指数などの安定度指数を用いて比較することで、降水日は非降水日に比べて有意に大気不安定であることが示された。この原因として、両地域において対流圏中層の相対湿度の差があることが示され、また関東平野においては中層の気温にも差があることが示された。このように、「一般に公開されている気象庁の配信データでも、解析手法を工夫することで新たなメソスケール現象の解明に繋がる」という、竹見氏の言葉が印象的であった。

2.4 湿潤対流を主としたメソ気象研究のこれから

竹見氏は、今後の研究の方向性として、メソスケールと総観スケール、メソスケールとマイクロスケールの相互作用、雲物理や乱流が対流に与える影響、地理・気候条件の違いによるメソスケール現象の地域性、大気-陸面/大気-海洋相互作用の重要性、気候変動の影響を挙げた。また、今後の発展が期待されるテーマとして、対流を励起源とする重力波の重要性を挙げた。Fovell *et al.* (2006) の数値実験を例に、メソ対流系によって励起された重力波の遠隔操作により既存の積乱雲群の前方に新たな積乱雲が生じる、不連続なセル形成の可能性を示した。さらに、異なるスケール間の相互作用が対流を励起する例として、鉛直シアアのある環境場中で、境界層ロールの一部が深い湿潤対流へと選択的にスケールアップする数値実験の結果を示した。次に、気候変動に伴う湿潤対流の特性の将来変化に関する最新の研究成果について紹介した。気象研究所全球モデルMRI-AGCM3.2Sを用いた気候予測実験は、将来気候(2075-2099年)では現在気候(1980-2004年)に比べ、相対湿度があまり変わらないまま対流圏全層の気温が高くなるため、水蒸気混合比が増加してCAPEが大きくなり、強い降水をもたらす激しい対流活動が起こりやすくなることを示唆している(Takemi *et al.* 2012; Takemi 2012)。将来気候では、気温の鉛直勾配が現在気候に比べ安定化することで総降水量は減少するものの、水蒸気量が特に対流圏下層で増加し、CAPEや可降水量が増加する。このため、積乱雲内の湿潤対流の強度が強くなり、降水発生時には現在よりも強い降水強度となる恐れがあることを指摘した。

最後に、竹見氏は、「これまでに使用した数値モデルや気象データは誰もが入手可能であることから、アイデアとPhilosophy次第で様々な研究が可能であ

ること」を指摘し、「誰もやらないこと・やりたがらないことに挑むことが重要である」と述べた。また、ご自身の経験をふまえ、「どのような環境下であっても、強い気持ちを持って研究をenjoyしてほしい」と述べ、講演を締めくくった。

3. 簡易事例解析

1日目の竹見氏の講演の合間に、参加者全員で簡易事例解析を行った。この解析は過去のメソ気象セミナー(下瀬ほか2014, 2016)でも試みられている。今回は興味のある事例を事前に募り、参加者から提案された2016年4月17日に日本海を通過した爆弾低気圧の影響による北陸地方における強風事例を扱った。特に、1130JSTに最大瞬間風速37.5 m/sを記録した金沢市に注目して解析を進めた。天気図によると、0900JSTの時点では低気圧中心は日本海上にあり、中心気圧は978 hPaであった。このとき、金沢市は低気圧の暖域に位置しており、寒冷前線からは少し離れていたが、寒冷前線の前面に風速の極大が見られたため、寒冷前線とは異なるメカニズムで強風が生じた可能性がある。この強風が生じたメカニズムについてはまだ解析の余地がある。現象の詳細な解析は腰を据えて行うべきであるが、多くの研究者による様々な観点からのアイディアを出しながらの解析は、それとはまた異なった現象へのアプローチを生み出す可能性を感じた。今後も、セミナー直近の事例や興味深い事例に関して、同様の試みを行いたいと考えている。

4. ポスターセッション

1日目の竹見氏の講演後にポスターセッションが開催され、12件の発表が行われた。第1表に示すように、降水・降雪、爆弾低気圧、台風、竜巻などの様々な現象に関しての最新の研究成果を聴くことができた。また、学生による発表も5件あり、研究者と学生の議論が活発に行われた。ポスターセッション後の懇親会においても、講演内容やその他の研究、各々の研究生活などの話題で盛り上がった。その熱は冷めることなく、2次会以降でも参加者たちの交流が深まった。

5. 総合討論

竹見氏の講演をふまえ、メソ気象現象の数値的研究の観点から、次の2点について議論が行われた。

1. メソ気象研究で今後明らかにしていくべき課題

第1表 ポスターセッションの内容。

氏名	所属	発表タイトル
川瀬 宏明	気象研究所	立山黒部アルペンルートにおける積雪観測とNHRCMによる再現実験
春日 悟	新潟大学大学院	寒冷渦・竜巻間の階層構造
山崎 哲	国立研究開発法人 海洋研究開発機構	新潟の里雪・山雪と大循環場
横田 祥	気象研究所	強い竜巻が発生するための条件 —高解像度アンサンブル実験による解析—
伊藤 純至	気象研究所	JMANHMの系統的な水平解像度依存性調査
渡邊 俊一	東京大学大気海洋研究所	日本海寒帯気団収束帯(JPCZ)の理想化実験
平田 英隆	九州大学大学院	爆弾低気圧の中心近傍のメソスケール構造に対する暖流の影響
末木 健太	東京大学大気海洋研究所	台風のSREH
吉住 蓉子	九州大学大学院	発達初期段階にある南岸低気圧に伴う雲内の降水形成メカニズム
吉田 龍二	理化学研究所 計算科学研究機構	SCALE-RMの領域気候実験
辻 宏樹	九州大学大学院	台風の大きさの変化と降水分布の関係
中野 満寿男	国立研究開発法人 海洋研究開発機構	正二十面体格子全球非静力学モデルにおける単精度の可用性の検討 ～傾圧不安定波

と、アプローチの方法

2. 今後のモデル開発のあり方

初めに、今後の研究課題として、メソ気象現象に対する気候変動の影響調査について議論が交わされ、総降水量などの統計量に着目するだけではなく、降水システムそのものの特徴（形態や組織化の様子）の変化についても調べていく必要があるとの意見が出た。これを明らかにするには、水平解像度が0.5–1 km程度の領域モデルを用いた疑似温暖化実験等を行い、5–10分程度の時間間隔で降水システムを解析する必要がある。しかし、全ての3次元データをストレージすることは難しいため、アウトプットする物理量を的確に選択する必要があることが指摘された。また、モデルで再現された種々の降水システム（例えばバックビルディング型）を自動検知するアルゴリズムの必要性が指摘され、昨今盛んに研究が行われている人工知能の活用も話題に上った。また、温暖化研究を精力的に進めている気候分野の研究者たちとの共同研究も、ますます大事になることが指摘された。気候分野では、対流が大気循環に与える影響を積雲パラメタリゼーションとして組み入れる必要上、深い対流について精通している研究者が多く、その力を借りていくことが、メソ気象研究にとっても重要になる。また、総観スケールとメソ気象現象の相互作用を調べるには、例えばNICAM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model; Satoh *et al.* 2014) のように、ストレッチ格子を用いたシームレスな高解像度化が可能なモデルの利用が望ましいとの意見も出た。

次に、数値実験でどこまで解像度を粗くすることが

可能なのかという点が議題に上がった。これに関して、定量的には違っていても、力学のエッセンスが再現される解像度であれば、十分であるとの意見が出た。また、解像度を上げることで、モデルに組み込まれたパラメタリゼーションが妥当性を失ってしまう危険性があることも指摘された。結局、見たい現象が何であるのかが重要であり、研究対象に応じて適切な解像度を選択していくしかないとも指摘された。また、現状では解像度を上げることが必ずしも予報精度の向上に結びつかないため、高解像度化は、あくまで現象のメカニズムの解明のために行われるべきだという主張も挙がった。ただし、地形性の現象の場合は、細かい解像度でなければ表現できないことが指摘された。また、数値予報として需要があるのは、豪雨や突風のスケールまでであるなど、社会的な要請により解像度の上限も自ずと決まってくるのではないかと指摘もなされた。

さらに、モデル開発の今後について意見が交わされた。現在日本で開発が行われている領域モデルには気象庁のJMA-NHM (Japan Meteorological Agency – Nonhydrostatic Model; Saito *et al.* 2006)、名古屋大学のCReSS (Cloud Resolving Storm Simulator; Tsuboki and Sakakibara 2007)、理化学研究所のSCALE (Scalable Computing for Advanced Library and Environment; Nishizawa *et al.* 2015; Sato *et al.* 2015) などがある。また、NICAMやJAMSTECのMSSG (Multi-Scale Simulator for the Geoenvironment; Takahashi *et al.* 2005) などの全球モデルも、ネスティングやスーパーコンピュータ

を用いた高解像度化により、メソ気象擾乱の再現が可能である。これらの開発は各機関で分散して行われているが、今後、例えば米国のWRF-ARW (Weather Research and Forecasting Model - Advanced Research WRF; Skamarock *et al.* 2008) のように、1つのモデルを協力して開発する必要があるのか、それは可能かという点が話し合われた。協力という観点からは、モデルの物理コンポーネントを共有するコンソーシアムが既に存在することが明らかにされた。また、本セミナーで行われた予測検討会のように、1つの事例に対して複数のモデルを用いて同じ枠組みでチャレンジし、モデル間の再現性の違いとその要因を明らかにすることは意義があるとの意見が出た。一方、日本で1つのモデルを開発するという点では、モデル開発には各々の考え方があること、論文を書くためにオリジナリティが求められることなどから、否定的な意見が多かった。モデル開発を集約することにより、モデル開発に携わる研究者が少なくなるデメリットも指摘された。また、モデルの開発者側から、モデルのバグ等について積極的に開発者側に質問・報告をしてほしいというユーザー側への要望も出た。モデル開発では特定の解像度をターゲットにチューニングが行われているため、「最適」な解像度は実は存在することも、開発者側から指摘された。この点に関してはユーザー側から、チューニングの詳細を情報共有してほしいとの要望が上がった。一方、チューニングの観点から、例えばWRFは米国で再現性が良くなるように開発されているはずであり、日本域や熱帯域でそのまま用いることは危険ではないかとの指摘がなされた。また、領域モデルを用いた台風の実験がしばしば行われている点に関して、境界層スキームはそもそも台風環境下を想定していないため、必ずしもその妥当性が明らかでないことが指摘された。最後に、もし日本で1つモデルを開発するならば、国境を越えて通用するモデルが相応しいとの声が上がった。

6. 局地的大雨に関する予測検討会

1日目の午前中に局地的大雨に関する予測検討会を開催した。検討会では、参加者の有志がさまざまな気象数値モデルを用い局地的大雨3事例を予測・再現した結果を持ち寄り、それらの比較を行った。検討会の趣旨の詳細は、2015年に開催した「2014年広島豪雨に関する予測検討会」の報告(津口ほか 2016)を参照されたい。参加者からは全部で8個の結果が提出され

た。使用された気象数値モデルは、CReSS, JMA-NHM, WRF-ARW, SCALE, NICAMである。今回の検討会では、水平格子間隔(1 km)や計算領域、初期値・境界値等を統一した標準実験(特別な観測データの同化は行わない)結果、もしくはそれらの制約を加えない自由実験結果を提出していただいた。また、参加者には予測した地上降水量のバイナリデータを提出していただき、実行委員が予測の再現性について定量的に評価した。予測の再現性の評価は、降水の位置・時刻ずれを考慮可能な指標であるFractions skill score (Roberts and Lean 2008; Duc *et al.* 2013)を用いて行った。

本検討会のメインテーマである、「夕方頃の局地的大雨を正午から予測した場合、現状の気象数値モデルでどの程度予測できるか」の下で、提出された8個の結果を比較・評価した。その結果、局地的大雨の再現性は、事例・モデルによってばらつきがあることがわかった。具体的には、1時間積算雨量が20 mm以上の強雨域に対し、時刻ずれを3時間・位置ずれを101 km許容すると、全事例に対し少なくとも1モデルはおおむね有用な予測精度を示すことが分かった。この結果は、様々なモデルの予測結果を利用することで局地的大雨予測の見逃しを減らす可能性を示唆している。一方、同じ時刻ずれで局地的なスケール(21 km程度以下)では、全事例に対しどのモデルも強雨域を有用な精度で予測できなかった。このことから、局地的大雨に対して20 km以下の局地的なスケールで有用な予測を行うには、より直近の初期値を用いた数値予測やレーダー観測の時間外挿を基本としたナウキャストによる予測を用いる必要性が示唆された。

検討会では上述した予測可能性の結果に加え、局地的大雨に対するモデルの雲微物理過程・移流スキーム・乱流スキーム等の感度や特別な観測データの同化の効果などが紹介され、活発な議論が行われた。これらの実験設定や結果の詳細は、現在、学術論文としてとりまとめ中である。

7. まとめ

今回のメソ気象セミナーは、「メソ気象研究における数値実験と統計解析」というテーマで開催され、竹見氏による基調講演および、参加者全員による活発な総合討論が行われた。竹見氏の基調講演では、湿潤対流に関する博士論文研究から近年の研究までの一連の成果や、メソ対流系が発生するための環境場の統計解

析についての研究成果が紹介され、参加者のメソ対流系に関する理解がより深まったと考えられる。竹見氏のこれまでの研究成果は、限られたデータセットや数値モデルしかなくとも、工夫次第でメソ気象研究を行うことができることを示していた。また、竹見氏が Rotunno 博士から教わった「Philosophy を大切にする」ということを、実際の研究生活でも体現されていることが講演の中で随所に感じられた。講演の最後には、ご自身のこれまでの研究生活の経験を踏まえ、どんな状況でも前向きに研究を楽しむことが重要であるというメッセージを若手研究者や学生に頂いた。

総合討論では、数値モデルを用いた今後のメソ気象研究に関する活発な議論が行われ、水平格子間隔に関する議論や、モデルユーザーと開発者の間の意見交換、今後のモデル開発に関する展望など、その内容は多岐に渡った。メソ気象研究の発展のためには数値モデルの精緻化が不可欠であると考えられる。そのためには、モデルのユーザー側と開発側の相互理解・情報共有が重要であるため、今回の総合討論はお互いの意見交換の場として非常に有意義であったと考えられる。今後も、メソ気象セミナーがこのような相互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。

メソ気象研究の発展のためには、観測データの取得も重要であると考えられる。本セミナーホームページでは、観測プロジェクトのアーカイブをメソ気象セミナーのホームページ上に公開している。過去に行われた・今後行われる予定の観測プロジェクトでアーカイブされていないものがあれば情報をお寄せいただきたい（事務局の連絡先は meso.discuss@gmail.com）。また、セミナー後にアンケートを行い、参加者のみなさまから多くの意見をいただいた。みなさまの意見は今後のセミナーに生かしていく所存である。次回セミナーについては、後日ホームページにて掲載予定である。また、運営に携わっていただける若手研究者も募集している。

参 考 文 献

- Duc, L., K. Saito and H. Seko, 2013: Spatial-temporal fractions verification for high-resolution ensemble forecasts. *Tellus*, **A65**, 18171, doi: 10.3402/tellusa.v65.i0.18171.
- Fovell, R.G., G.L. Mullendore and S-H. Kim, 2006: Discrete propagation in numerically simulated nocturnal squall lines. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 3735-3752.
- Nishizawa, S., H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto and H. Tomita, 2015: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations. *Geosci. Model Dev.*, **8**, 3393-3419.
- Roberts, N.M. and H.W. Lean, 2008: Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 78-97.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006: The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 1266-1298.
- Sato, Y., S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa and H. Tomita, 2015: Impacts of cloud microphysics on trade wind cumulus: which cloud microphysics processes contribute to the diversity in a large eddy simulation? *Prog. Earth Planet. Sci.*, **2**, 23, doi:10.1186/s40645-015-0053-6.
- Satoh, M., H. Tomita, H. Yashiro, H. Miura, C. Kodama, T. Seiki, A.T. Noda, Y. Yamada, D. Goto, M. Sawada, T. Miyoshi, Y. Niwa, M. Hara, T. Ohno, S. Iga, T. Arakawa, T. Inoue and H. Kubokawa, 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **1**, 18, doi:10.1186/s40645-014-0018-1.
- 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.
- Skamarock, W.C., J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang and J.G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 113pp.
- Takahashi, K., X. Peng, K. Komine, M. Ohdaira, K. Goto, M. Yamada, H. Fuchigami and T. Sugimura, 2005: Non-hydrostatic atmospheric GCM development and its computational performance. *Proc. 11th Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*, Reading, United Kingdom, ECMWF, 50-62.
- Takemi, T., 2012: Projected regional-scale changes in atmospheric stability condition for the development of summertime convective precipitation in the Tokyo metropolitan area under global warming. *Hydrol. Res. Lett.*, **6**, 17-22.

- Takemi, T., S. Nomura, Y. Oku and H. Ishikawa, 2012: A regional-scale evaluation of changes in environmental stability for summertime afternoon precipitation under global warming from super-high-resolution GCM simulations: A study for the case in the Kanto Plain. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 189-212.
- Tsuboki, K. and A. Sakakibara, 2007: Numerical Prediction of High-Impact Weather Systems. The textbook for Seventeenth IHP Training Course in 2007, 281pp.
- 津口裕茂, 下瀬健一, 加藤亮平, 栃本英伍, 横田 祥, 中野満寿男, 林 修吾, 大泉 伝, 伊藤純至, 大元和秀, 山浦 剛, 吉田龍二, 鶴沼 昂, 2016: 「2014年広島豪雨に関する予測検討会」の報告. *天気*, **63**, 95-103.
-