

多様な環境場におけるメソ降水系の動態とメカニズムの解明

—2023年度日本気象学会賞受賞記念講演—

竹 見 哲 也*

1. はじめに

このたびは、日本気象学会賞という大変荣誉ある賞を受賞し、大変光栄に思っております。これまでお世話になった皆様に心より感謝いたします。また、推薦してくださった先生方はじめ皆様には、私の業績を高く評価してくださって、本当にありがとうございました。

大学院博士課程から研究する人生が始まったとすれば、今は明らかに研究のキャリアの折り返し地点を過ぎております。今回の受賞は、これまで私自身が進めてきた表題の研究テーマについて一旦立ち止まって振り返る機会になるとともに、研究キャリアの後半もさらに頑張るようにと激励してくださったものと思っております。本稿では、受賞記念講演の内容とともに、当日はお伝えしきれなかった個人的な思い出やこれまでのキャリアの中で感じてきたことも含めて、表題の研究業績について記したいと思います。

2. メソ降水系研究との出会い

物理に興味があって京都大学理学部に入学し、より身近な自然現象の物理の勉強をしたいと思い、地球物理学に興味を持ちました。中でも、日々の暮らしで目にする大気現象の物理が面白そうだと思うようになりました。4回生の課題研究（卒業研究）では、大気中の複雑な流れ、乱流に何となく興味を持ち、防災研究所の光田 寧先生の研究室に所属することになりました。1993年4月のことです。当時光田先生の研究室は、

黒河流域における地空相互作用に関する日中共同研究（HEIFE）（光田 1988, 1998）の日本側研究機関の主動的な立場にあり、中国・河西回廊での地空相互作用（一般には大気陸面相互作用という用語が使われますけれども）や気象・水文過程の観測的研究を進めていました。もちろん、暴風雨や台風などメソ気象に係る他の研究テーマにも取り組んでいました。ただ、HEIFE プロジェクトの最終年度ということもあり、それに関する研究が中心となっていました。

そういう状況で、卒業研究に何をしようかと迷っていたところ、光田先生から、この年の5月5日に河西回廊を含めたゴビ砂漠南部で発生した大規模なダストストームを調べてみないか、と紹介されました。ダストストームといわれても、何に注目して調べればいいのか皆目見当がつかない状況でした。研究室の先輩の玉川一郎さんや板野稔久さんから、HEIFE プロジェクトや大気乱流のこと、メソ擾乱のこと、文献調査の仕方など教えてもらいながら、勉強を始めました。ところが、文献データベースで「dust storm」といったキーワードで調べると、多くは火星のダストストームの文献が出て、あとはダストデビルといった小規模渦、1930年代米国中西部を襲ったダストボウルに関する文献ばかりでした。これでは、何から手をつけていいのかますます分からない状況に陥りました。

そんな状況で、HEIFE の現地観測に何度も参加されていた林 泰一先生から、前年1992年の7月に現地で遭遇した急な強雨と突風現象が HEIFE 観測網で捉えられたことを伺いました。砂漠でも大雨が降るということに素朴な疑問を持ちました。また、光田先生からは、藤田哲也先生によるダウンバーストの文献をいくつか紹介されました。ダストストーム、砂漠の強雨と突風、ダウンバーストといったキーワードを手掛かりにして、現地観測データを処理したり、当時研究室

* 京都大学防災研究所。

takemi@storm.dpri.kyoto-u.ac.jp

—2024年7月2日受領—

—2025年5月30日受理—

で受信していた気象衛星「ひまわり」の画像データを処理したりして、メソスケールの対流性擾乱という切り口で、解析結果をなんとか卒業論文にまとめました。このようにして、卒業研究として実施した1993年5月のダストストームの事例解析結果は、1992年7月の突風事例の林先生による解析と合わせ、最終的に気象集誌の論文として掲載されました(Mitsuta *et al.* 1995)。

さらに、1993年5月のダストストームが結果的に博士論文のテーマにもなりました。ダストストームの成因が寒前線前面で発達したスコールラインに伴う強風に起因すること(Takemi 1999a)や、極度に乾燥した深い境界層中で降水が地上に達するまでにほぼ蒸発して下層に冷気が形成されること(Takemi 1999b)を明らかにし、乾燥地という水蒸気の寡少な環境でスコールラインが維持するメカニズムを数値モデルにより調べ、乾燥した条件であっても水蒸気量の境界層での鉛直分布によってはメソ対流系が維持できることを見出しました(Takemi and Satomura 2000)。私の最初の単著英文論文(Takemi 1999a)の査読過程では、査読意見への対応や論文修正でかなり苦労したものの、良い意見をいただいて大いに勉強になりました。この論文の執筆時には、石川裕彦先生から文章構成や英語表現について大変丁寧に指導していただきまして、本当にありがたかったです。石川先生には京大着任後にもお世話になりまして、学生の頃と同じように自由にさせていただいて感謝しています。

学生時代には、砂漠のメソ擾乱という、どちらかといえばマイナーなことを研究していたところ、気象学会の大会で発表したことをきっかけに、三上正男さんや清野直子さんに声をかけていただいて、2000年代の風送ダストの気候インパクトに関する日中共同研究ADEC(三上 2007; Mikami *et al.* 2006)への参加に繋がりました。博士課程の研究で実施したスコールラインの数値実験(Takemi and Satomura 2000)は2次元計算でしたが、ADECでは3次元計算にして、かつダストの移流・拡散モデルも組み込み、ダストの舞い上がりから輸送までシミュレーションすることができ(Takemi 2005)、これで博士論文の研究はやっと完了したな、という感覚でした。また、卒業研究時に文献調査したダストデビルについての知識は、だいぶ後になって、大学院生への研究指導で活かされることになりました(Ohno and Takemi 2010a, b)。

大学院生の頃、その後に大きく影響を受けた方との

出会いがありました。米国・国立大気研究センター(NCAR)のRichard Rotunno博士です。1995年2月に気象研究所に滞在され、1週間にわたって集中講義をされました(新野 1995)。当時私は、修士課程1年で、卒業論文を経てスコールラインなどメソ対流系の組織化という問題に興味を持ち、RKW理論(Rotunno *et al.* 1988, RKWは著者3名の頭文字)などの論文を読んでいたもので、Rotunno博士が来日するという絶好の機会に、是非とも会って直接話をしたいと強く思いました。そこで、光田先生にお願いして、出張旅費を出していただいて、板野さんとともに、気象研究所での集中講義やセミナーに参加しました。それまで論文でしか知り得なかった事柄について、ご本人から直接講義を受けて説明を伺ったことは感動でした。私は、その講義中、毎回最低1つは質問しようと心に決めていました。私自身どんな質問をしたか忘れてしまいましたが、よく質問する学生だという印象を持っていたいたようでした。また、気象研究所では新野 宏先生や吉崎正憲さんに変なお世話になり、居場所を提供していただき、気象研究所の方々とRotunno博士との議論の場に参加させていただきました。

その翌週、Rotunno博士は京都に移り数理解析研究所でセミナーをするとのことで、次の週も板野さんとともに吉田キャンパスまで話を聞きに行きました。セミナーの後、Rotunno博士は特に予定がないとのことでしたので、無謀にも、宇治キャンパスの防災研究所まで来ていただけないかとその場でお願いしました。すると、「いいよ」とご快諾してくださったので、キャンパス間の連絡バスで防災研究所にご案内しました。研究室で光田先生を交えて歓談し、夜は光田先生ご夫妻のご案内で、大津のホテルのレストランで会食しました。

こうして夢のような1週間ほどを過ごしました。後述の通り、この出会いが次の展開を生むことになりました。そして、このとき何か博士の印象に残るような行動をとれたことが、次の展開に繋がったように思います。また、メソ気象、特に対流・降水に係る現象について長い間にわたって興味を持って研究に取り組むきっかけにもなりました。

3. 熱帯積雲対流と湿度場の関係

学位を取得して大阪大学工学研究科の助手に着任し、船舶海洋流体力学の研究室に所属しました。この

研究室は、改組のために地球環境に係る分野融合を志向した新しい専攻に配置され、そこで私は砂漠から海の気象の研究に取り組み始めました。大阪大学時代には、石田廣史先生、塚本 修先生にお世話になり、海洋研究開発機構・海洋地球研究船「みらい」による西太平洋の熱帯観測航海に何度か参加し、気象観測に携わりました。乗船中は、昼夜問わずの観測で大変ではあったものの、米山邦夫さんや勝俣昌己さんはじめ、多くの方と交流を深められたのは良い思い出です。「みらい」には通算すると4か月ほど乗船したと思います。乗船中に感じた観測することの楽しさ、観測して自分で取得したデータを解析することの楽しさ、現地で気象現象を肌で感じることの高揚感、そして同船した方々との交流は忘れられません。

「みらい」観測で取得したゾンデ観測データを調べてみると、境界層は常に湿潤である一方、自由対流圏では相対湿度の変動が極めて大きいこと（例えば Brown and Zhang 1997 ; Yoneyama 2003）を、実感を持って理解することができました。この相対湿度変動と降水活動との関係性に興味を持ち、複数の観測期間を降水の有無や多寡で分類して、環境条件と積雲の発達形態との関係を調べました。無降水の状況から降水が多い状況へと変化すると、自由対流圏の相対湿度は次第に高くなっており、それに応じて積雲・雄大積雲・積乱雲と次第に雲頂の高い対流雲が現れるという鮮明な3モード構造 (Johnson *et al.* 1999) が見られました。また、非静力学モデルを用いた数値実験によって、相対湿度が高い湿潤層が下層から上層へと伸びると、対流雲の雲頂高度も高くなることが分かりました (Takemi *et al.* 2004)。

このように、砂漠という水蒸気が過小な環境から熱帯海上という水蒸気が豊富な環境へと環境場を変えて、対流雲に関する研究に取り組みました。その結果、いずれの環境においても、対流雲の発達には大気安定度や相対湿度が大きく影響するということが分かりました。この気づきが、スコールラインを主対象としたメソ降水系の動態とメカニズムに関する研究に繋がりました。

4. 熱帯海洋性と中緯度大陸性のメソ降水系の発達メカニズムの解明

大阪大学在職時に文部省在外研究の機会を得ました。スコールラインの力学に関する研究をしたいと思い、思い切って Rotunno 博士にコンタクトを取ったと

ころ、受け入れてくださるとのことで、意気揚々と渡米しました。2001年5月のことです。この頃NCARでは、MM5の後継として新しい非静力学メソモデルWRFを開発していました。そこで、この新しいモデルを使ってスコールラインの数値実験を始めました。その頃 Rotunno 博士は、Weisman and Rotunno (2004) に繋がる研究を進められていたので、その話も伺いながら、大気安定度を様々に変化させた感度実験を実施しようと考えました。ところが、WRFでスコールラインの数値実験を実施すると、格子スケールのノイズのようなものが現れ、どうもうまくいきませんでした。Rotunno 博士と同じ部門のメンバーと何度も議論した結果、高階微分の数値粘性が陽に含まれないWRFでは、物理粘性が本来の空間フィルタリング作用として機能すべきにもかかわらず、数値実験で用いた1 km程度の水平解像度では肝心の物理粘性の設定が不適切なため、この不具合が生じたことを見出しました。あれこれ困難に遭遇しながらも、NCAR滞在最終日に Monthly Weather Review のオフィス（当時NCARに所在）に論文を手渡ししました (Takemi and Rotunno 2003)。NCAR滞在は1年ほどの期間で、終りの頃にはもう1年は居たいと思いつつも、所属先に戻る必要があり帰国しました。1995年2月の出会いから7年ほどして共著論文を執筆できたことは大変光栄に思いました。

留学中に Rotunno 博士から紹介いただいた Pope (2000) をもとに、乱流モデルも勉強して、気象モデルにおける数値粘性と物理粘性との関係に関する上記の論文を出版したことが、私の次のキャリアに繋がりました。2004年5月に、東京工業大学総合理工学研究科に講師として着任したのです。所属したのは、建築風工学・数値流体工学の研究室で、専攻も環境理工学という学際的な組織でした。東工大では乱流の数値解析や風工学の研究に注力する必要があるため、メソ降水系研究にはあまり時間をかけられなかったものの、新しいことを勉強する良い機会になりました。結果として、私自身のもう1つの研究の軸として、大気乱流の数値解析 (LES) や LES と気象モデルとの融合研究を推進することに繋がりました (竹見・中山 2009; 竹見 2014; Takemi *et al.* 2019; Nakayama and Takemi 2020, 2024など)。

その後2007年3月に、京都大学防災研究所に異動し、メソ降水系の研究に再び取り組むことにしました。それまで私は、大陸乾燥地と熱帯海上という水蒸

気量としては両極端の条件下での対流雲に関する研究に取り組みました。そして、大気安定度と相対湿度がメソ降水系の動態やメカニズムに重要な役割を果たしていると認識するようになりました。そこで、熱帯海洋や中緯度大陸などを想定し、理想化した条件設定での数値実験によりメソ降水系の研究を進めることにしました。特に、観測やモデルによる多数の研究がなされてきたスコールラインを対象としました。

従来の研究では、熱帯では自由対流圏が乾燥するほど対流雲は抑制される一方、中緯度では上空が乾燥すると降水の蒸発冷却が顕著になって下層の冷氣プールが強化されスコールラインの強度が増す、と説明されてきました。まずは、この認識が妥当かどうかを探るため、中緯度の気温減率を想定し、対流圏下層の相対湿度を変化させたり、可降水量を一定に保ちつつ対流圏中下層の相対湿度を変化させたりして、様々なパターンで感度実験を行いました。その結果、可降水量が同じであれば、下層が湿潤で中層が乾燥した状況の方がその逆の状況よりも、スコールラインは強くなるという結果を得ました。この点では、中層が乾燥すると対流はより強くなる、といえます。しかし、中層のみならず下層も乾燥してしまうと、対流は弱まってしまう。なぜならば、そもそも水蒸気量が減少してしまうからです。結果として、スコールラインの強度は、可降水量と、CAPEにより表現される大気成層の不安定度との双方に密接に依存するということが分かりました (Takemi 2006)。

熱帯と中緯度とで対流雲中の鉛直速度に大きな違いがあることは、観測事実として知られています (LeMone and Zipser 1980; Zipser and LeMone 1980; Jorgensen and LeMone 1989; Lucas *et al.* 1994; Igau *et al.* 1999)。これは、熱帯と中緯度では気温減率が異なるため、下層の気塊を断熱的に持ち上げて得られる浮力の大きさが大きく異なることに起因します (Lucas *et al.* 1994)。このことは、簡単には次の鉛直方向の運動方程式に基づいて理解できます。すなわち、

$$\frac{dw}{dt} = g \frac{T'_v}{\bar{T}_v} \quad (1)$$

ここで、 w は鉛直速度、 g は重力加速度、 $\bar{T}_v$ および T'_v はそれぞれ環境場と摂動の仮温度です。式 (1) を変形して、LFC から LNB まで鉛直積分すると、

$$\int_{LFC}^{LNB} \frac{1}{2} \frac{dw^2}{dz} dz = \int_{LFC}^{LNB} g \frac{T'_v}{\bar{T}_v} dz \quad (2)$$

が得られます。式 (2) の右辺は、定義から CAPE です。さらに、式 (2) で LFC での鉛直速度を 0 と仮定すると、LNB で得られる最大の鉛直速度 $w_{\max}$ は、

$$w_{\max} = \sqrt{2CAPE} \quad (3)$$

となります。このように、鉛直速度は、CAPE、すなわち浮力の鉛直積分で第一近似として推定できます。

これらの知見に基づき、次のステップとして、異なる気温減率を持つ環境場において、相対湿度や鉛直シアーを変えた場合に、スコールラインの構造や強度はどのように変わるのか、そしてそのメカニズムは何か、という問題に取り組むことにしました。実は、この問題を NCAR 滞在中に研究したいと思っていたのですが、当時は乱流モデルに係る別の問題に遭遇し先送りになっていたのです。30代半ばに至り、知識や経験もある程度積み上がり、本来やりたいと思っていたことに自分なりに取り組むことができるようになったのです。

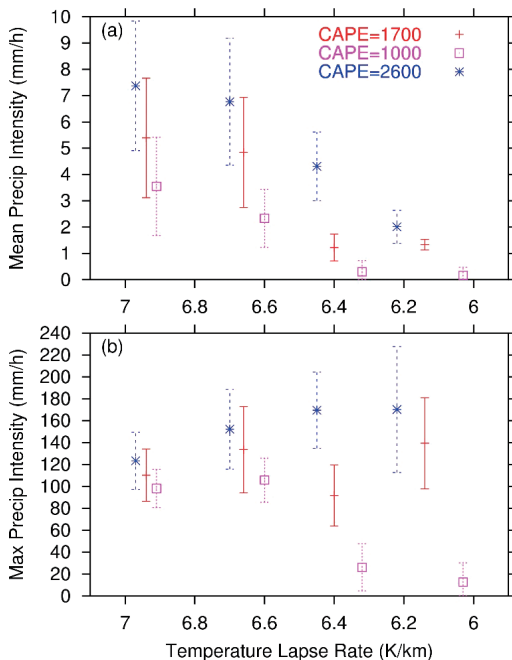
気温減率を中緯度大陸型の大きな値と熱帯海洋型の小さな値の 2 通りに設定し、それぞれの気温減率のもとで相対湿度や鉛直シアーを様々に変化させ、WRF を用いてスコールラインの数値実験を行いました (Takemi 2007a)。その結果、気温減率が同一であれば CAPE や可降水量の大小がスコールラインの構造や強度を決めること、一方、気温減率が異なる場合には、CAPE や可降水量が同程度だとしても、中緯度大陸上のように気温減率が大きいほどスコールライン強度は増すことが分かりました。このように、気温減率で規定される浮力プロファイルによってスコールラインにおける鉛直速度や降水強度が決まる、ということを示しましたので、スコールライン強度は対流不安定層における気温減率によって整理して理解できる、ということ提案しました。ここで対流不安定層の気温減率とは、相当温位 θ_e の最大値 ($\theta_{e \max}$) と最小値 ($\theta_{e \min}$) を取る大気層での気温減率

$$\Gamma = - \frac{T(z=z(\theta_{e \min})) - T(z=z(\theta_{e \max}))}{z(\theta_{e \min}) - z(\theta_{e \max})} \quad (4)$$

として決めました。このような研究内容を NCAR での

WRF ワークショップ (日下ほか 2007) や米国気象学会で発表したところ, Robert Fovell さんや George Bryan さんに興味を持っていただいて, 議論できたことは嬉しく思いました。

このようにして問題を整理できることが分かりましたので, 次に, 気温減率を中緯度大陸型から熱帯海洋型まで系統的に変化させ, スコールライン強度の気温減率に対する感度を調べました (Takemi 2007b, 2010). 数値実験では, 気温減率と CAPE の影響をできるだけ独立に評価するために, 下層の水蒸気量と対流圏での気温減率との双方を変化させて CAPE が同程度の値となるように工夫しました. 第 1 図には, 数値実験で得られたスコールラインの降水量を対流不安定層の気温減率 (式 (4) で定義) により整理したものを示します. 第 1 図 a は, 領域平均した降水強度 (エラーバーは変動幅) の気温減率に対する依存性を示しています. 同じ CAPE の場合で見ると, 気温減率が大きいほど降水強度が増加することが分かります。



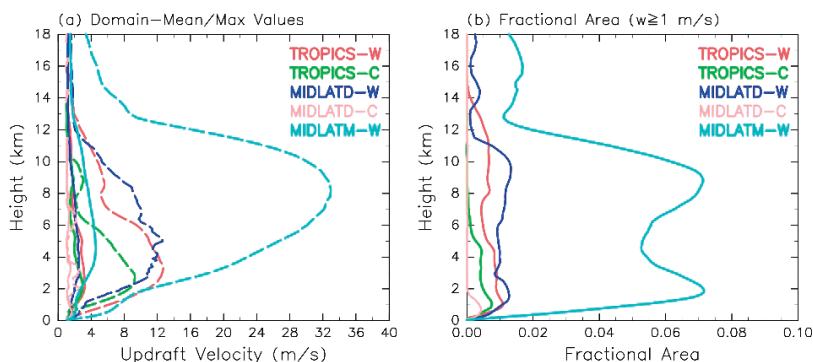
第 1 図 対流不安定層における気温減率とスコールラインにおける (a) 領域平均降水強度, および (b) 領域最大降水強度の関係. CAPE が 1700 J kg^{-1} (赤), 1000 J kg^{-1} (ピンク), 2600 J kg^{-1} (青) の場合について, 平均値を記号で, 標準偏差をエラーバーで示す. Takemi (2010) による. ©2010 Elsevier. Used with permission.

すなわち CAPE が同じであっても, 気温減率が異なると浮力プロファイルが変化して上昇流の強さを変えるため, 降水強度も変わります. 一方, 同程度の気温減率の場合, CAPE が大きいほど降水強度は大きくなります. したがって, CAPE が大きいほど降水強度が大きくなるという関係は, 気温減率が同じような条件でのみ成り立つのです。

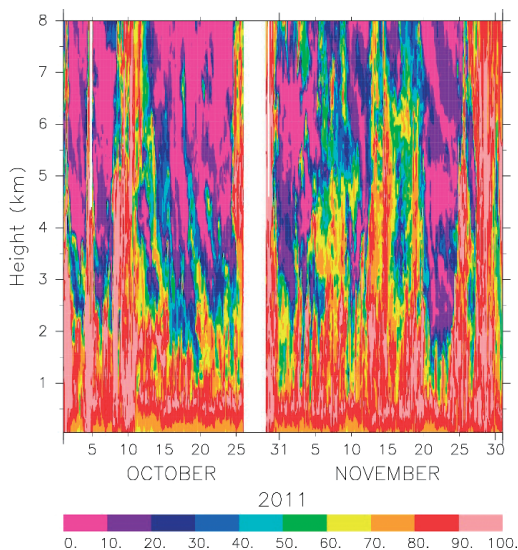
一方, 第 1 図 b は, スコールライン内での最大降水強度の気温減率に対する依存性を示します. この図から分かるのは, 平均降水強度とは異なり, 最大降水強度の気温減率に対する依存性は CAPE の大きさによって変わる, ということです. 最大降水強度というのは, 瞬間的かつ局所的な量であるため, スコールライン強度の全般的な傾向を示す指標としては適さないと言えます. しかし, 極端降水現象の環境場に対する依存性という点では, 第 1 図 b で示される関係は大変興味深いです. そして, ここで得た知見から, 地球温暖化に伴い大気安定度が変化した場合に降水特性はどのように変化するのか, という問題意識に繋がりました。

以上の一連の研究を発展させ, Takemi (2014a) では, 熱帯海洋型と中緯度大陸型の気温・湿度条件を仮定したスコールラインの数値実験を行いました. この数値実験で着目した点は, 地上空気塊が持つ CAPE が同じであっても, 境界層内の異なる高度に位置する空気塊が持つ CAPE は環境場の条件に依存して異なる, ということです. 初期に境界層内各高度に位置する空気塊を持ち上げて求めた CAPE は, 当然ながら初期の高度毎に変わります. この CAPE の鉛直分布の重要性は, 私の博士論文の一部となった Takemi and Satomura (2000) で既に指摘したことであり, 地上空気塊の CAPE が同じでもスコールラインの降水量が異なるという Takemi (2010) の数値実験結果を解釈する上でも有用でした. こういった成果に基づき, 熱帯海洋型と中緯度大陸型の両者の環境場で CAPE の鉛直分布が一致するように条件設定し, 地上のみならず境界層各高度の空気塊が持つ CAPE が同じ場合に, 気温減率の違いはスコールライン強度に影響するのか, ということを調べようと考えたのです。

このような考えで様々な条件設定で数値実験を実施した結果, 熱帯条件に比べて中緯度条件では, 気温減率が大きいと浮力が大きくなり, 強い上昇流が広範囲に発生し, より広域で積乱雲が発達して降水量が多くなるというプロセスを明らかにしました (第 2 図)。



第2図 熱帯型 (TROPICS) および中緯度型 (MIDLATD および MIDLATM ; MIDLATD は中層を乾燥化した場合, MIDLATM は中層を湿潤にした場合) での数値実験で得られたスコールラインでの (a) 領域平均した上昇速度 (実線) と領域最大上昇速度 (破線), および (b) 1 m s^{-1} 以上の上昇速度を持つ領域の割合. TROPICS と MIDLATD では CAPE の鉛直分布は同じ. -W および -C は, それぞれ初期擾乱として暖気と冷気を設定した実験名を意味する. ただし, 下層 2.5 km で 5 m s^{-1} の風速差を持つ鉛直シアーの場合の結果を示す. Takemi (2014a) による. ©2014 Elsevier. Used with permission.



第3図 CINDY2011/DYNAMO の2011年10月1日0000UTCから12月1日0000UTCまでの期間の「みらい」での高層観測で得られた相対湿度 (%) の鉛直分布の時間推移. Takemi (2015) による.

一方, 熱帯型の場合では, 相対湿度が高いことがスコールラインの形成・発達に本質的に重要であることを指摘しました. さらに, 上記の CAPE の鉛直分布の違いが, 大気の成層安定度の違いを生み, スコールラインの構造や強度を変化させ, 降水量にも強く影響す

ることを示しました. また, Takemi (2014a) では, 初期擾乱に対する感度実験も実施し, 中緯度型では熱帯型に比べて冷気プール強度の環境依存性が敏感となり, 結果としてスコールラインの動態が初期値に大きく依存することを明らかにしました.

このようなスコールラインの理想化数値実験による研究を進めている間に, インド洋での野外観測実験 CINDY2011/DYNAMO が始まりました (Yoneyama *et al.* 2013). 日本では JAMSTEC が「みらい」

によるインド洋上での停船観測を実施しました. この頃の私は, 生活が子育て中心で, また年間出張日数が50日に達する仕事もあり, 1か月半にもおよぶ観測航海に私自身が参加することは叶いませんでした. その代わりに, 乗船したいという2人の学生さんが観測に参加してくれました. 学生さんが無事に帰り, 取得したデータを持ち帰ってきたので, 直ちに解析を始めました. その結果, 対流の活発・不活発期の違いや MJO の通過といった気象状況の違いを反映して, 自由対流圏の相対湿度が大きく変化していることが分かりました (第3図). このような湿度変動に伴い, 対流活動も大きく変化することが想像されます. そこで, 第3図に示した2011年10月1日0000UTC~12月1日0000UTCの2か月間に亘る期間を対象として, インド洋熱帯域をカバーする東西 4250 km ・南北 3000 km (水平格子幅は 12.5 km) の領域からダウンスケールして, 4重ネスト領域を設定し, 「みらい」観測地点を中心とする東西 100 km ・南北 60 km の領域を水平格子幅 100 m で解像した長期間の領域シミュレーションを実施しました. 100 m 格子とすることで, 対流を陽に表現することを意図したのです. シミュレーションでは, 9月30日から11月29日までの60日分について毎日0000UTCを初期時刻とする2日間の時間積分を行い, 各積分の後半1日間を解析対象としました. シミュレーションにより, 背の低い積雲により対流圏下層が湿潤化し, 次第に湿潤層を越える雲頂高度を持つ積雲が発達して

湿潤層がさらに深くなり、最終的に対流圏界面にまで達する背の高い対流雲が発達する、というプロセスを示すことができました (Takemi 2015)。特に、対流雲の中心域での上昇流が上空に貫入して、大気を湿潤化し、深い対流の発達に繋がることが明らかとなり、相対湿度の鉛直プロファイルの重要性を示しました。

以上のように、熱帯海洋性と中緯度大陸性のスコールラインの発達度の違いやその違いをもたらすメカニズム、さらに熱帯海上での対流雲の発達に相対湿度の鉛直分布が果たす役割について、数値モデル実験を中心に、観測データの解析を交えながら研究を進めました。

5. 日本におけるメソ降水系・豪雨に関する研究

以上述べてきました通り、それまでは、水平一様な基本場という理想化した条件下で大気安定度や鉛直シアを系統的に変化させた数値実験によってスコールラインの動態を解析し、また熱帯海上という水平方向には比較的一様性の高い場での積雲対流の形態を解析するなどして、現実の複雑な状況をできるだけ簡略化した枠組みで研究を進めてきました。その結果、様々な環境条件で発達するメソ降水系の基本的な動態について、少しずつではありますが、理解が進んだというような感覚が自分にはありました。そこで次の段階として、現実の状況におけるメソ降水系の挙動について調べることに注力しました。また、できるだけ多数の事例を合成して、気候学的な描像を抽出したいと考えました。

まずは、夏季において、台風や前線といった総観規模擾乱の影響が小さいと考えられる状況に注目し、午前中は晴天で、午後に降水が生じる場合の大気条件を調べました。総観規模擾乱の影響を除外することによって、対流雲自身が持つ性質としての対流発達メカニズムに焦点を当てることができるのではないかと考えた。また、こういった状況では、しばしば局地的に強い降水が発生し、災害の発生に至るケースもあったため、災害発生のポテンシャルが高い大都市の広がる平野部での事象を選びました。

最初に、関東平野での事象を対象にしました。関東平野を対象とした夏季の雷雨活動の解析については、Yonetani (1975)、田口ほか (2002)、河野ほか (2004) といった先行研究がありましたので、彼らのアプローチを参考にして研究を進めました。梅雨明け以降から8月末までの期間について、AMeDAS データを用いて降水の有無や降水量を、気象庁 MSM 解析

値を用いて大気安定度を調べました (Nomura and Takemi 2011)。大気安定度を量的に評価するため、CAPE, LFC, LNB や可降水量などの他、ショワルター指数や K 指数といった高層観測の指定面データから算出可能な指数、そして式 (4) に基づく対流圏中下層の気温減率など様々な指標を用いました。その結果、午後に降水有りの場合には、降水無しの場合と比べ、気温減率に顕著な違いはないものの、対流圏中層での相対湿度には明瞭な違いがあることが分かりました。また、午後の降水の有無を判別するには、K 指数が最も有用な指標であることも示せました。

次に、濃尾平野を対象領域として、総観規模擾乱の影響が小さい状況での局地的降水の出現特性と環境条件を調べました (Takemi 2014b)。この研究では、解析雨量データにより降水の水平分布も解析しました。その結果、正午過ぎに濃尾平野の周辺山間部で降水が散発的に発生し、その降水域が次第に平野へと移行することが分かりました。MSM 解析値を用いて大気安定度などの指標を Nomura and Takemi (2011) と同様に調べると、対流圏中層で相対湿度が高いことが降水発生に重要であることも分かりました。

このように、東京圏や名古屋圏という大都市圏が広がる関東平野と濃尾平野では、夏季静穏条件で午後に局地的降水が生じる場合、対流圏中層で相対湿度が高いという共通した条件を満たしていることが分かりました。それでは大阪圏はどうなのでしょう。大阪平野ではありませんが、京都盆地では、真夏の入道雲は、北西の丹波山地からやって来る丹波太郎、南の奈良方面からの山城次郎、北東の比叡山や比良山系から来る比叡三郎、南西からやって来る和泉三郎などと呼ばれますので、経験的には積乱雲の発生場所や時刻には何か特徴があるのではないかと考えられます。そこで、解析雨量や MSM データを用いて近畿地方の真夏の午後の降水現象の解析をしましたが、しかし結果としては、あまり明瞭な傾向は見出せませんでした (竹見・土田 2014)。大阪平野の空間的な広がりや周囲の地形、近畿地方特有の広域海風循環 (伊藤 1995) など、複合的な要因を丁寧に解きほぐして調べる必要があると考えています。ただ、紀伊山地では、降水活動に明瞭な日変化があることが分かりました。また、得られた山地での降水の日変化特性の知見は、後年、対流活動の予測可能性におよぼす地形の影響に関する研究に活かされました (Wu and Takemi 2021, 2023)。

このように真夏の午後の降水に注目して、東京・名

古屋・大阪の都市圏が広がる平野部を対象に研究を進めました。その結果、真夏の午後の降水活動は地域的な特性を持つことが示唆されました。日本の平野部は都市が広がる人口密集地域ですので、災害発生のポテンシャルは高いといえます。こういった都市圏では、一方で気象観測も充実しているので、豊富な観測データを活用した研究が可能だと思います。今後も、都市圏での局地的降水現象について調べていきたいと思っています。

日本には、気象庁をはじめ関係機関によって構築された充実した気象観測網によって、時間・空間に密で良質なデータが蓄積されています。このようなデータはメソ降水系の事例解析のみならず統計的な研究にも有用なため、そういったデータを使ってメソ降水系の気候学に関する研究を展開したいと思っていました。そこに、鶴沼 昂さんが博士課程から私の研究室に所属することになりました。鶴沼さんは四国で発生する停滞性線状降水系の解析をしていましたので（鶴沼・村田 2012）、それを全国展開して日本における停滞性降水系の気候学的特徴を調べることにしました。

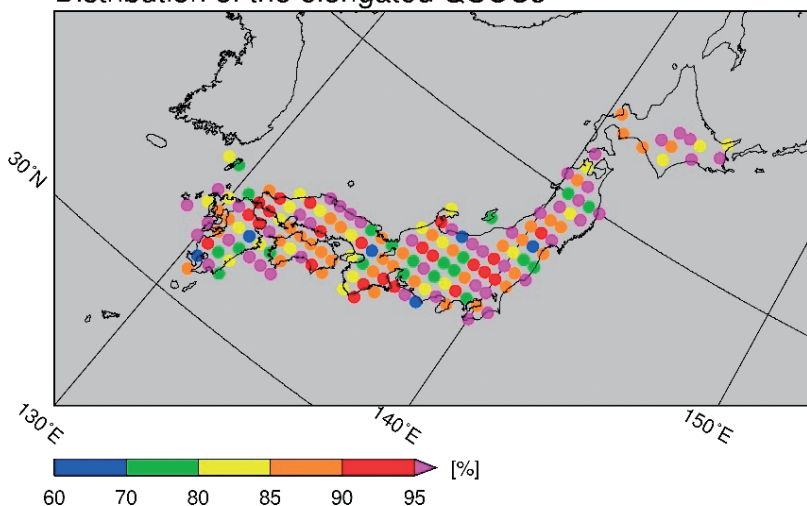
Unuma and Takemi (2016a) は、気象庁の全国合成レーダーデータおよび高層気象観測の長期間データを用い、停滞性のメソ降水系（準停滞性対流クラスター QSCC と名付けました）の出現特性と出現時の環境条件を調べました。清水慎吾さんと上田 博先生が開発された対流セルの自動抽出アルゴリズム（Shi-

mizu and Uyeda 2012）をメソ対流系の抽出に適したものに變更し、自動的に QSCC を抽出するアルゴリズムを開発しました。これによって、QSCC 発生頻度の全国分布を示すことができました。また、高層気象観測データを用いた解析から、QSCC 発生時の環境条件は、対流圏中層の相対湿度が高く、可降水量が豊富という特徴を持つことが明らかになりました。さらに、QSCC の形状は全国の多くの地域でその80%以上が線状であること（第4図）など、QSCC の形状特性や卓越走向の全国分布も明らかになりました（Unuma and Takemi 2016b）。これらの研究は、気象レーダー網による常時かつ広域の観測データや定時の高層気象データといった現業観測データを活用しており、こういった現業観測データがメソ降水系の統計的性状を調べる上で極めて有効であることを示したといえます。特別観測はもちろん大事ですが、こういった常時観測のデータを積極的に活用することも大切だと思います。

このような気候学的な研究を進める間、顕著な豪雨災害が毎年のように発生し、何か具体的な事例解析にも注力しなければならない、と思いました。京都大学に着任して2年目の2008年、7月28日に神戸市で局地的な豪雨が発生し、都賀川の急な増水で犠牲者が出るという災害が発生しました。災害発生のプロセスを把握するには、まず局地的に急発達する豪雨の発生メカニズムを理解する必要があると思いました。このような局地豪雨の発生には、そのトリガーも地形の小規模

の起伏のような局地的な空間規模を持つと考えられます。そのため、局地豪雨を数値モデルで再現するには複雑な地形を精緻に高解像度で表現する必要があると考えられます。そこで、国土地理院50mメッシュ数値標高データを WRF モデルに取り込み、水平格子幅100mの高解像度数値シミュレーションを行いました。同じ水平格子幅のシミュレーションであっても、高解像度標高データで精緻に地形を表現した場合のほうが、低解像度の標高データで表現された滑らか

Distribution of the elongated QSCCs



第4図 停滞性降水系（QSCC）で線状の形状を持つ割合（％）の分布. Unuma and Takemi (2016b) による。

な地形の場合に比べ、降水の極値がよく表現できることが分かりました（竹見 2009）。しかし、この時にはどういう着眼点で研究をまとめるのかという方針をあまり明確にすることができず、それ以上深く追求しなかったのは、今思うと心残りです。

ただ、数値モデルを高解像度にすることで地形が精緻に表現でき、降水の極値もより定量的に評価できるのではないか、という思いは持ち続けていました。そこに、2017年7月に九州北部で集中豪雨による大規模な災害（平成29年7月九州北部豪雨）が発生しました。この事例では、積乱雲が次々と発生するバックビルディングにより線状のメソ降水系が発達し、いわゆる線状降水帯が発生しました。線状降水帯はその再現自体が難しく、予測精度もまだまだ発展途上です。被害が顕著であったことから、科学研究費・特別研究促進費の研究課題が立ち上がり、私は気象グループのメンバーとして参画することになりました。この研究課題では、川村隆一先生にお世話になりました。まず線状降水帯を定量的に再現することを目指し、水平格子幅167mという高解像度数値シミュレーションを行いました。その結果、積乱雲群がバックビルディングにより線状のメソ降水系に組織化する過程を再現することに成功し、線状降水帯を定量的にも再現することができました。また、そのメソ降水系の発達には、地形の微細性によって特定の場所に収束した下層の気流が、対流活動の局在化と維持に寄与したことも明らかにしました（Takemi 2018）。

これ以降、顕著な風水害が発生した場合に立ち上がった科学研究費・特別研究促進費の研究課題に積極的に参画し、風水害の発生メカニズムを理解するための研究を進めました。平成30年7月豪雨の事例では、停滞性降水系の気候学的平均値（Unuma and Takemi 2016a）に比べて、可降水量と対流圏中層の相対湿度が顕著に大きいことを示しました（Takemi and Unuma 2019；竹見 2022）。

令和元年東日本台風に伴う豪雨事例の解析（Takemi and Unuma 2020）では、高温な状況のため可降水量が極めて大きく、対流圏中層が飽和に近い状況で、湿潤絶対不安定層（MAUL）（Bryan *et al.* 2000；竹見 2023）が台風のレインバンド周辺に形成されていたことを示しました。また、MAULが積乱雲の急発達を促進して豪雨となったプロセスを明らかにしました。さらに、平成29年7月九州北部豪雨と平成30年7月豪雨に共通して、豪雨発生地域では総降水量

の大半が時間雨量の大きな強い降水で説明できることや、豪雨発生の環境条件として大きな可降水量と対流圏中層での高い相対湿度が重要であることを明らかにしました（Unuma and Takemi 2021）。

MAULに着目して豪雨発生時の環境条件について調べた結果、九州北部地方で最近発生した4つの豪雨事例で、MAULは豪雨発生に先行して存在し、その空間的な存在範囲が雨量に関係していることを見出しています（Naka and Takemi 2023）。今後は、統計的解析によって、MAULが豪雨発生に果たす役割をさらに深く追求したいと思います。

6. 地球温暖化影響に関する研究

前節までに述べてきたメソ降水系発生時の環境条件に関する研究は、地球温暖化に伴うメソ降水系の将来変化予測の研究へも展開していきました。私が京都大学に着任してすぐの2007年度より、文部科学省気候変動研究プロジェクトである「21世紀気候変動予測革新プログラム」が始まり、京都大学防災研究所は影響評価グループの中核的な研究機関として参画することになり、私も地球温暖化が豪雨や台風におよぼす影響を評価する研究に着手しました。中北英一先生が影響評価グループ全体の代表者としてご尽力くださり、その後の「気候変動リスク情報創生プログラム」（2012-2016年度）、「統合的気候モデル高度化研究プログラム」（2017-2021年度）へと繋がっていきます。現在は、2022年度から始まった「気候変動予測先端研究プログラム」において、森 信人先生が影響評価グループの代表者となり、京都大学防災研究所が引き続き中核的機関として影響評価研究を牽引しています。私は、こういった一連のプロジェクトにおいて、気象ハザード影響評価グループをリードする立場で、気象学と他分野との共同研究も意識しながら研究に取り組んできました。

前節で、盛夏期における午後の降水発達時の大気環境条件に関する研究を紹介しました。こういった真夏の雷雨は、メソβスケール以下の局地的な空間規模を持つため、空間解像度の粗い気候モデルで再現するのは困難です。しかし、Nomura and Takemi (2011)で行ったように、CAPE・可降水量・K指数などの大気安定度の指標を用いて雷雨の発生ポテンシャルを評価することはできるだろうと考えました。ちょうどこの頃、気象研究所が開発した全球大気の気候モデルMRI-AGCM（Mizuta *et al.* 2006）は、全球20km解像

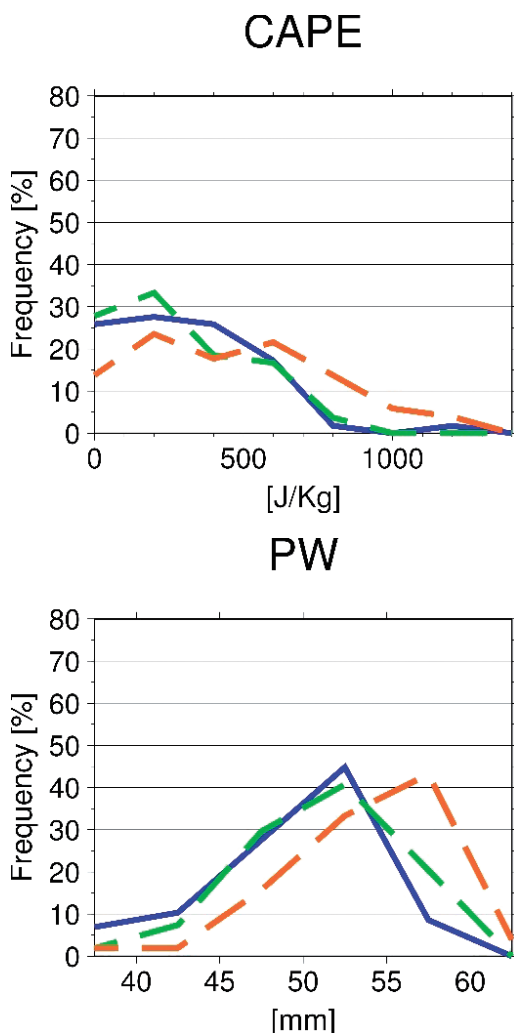
度のMRI-AGCM3.2Sとして世界で最も高解像度の気候予測計算が実施されていました (Mizuta *et al.* 2012). 20km 解像度はNomura and Takemi (2011) やTakemi (2014b) で用いたMSMデータの解像度よりは粗いものの、それでも雷雨発生ポテンシャルの評価は可能だろうと考えました。実際に、関東地方での盛夏期の雷雨発生時のMRI-AGCM3.2S出力データは、館野の高層気象観測データとの比較で、MSM

データと遜色ないパフォーマンスを示しました。こうした確認の後、夏季の午後に関東地方で発生する局地的な強雨の将来変化を評価しました。その結果、温暖化に伴う水蒸気量の増加がCAPEと可降水量の双方を増大させるため、局地的な強雨の発生ポテンシャルも増大することを示しました (第5図) (Takemi *et al.* 2012; Takemi 2012)。

また、全球気候モデルの現在および将来の気候シミュレーション結果から、現在と将来との差分(温暖化差分)を過去の気象場に加えて温暖化気候での環境条件を擬似的に作成する手法(擬似温暖化実験)を用い、温暖化が極端現象におよぼす影響を評価する研究も進めました (Takemi *et al.* 2016a; Mori and Takemi 2016)。この擬似温暖化実験研究では、温暖化差分を過去の気象場に加算し、その場を初期値・境界値として領域気象モデルによる力学的ダウンスケーリングを実施します。このような手法により、温暖化条件であっても、メソ降水系の挙動といった対流スケールの運動を解像できるくらいの格子幅を設定することができるのです。こうした手法により、過去の特定の極端現象が、温暖化した将来気候場で仮に発生した場合にはどのように変容するのか、またそれに伴うハザードや災害影響はどのように変化するのか、といったシナリオを提示することが可能となります。

この擬似温暖化実験手法を、伊勢湾台風 (Takemi *et al.* 2016b) など、甚大な風水害をもたらした過去の台風に適用して、温暖化による風水害への影響を研究しました (Mori *et al.* 2021)。特に、2011年台風12号は、紀伊半島に総雨量2000mmを超える豪雨をもたらして広域で激甚な水災害・土砂災害を発生させましたので、温暖化が進行した将来気候ではその影響は想定をさらに上回るものになると懸念されます。将来起こり得る災害を未然に防ぐためにも、最悪のシナリオを提示することが大切です。このような考えのもと、全球平均気温が4度上昇するという温暖化シナリオを想定して、2011年台風12号に伴う集中豪雨事例を対象に擬似温暖化実験を行いました (Takemi 2019)。その結果、温暖化時には極端な降水がより強化し、その強化傾向は、昇温に伴う水蒸気量増大という降水強化の促進効果が気温減率の減少に伴う成層安定化という抑制効果を上回るためであることが示されました。

さらに、近年の豪雨災害として2016年夏季に北日本に接近・上陸した複数の台風を対象に降水特性を調べ、北日本では台風中心付近から比較的狭い範囲で降



第5図 MRI-AGCM3.2Sの気候実験データを用いて解析した夏季・総観規模擾乱の影響のない条件下での降水日のCAPE (Jkg^{-1}) (上) および可降水量 (mm) (下) の現在気候 (青)・近未来気候 (緑)・21世紀末気候 (橙)での頻度分布。Takemi *et al.* (2012) による。

水が生じることや、台風中心が北緯38度を越えて北上すると北日本で降水量が増大することを明らかにしました (Nayak and Takemi 2020a). 一方、擬似温暖化実験により、北日本では、温暖化時には台風に伴う強風は弱化する (Ito *et al.* 2016) もの、降水量は増大することも示しました (Nayak and Takemi 2019, 2020b). さらに、台風に伴う豪雨が森林におよぼす影響など、極端な豪雨の影響評価研究も進めています (Morimoto *et al.* 2021).

地球温暖化対策を立案するには、激甚化が予想される極端気象のハザードをできるだけ定量的に評価することが必要です。この評価には、気象・気候という理学分野、土木・建築などの工学分野、農業・林業・水産業といった農学分野、防災行動・計画などの社会科学分野、健康・感染症などの医療分野など、様々な分野の研究者が一堂に会し、議論を進めながら、具体的に連携・協働することが大切だと思っています。これからの、メソ降水系研究において、気候変動影響評価も重要なテーマと捉え、研究を進めていきたいと考えています。

7. 今後に向けて

ここまで、2023年度気象学会賞受賞の理由となった業績を中心に、関連研究について述べてまいりました。最後に、このテーマでの今後の研究の方向性について述べたいと思います。

まず、メソ気象学の基礎的な側面として、メソ降水系研究をより深化させたいと考えています。すなわち、湿潤対流のメソスケールへの自己組織化の物理過程やそのメカニズムの理解、メソ降水系の予測可能性の理解、豪雨をもたらす降水系と豪雨の範疇には入らない通常の雨をもたらす降水系との類似性・相違性、メソ降水系におよぼす地球温暖化の影響という点を大きな課題として、今後も研究を進めたいと思います。

湿潤対流の自己組織化の問題については、大学院生だった柳瀬友朗さんが、放射対流平衡を仮定した場において対流の自己集団化に関する大規模数値実験を行い、対流の集団化に特有の空間スケールが存在することを明らかにするとともに、自己集団化の物理機構を調べるなど、先駆的な研究業績を挙げています (Yanase *et al.* 2020, 2022). 一方、鉛直シアアがある場合には、放射対流平衡場での対流のメソスケールへの組織化はスコールライン型の形状となったり、その走向もシアアの向きによって変わったりするなど、多

様性が増します。この研究課題に興味を持つきっかけとなった論文は、NCAR滞在中に Rotunno 博士から紹介していただいた Robe and Emanuel (2001) です。今後は、鉛直シアアが対流の組織構造におよぼす影響も考慮して、メソ降水系の組織化の理解を深化させたいと思います。

メソ降水系の予測可能性については、先に述べました通り、地形が対流の発達に何らかの規則性を生み出すため、予測可能性を向上させると期待できます。博士課程大学院生だった呉 品類さんは、地形が存在する場合における対流発達時の誤差成長の問題に取り組みました (Wu and Takemi 2021, 2023). 今後は、地形に起因する局地循環と大気安定度変化により予測可能性がどのように向上するのか／しないのか、どういった場合に予測可能性の向上が見込まれるのか、といった現実の複雑地形が対流の時空間スケールにおよぼす影響の評価にも取り組むべきだと思います。

国内の豪雨事例について、豪雨をもたらした降水系の発生環境条件の解析を進めています (Naka and Takemi 2023, 2025). 日本の暖候期の降水発生時には、しばしば相対湿度が対流圏下層のみならず中層に至るまで90%を超えて極めて高くなります。このように対流圏の中下層で相対湿度が90%以上になることは、北米大陸のような半乾燥気候帯では特異なのかもしれませんが、一方で日本のような湿潤気候帯では稀ではありません。だからこそ、MAULのような絶対不安定な状況が湿潤気候帯で頻繁に出現すると考えられます。このような考えに基づき、MAULが豪雨に果たす役割を雨量の違いや他の大気安定度指数などと関連づけて理解を深めるとともに、湿潤気候帯での豪雨発生メカニズムの理解をより深化させたいと思います。

気候変動の影響評価という観点で、夏季東アジアの極端降水について d4PDF を用いた解析を進めています (He and Takemi 2024). 最近、d4PDF を領域モデルによってダウンスケーリングすることにより、日本域で水平格子解像度 5 km の領域アンサンブル気候予測データが作成されました (Kawase *et al.* 2023). このデータを用いて、線状降水帯の将来変化予測に関する研究が実施されています。このデータは、今後ますます様々な学術分野において活用されていくと思います。特に、気象防災上でも大事な予測データであり、メソ降水系に係わる諸現象の将来変化予測研究への活用も期待しています。

こういった基礎的な理解を深化させる研究を進める

とともに、応用気象学の分野にも貢献したいと考えています。特に、気象防災、気候変動適応、大気環境影響評価といった分野において、メソ降水系を含めたメソスケール気象学・微細気象学の知見を活かしていきたいと思っています。

8. おわりに

ここで述べたメソ降水系の動態に係る内容については、Takemi (2023) でより多角的に論述していますので、興味のある方はご覧ください。これは、長年の友人である Seon Ki Park 教授が編集された教科書の1つの章として執筆しました。特に、日本の暖候期のような湿潤な環境場でのメソ降水系の振る舞いについて論じていますので、読者の皆様の理解を深めることができれば嬉しく思います。

大学で気象学の勉強を始めてから、多くの方にお世話になりました。ここでは個別のことには触れませんが、特に若い皆様の参考になるかもしれないことについて記したいと思います。

大学院生の頃は、学生同士で自主ゼミをよくしていました。英語の教科書を読むことが多かったのですが、博士課程のある時、同じメソ気象の分野で研究をしていた重 尚一さん、大澤輝夫さんと意気投合して、それぞれが読みたい論文の中身をちゃんと理解しようという趣旨で、論文精読ゼミを3人で始めました。私は初めに Rotunno *et al.* (1988) を説明したと記憶しています。3人で議論すると、自分が分かっているところやすぐにばれて、理解が深まったのを覚えています。3人も寄れば、それぞれの興味に応じて様々なトピックの論文を読むことができて、議論することで理解も深まり、とっても良い経験となりました。仲間同士で切磋琢磨することは大切なことだと思います。

留学する機会があったのは幸運なことでした。Rich Rotunno さんとの議論はとっても楽しく、勉強になりました。実験データを眺めながらよく議論しましたが、Rotunno さんはモデル結果を丁寧に丹念に観察しておられて、その姿に感動しました。野外観測でもモデル結果でも、ちゃんと現象をよく見て観察することが大切なのだと心に刻みました。

大学院生時代、そして京大の教員になってからも、里村雄彦先生には身近なところで大変お世話になりました。博士課程のある時期、どういうふうに研究を進めていけばよいのか、何を面白いと主張すべきなのか

といった迷いがあった時に、里村先生に「そんなの自分で楽しいと思うことやっていいですよ」と仰ってくださったのは目から鱗でした。あるひとりで物事が動き出すことはあるものですね。最後に共著 (Arnold *et al.* 2012) で一緒にできたのは喜びです。

本稿では、卒業研究からメソ降水系に係る研究を紹介しました。光田 寧先生は、卒業研究の頃から、ときに厳しくときに穏やかにご指導してくださいました。ご退官後も、時々お伺いして議論させていただいたことが懐かしく思い出されます。博士論文の公聴会が終わったタイミング (1999年2月頃) に、入院されていた病院にお見舞いに伺いました。その際、おそらく相当お辛い状況であったにもかかわらず、激励のお言葉をいただきました。今回の受賞で、そのお言葉によりやく応えることができたように思います。

このたびは、気象学会賞記念講演の記事を執筆する機会を頂戴して、ありがたく思っています。読者の皆様には、本稿を読んでいただいで少しでも前向きな何かを感じ取っていただければ嬉しく思います。

謝 辞

このたびの受賞対象となった研究成果は、日本学術振興会科学研究費、文部省在外研究、文部科学省の一連の気候変動研究プログラム (「21世紀気候変動予測革新プログラム」, 「気候変動リスク情報創生プログラム」, 「統合的気候モデル高度化研究プログラム」, 「気候変動予測先端研究プログラム」), 環境再生保全機構・環境研究総合推進費といった支援を受けて実施したものに基きます。

最後に、いつも一緒にいる家族に感謝します。

略語一覧

ADEC : Aeolian Dust Experiment on Climate impact 風送ダストの気候インパクトに関する観測

AMeDAS : Automated Meteorological Data Acquisition System 地域気象観測システム

CAPE : Convective Available Potential Energy 対流有効位置エネルギー

CINDY2011 : Cooperative Indian Ocean Experiment on Intraseasonal Variability in the Year 2011

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

DYNAMO : Dynamics of MJO

HEIFE : HEIhe river Field Experiment 黒河流域におけ

る地空相互作用に関する日中共同研究

JAMSTEC: Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology 海洋研究開発機構

LES: Large-Eddy Simulation ラージ・エディ・シミュレーション

LFC: Level of Free Convection 自由対流高度

LNB: Level of Neutral Buoyancy 浮力が中立になる高度

MAUL: Moist Absolutely Unstable Layer 湿潤絶対不安定層

MJO: Madden-Julian Oscillation マッデン・ジュリアン振動

MM5: The Fifth-generation Penn State/NCAR Meso-scale Model ペンシルバニア州立大学・国立大気研究センター第5世代メソスケールモデル

MRI-AGCM: Meteorological Research Institute-Atmospheric General Circulation Model 気象研究所全球大気循環モデル

MSM: MesoScale Model 気象庁メソモデル

NCAR: National Center for Atmospheric Research 米国大気研究センター

QSCC: Quasi-stationary convective cluster 準停滞性対流クラスター

WRF: Weather Research and Forecasting model 気象研究・予報モデル

参考文献

- Arnold, D., D. Morton, I. Schicker, P. Seibert, M. W. Rotach, K. Horvath, J. Dudhia, T. Satomura, M. Müller, G. Zängl, T. Takemi, S. Serafin, J. Schmidli and S. Schneider, 2012: High Resolution Modelling in Complex Terrain. Report on the HiRCoT 2012 Workshop, Vienna, 21-23 February 2012. BOKU-Met Rep., 21, 42pp.
- Brown, R. G. and C. Zhang, 1997: Variability of midtropospheric moisture and its effect on cloud-top height distribution during TOGA COARE. J. Atmos. Sci., 54, 2760-2774.
- Bryan, G. H. and J. M. Fritsch, 2000: Moist absolute instability: The sixth static stability state. Bull. Amer. Meteor. Soc., 81, 1207-1230.
- He, S. and T. Takemi, 2024: Future changes of extreme precipitation and related atmospheric conditions in East Asia under global warming projected in large ensemble climate prediction data. J. Climate, 37, 5171-5186.
- Igau, R. C., M. A. LeMone and D. Wei, 1999: Updraft and downdraft cores in TOGA COARE: Why so many buoyant downdraft cores? J. Atmos. Sci., 56, 2232-2245.
- 伊藤久徳, 1995: 近畿地方の広域海風に関する数値実験. 天気, 42, 17-27.
- Ito, R., T. Takemi and O. Arakawa, 2016: A possible reduction in the severity of typhoon wind in the northern part of Japan under global warming: A case study. SOLA, 12, 100-105.
- Johnson, R. H., T. M. Rickenbach, S. A. Rutledge, P. E. Ciesielski and W. H. Schubert, 1999: Trimodal characteristics of tropical convection. J. Climate, 12, 2397-2418.
- Jorgensen, D. P. and M. A. LeMone, 1989: Vertical velocity characteristics of oceanic convection. J. Atmos. Sci., 46, 621-640.
- 河野耕平, 廣川康隆, 大野久雄, 2004: ラジオゾンデデータによる気団性雷雨日の診断—太平洋高気圧下の夏の関東地方—. 天気, 51, 17-30.
- Kawase, H., M. Nosaka, S. I. Watanabe, K. Yamamoto, T. Shimura, H. Okachi, T. Hoshino, R. Ito, S. Sugimoto, Y. Naka, Y.-H. Wu, C. Suzuki, S. Fukui, T. Takemi, Y. Ishikawa, N. Mori, E. Nakakita, T. J. Yamada, A. Murata, T. Nakaegawa and I. Takayabu, 2023: Identifying robust changes of extreme precipitation in Japan from large ensemble 5-km-grid regional experiments for 4K warming scenario. J. Geophys. Res. Atmos., 128, e2023JD038513, doi:10.1029/2023JD038513.
- 日下博幸, 竹見哲也, 原 政之, 稲田 愛, 坂本晃平, 2007: 第7回 WRF ユーザー会議 (7th WRF Users' Workshop) 報告. 天気, 54, 225-232.
- LeMone, M. A. and E. J. Zipser, 1980: Cumulonimbus vertical velocity events in GATE. Part I: diameter, intensity and mass flux. J. Atmos. Sci., 37, 2444-2457.
- Lucas, C., E. J. Zipser and M. A. LeMone, 1994: Vertical velocity in oceanic convection off tropical Australia. J. Atmos. Sci., 51, 3183-3193.
- 三上正男, 2007: 2005年度秋季大会シンポジウム「大規模観測プロジェクトは気象学に何をもたらすか」の報告 3. 風送ダストの大気中への供給量評価と気候への影響に関する日中共同研究 (ADEC). 天気, 54, 142-150.
- Mikami, M. et al., 2006: Aeolian dust experiment on climate impact: An overview of Japan-China joint project ADEC. Global Planet. Change, 52, 142-172.
- 光田 寧, 1988: 大気—地表相互作用に関する日中共同研究 (HEIFE). 天気, 35, 501-505.
- 光田 寧, 1998: 日中共同研究 HEIFE を終えて—1996年度日本気象学会藤原賞受賞記念講演—. 天気, 45, 885-893.
- Mitsuta, Y., T. Hayashi, T. Takemi, Y. Hu, J. Wang and M. Chen, 1995: Two severe local storms as observed in the arid area of northwest China. J. Meteor. Soc. Japan, 73, 1269-1284.
- Mizuta, R., K. Oouchi, H. Yoshimura, A. Noda, K. Kata-

- yama, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, H. Kawai and M. Nakagawa, 2006: 20-km-mesh global climate simulations using JMA-GSM model —mean climate states—. *J. Meteor. Soc. Japan*, **84**, 165–185.
- Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki and A. Kitoh, 2012: Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 233–258.
- Mori, N. and T. Takemi, 2016: Impact assessment of coastal hazards due to future changes of tropical cyclones in the North Pacific Ocean. *Wea. Climate Extrem.*, **11**, 53–69.
- Mori, N., T. Takemi, Y. Tachikawa, H. Tatano, T. Shimura, T. Tanaka, T. Fujimi, Y. Osakada, A. Webb and E. Nakakita, 2021: Recent nationwide climate change impact assessments of natural hazards in Japan and East Asia. *Wea. Climate Extrem.*, **32**, 100309, doi:10.1016/j.wace.2021.100309.
- Morimoto, J., M. Aiba, F. Furukawa, Y. Mishima, N. Yoshimura, S. Nayak, T. Takemi, C. Haga, T. Matsui and F. Nakamura, 2021: Risk assessment of forest disturbance by typhoons with heavy precipitation in northern Japan. *For. Ecol. Manag.*, **479**, 118521.
- Naka, N. and T. Takemi, 2023: Characteristics of the environmental conditions for the occurrence of recent extreme rainfall events in northern Kyushu, Japan. *SOLA*, **19A**, 9–16.
- Naka, N. and T. Takemi, 2025: Classifying moist unstable states for the occurrence of precipitation during the summer season in Japan. *Int. J. Climatol.*, **45**, e8890.
- Nakayama, H. and T. Takemi, 2020: Development of a data assimilation method using vibration equation for large-eddy simulations of turbulent boundary layer flows. *J. Adv. Model. Earth Sys.*, **12**, e2019MS001872, doi:10.1029/2019MS001872.
- Nakayama, H. and T. Takemi, 2024: Large-eddy simulation of plume dispersion in a turbulent boundary layer flow generated by a dynamically controlled recycling method. *Atmos. Sci. Lett.*, **25**, e1204, doi:10.1002/asl.1204.
- Nayak, S. and T. Takemi, 2019: Dynamical downscaling of Typhoon Lionrock (2016) for assessing the resulting hazards under global warming. *J. Meteor. Soc. Japan*, **97**, 69–88.
- Nayak, S. and T. Takemi, 2020a: Typhoon-induced precipitation characterization over northern Japan: a case study for typhoons in 2016. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7**, 39, doi:10.1186/s40645-020-00347-x.
- Nayak, S. and T. Takemi, 2020b: Robust responses of typhoon hazards in northern Japan to global warming climate: cases of landfalling typhoons in 2016. *Meteor. Appl.*, **27**, e1954, doi:10.1002/met.1954.
- 新野 宏, 1995: Richard Rotunno (リチャード・ロットゥンノ). *天気*, **42**, 309–312.
- Nomura, S. and T. Takemi, 2011: Environmental stability for afternoon rain events in the Kanto plain in summer. *SOLA*, **7**, 9–12.
- Ohno, H. and T. Takemi, 2010a: Mechanisms for intensification and maintenance of numerically simulated dust devils. *Atmos. Sci. Lett.*, **11**, 27–32.
- Ohno, H. and T. Takemi, 2010b: Numerical study for the effects of mean wind on the intensity and evolution of dust devils. *SOLA*, **6A**, 5–8.
- Pope, S. B., 2000: *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 802pp.
- Robe, F. R. and K. A. Emanuel, 2001: The effect of vertical wind shear on radiative-convective equilibrium states. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 1427–1445.
- Rotunno, R., J. B. Klemp and M. L. Weisman, 1988: A theory for strong, long-lived squall lines. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 463–485.
- Shimizu S and H. Uyeda, 2012: Algorithm for the identification and tracking of convective cells based on constant and adaptive threshold methods using a new cell-merging and -splitting scheme. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 869–899.
- 田口晶彦, 奥山和彦, 小倉義光, 2002: SAFIRで観測した夏の関東地方における雷雨と大気環境 II : 安定度指数による雷雨の予測. *天気*, **49**, 649–659.
- Takemi, T., 1999a: Structure and evolution of a severe squall line over the arid region in northwest China. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 1301–1309.
- Takemi, T., 1999b: Evaporation of rain falling below a cloud base through a deep atmospheric boundary layer over an arid region. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 387–397.
- Takemi, T., 2005: Explicit simulations of convective-scale transport of mineral dust in severe convective weather. *J. Meteor. Soc. Japan*, **83A**, 187–203.
- Takemi, T., 2006: Impacts of moisture profile on the evolution and organization of midlatitude squall lines under various shear conditions. *Atmos. Res.*, **82**, 37–54.
- Takemi, T., 2007a: A sensitivity of squall-line intensity to environmental static stability under various shear and moisture conditions. *Atmos. Res.*, **84**, 374–389.
- Takemi, T., 2007b: Environmental stability control of the intensity of squall lines under low-level shear conditions. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24110, doi:10.1029/2007JD008793.

- 竹見哲也, 2009: 2008年7月28日に近畿・北陸地方で発生した局所的豪雨の高解像度気象シミュレーション. 京都大学防災研究所年報, **52B**, 421-429.
- Takemi, T., 2010: Dependence of the precipitation intensity in mesoscale convective systems to temperature lapse rate. *Atmos. Res.*, **96**, 273-285.
- 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., 2014a: Convection and precipitation under various stability and shear conditions: Squall lines in tropical versus midlatitude environment. *Atmos. Res.*, **142**, 111-123.
- Takemi, T., 2014b: Characteristics of summertime afternoon rainfall and its environmental conditions in and around the Nobi Plain. *SOLA*, **10**, 158-162.
- 竹見哲也, 2014: 2. 都市のモデル化と都市大気乱流の数値シミュレーション. *天気*, **61**, 343-349.
- Takemi, T., 2015: Relationship between cumulus activity and environmental moisture during the CINDY2011/DYNAMO field experiment as revealed from convection-resolving simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93A**, 41-58.
- Takemi, T., 2018: Importance of terrain representation in simulating a stationary convective system for the July 2017 northern Kyushu heavy rainfall case. *SOLA*, **14**, 153-158.
- Takemi, T., 2019: Impacts of global warming on extreme rainfall of a slow-moving typhoon: A case study for Typhoon Talas (2011). *SOLA*, **15**, 125-131.
- 竹見哲也, 2022: 第2章 平成30年7月豪雨発生時の熱力学的環境場の特徴. *気象研究ノート*, (246), 21-29.
- Takemi, T., 2023: Analysis and Predictability of Mesoscale Precipitating Systems in Moist Environments. *Numerical Weather Prediction: East Asian Perspectives*, (S. K. Park, ed.), Springer Atmospheric Sciences, Springer, 331-364.
- 竹見哲也, 2023: 湿潤絶対不安定層 (MAUL). *天気*, **70**, 553-555.
- 竹見哲也, 中山浩成, 2009: 微細規模大気流れの気象モデルとCFDモデルの融合解析. *ながれ: 日本流体力学会誌*, **28**, 13-20.
- Takemi, T. and R. Rotunno, 2003: The effects of subgrid model mixing and numerical filtering in simulations of mesoscale cloud systems. *Mon. Wea. Rev.*, **131**, 2085-2101.
- Takemi, T. and T. Satomura, 2000: Numerical experiments on the mechanisms for the development and maintenance of long-lived squall lines in dry environments. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 1718-1740.
- 竹見哲也, 土田真也, 2014: 近畿地方における夏季の降水現象に関する統計解析. 京都大学防災研究所年報, **57B**, 216-238.
- Takemi, T. and T. Unuma, 2019: Diagnosing environmental properties of the July 2018 Heavy Rainfall event in Japan. *SOLA*, **15A**, 60-65.
- Takemi, T. and T. Unuma, 2020: Environmental factors for the development of heavy rainfall in the eastern part of Japan during Typhoon Hagibis (2019). *SOLA*, **16**, 30-36.
- Takemi, T., O. Hirayama and C. Liu, 2004: Factors responsible for the vertical development of tropical oceanic cumulus convection. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L11109, doi:10.1029/2004GL020225.
- 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.
- Takemi, T., Y. Okada, R. Ito, H. Ishikawa and E. Nakakita, 2016a: Assessing the impacts of global warming on meteorological hazards and risks in Japan: Philosophy and achievements of the SOUSEI program. *Hydrol. Res. Lett.*, **10**, 119-125.
- Takemi, T., R. Ito and O. Arakawa, 2016b: Robustness and uncertainty of projected changes in the impacts of Typhoon Vera (1959) under global warming. *Hydrol. Res. Lett.*, **10**, 88-94.
- Takemi, T., T. Yoshida, S. Yamasaki and K. Hase, 2019: Quantitative estimation of strong winds in an urban district during Typhoon Jebi (2018) by merging mesoscale meteorological and large-eddy simulations. *SOLA*, **15**, 22-27.
- 鵜沼 昂, 村田文絵, 2012: 四国における停滞性の線状降水帯の統計的抽出. *天気*, **59**, 119-125.
- Unuma, T. and T. Takemi, 2016a: Characteristics and environmental conditions of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan. *Quart. J. Royal Meteor. Soc.*, **142**, 1232-1249.
- Unuma, T. and T. Takemi, 2016b: A role of environmental shear on the organization mode of quasi-stationary convective clusters during the warm season in Japan. *SOLA*, **12**, 111-115.
- Unuma, T. and T. Takemi, 2021: Rainfall characteristics and their environmental conditions during the heavy

- rainfall events over Japan in July of 2017 and 2018. *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 165–180.
- Weisman, M. L. and R. Rotunno, 2004: “A theory for strong long-lived squall lines” revisited. *J. Atmos. Sci.*, **61**, 361–382.
- Wu, P.-Y. and T. Takemi, 2021: The impact of topography on the initial error growth associated with moist convection. *SOLA*, **17**, 134–139.
- Wu, P.-Y. and T. Takemi, 2023: Impacts of mountain topography and background flow conditions on the predictability of thermally induced thunderstorms and the associated error growth. *J. Atmos. Sci.*, **80**, 1177–1199.
- Yanase, T., S. Nishizawa, H. Miura, T. Takemi and H. Tomita, 2020: New critical length for the onset of self-aggregation of moist convection. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL088763, doi:10.1029/2020GL088763.
- Yanase, T., S. Nishizawa, H. Miura, T. Takemi and H. Tomita, 2022: Low-level circulation and its coupling with free-tropospheric variability as a mechanism of spontaneous aggregation of moist convection. *J. Atmos. Sci.*, **79**, 3429–3451.
- Yonetani, T., 1975: Characteristics of atmospheric vertical structure on days with thunderstorms in the northern Kanto Plain. *J. Meteor. Soc. Japan*, **53**, 139–148.
- Yoneyama, K., 2003: Moisture variability over the tropical western Pacific Ocean. *J. Meteor. Soc. Japan*, **81**, 317–337.
- Yoneyama, K., C. Zhang and C. N. Long, 2013: Tracking pulses of the Madden-Julian oscillation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **94**, 1871–1891.
- Zipser, R. J. and M. A. LeMone, 1980: Cumulonimbus vertical velocity events in GATE. Part II: synthesis and model core structure. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2458–2469.

Understanding Dynamics and Mechanisms of Mesoscale Precipitating Systems under Various Environmental Conditions

Tetsuya TAKEMI*

* *Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011.*
E-mail: takemi@storm.dpri.kyoto-u.ac.jp

(Received 2 July 2024 ; Accepted 30 May 2025)
