

第55回メソ気象研究会／東京大学大気海洋研究所共同利用

研究集会「小倉義光先生追悼シンポジウム

ーメソ気象研究の将来展望ー」の報告

コンビーナー：新野 宏^{*1}・坪木和久^{*2}・加藤輝之^{*3}

1. はじめに

本シンポジウムは、小倉義光先生が発起人となって1991年に発足したメソ気象研究会と東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会との共催で、2023年5月15日に東京大学大気海洋研究所の講堂における対面およびオンライン配信を併用して行ったものである。会場には約40名（第1図）、オンラインでは約460名の方に参加していただいた。

東京大学海洋研究所長を務められた後、渡米してイリノイ大学に大気科学科を創設され、2022年5月29日に100歳で逝去された小倉先生は、大気の数値モデル創生期の1960年代初頭に、積乱雲が再現可能な数値モデルの基礎を構築された。現在ではそのような数値モデルを用いることが、メソ気象を支配するメソスケール対流システム研究の主要な基盤的手法の1つとなっている。本シンポジウムでは、冒頭に2000年気象大学校での学園祭で小倉先生が講演されたビデオ映像を上映したのち、小倉先生の偉業を振り返るとともに、先生の遺志を引き継ぐべく、今後を担う中堅クラスの研究者にメソ気象に関わる各分野（雲，エアロゾル，雷，メソ気象の数値シミュレーション，気象レーダーによる観測，データ同化やメソアンサンブルなど）とその分野での広範囲の関わりについて、過去を振り返りつつ、その将来展望について講演・議論してもらった。また、メソ気象の中で近年特に注目されている台風と線状降水帯については、航空機による直接観測や梅雨

期の集中観測といった現在取り組まれている研究の課題に対して、日本のメソ気象研究をリードしてきた研究者が捉えた現状と今後への思いを若手研究者に直接語り掛けてもらった。本稿では、それら講演の概要をお伝えする。

なお、冒頭に放映した講演ビデオ映像は小倉先生に関わるホームページ (<https://dpo.aori.u-tokyo.ac.jp/dmmg/people/niino/Ogura/index.html>, 2023.7.13閲覧) を開設し、そのページから視聴できるようになっている。また、本シンポジウムの講演内容の詳細な報告は、「月刊海洋」の特集号として後日刊行予定である。

2. 小倉義光先生のご業績

新野 宏（東京大学大気海洋研究所）

ご経歴に続き、研究論文を中心として先生のご業績を紹介した。ご経歴については「天気」の追悼文（木村・新野 2023）でも紹介したので、本報告文では割愛する。

小倉先生は現時点でリストアップできている範囲で



第1図 対面での研究会参加者

^{*1} Hiroshi NIINO, 東京大学大気海洋研究所.

^{*2} Kazuhisa TSUBOKI, 名古屋大学宇宙地球環境研究所／横浜国立大学台風科学技術研究センター.

^{*3} (連絡責任著者) Teruyuki KATO, 気象研究所台風・災害気象研究部.

tkato@mri-jma.go.jp

© 2023 日本気象学会

93編（うち69編は主著）の論文を著されている。主観的にジャンル分けすると、多い方から、乱流、日本付近の天気現象、レーリー・ベナール対流、積雲と大規模場の相互作用、大気中の対流（積雲）、スコールラインなどとなっている。講演時間が限られていたため、講演者の主観にもとづき、乱流では Ogura (1952, 1963a)、積雲と大規模場の相互作用では Ogura and Cho (1973), Cho and Ogura (1974)、大気中の対流（積雲）では Ogura and Phillips (1962), Ogura (1962, 1963b), Ogura and Takahashi (1973)、スコールラインでは Ogura and Liou (1980), Fovell and Ogura (1988) の論文について紹介した。日本付近の天気現象については時間が割けなかったが、1982年の長崎豪雨 (Ogura *et al.* 1985; Nagata and Ogura 1991)、1983年の島根豪雨 (Watanabe and Ogura 1987) などが貴重な事例研究となっていると思う。

小倉先生は、気象学の啓発にも力を注がれた。「天気」には51編の著作があるが、中でも「メソ対流系の構造と組織化に及ぼす環境の影響」の解説 (小倉 1990) や気象談話室の「メソ気象センター設立のすすめ」 (小倉 1992) は個人的には強い印象を持っている。また、「お天気の見方・楽しみ方」17編や「気象」に連載された「やさしい気象講話」36編などは日本付近の天気現象に関する珠玉の解説となっている。

小倉先生は、バランスの良い著書を執筆される天賦の才能をお持ちで、単著で8冊の教科書や啓発書を著わされた。中でも「一般気象学」 (小倉 1984) は初版以来40年近くも発売されており、我が国で気象に関わる方で読んでいない人はいないと思われる名著である。

イリノイ大学大気科学科では、小倉先生の多大な功績を記念して、毎年著名な研究者を招く Ogura Lecture が開催され、優秀な論文や学生などを表彰する Ogura Awards も設けられている。日本気象学会や日本気象予報士会でも多大なご寄付により小倉義光・正子基金が設けられ、前者では毎年小倉特別講義の開催と小倉奨励賞の授与、後者では「小倉義光・正子基金活動支援事業」に活用されている。

以上のように、小倉先生は世界の気象学の発展に寄与する多くの優れた研究をされただけでなく、日米における研究者の育成と気象学の啓発・気象業務の発展に多大な貢献をされた。長年にわたるご指導に感謝いたしますと共に、心よりご冥福をお祈り申し上げます。

3. メソ気象モデルにおける雲、エアロゾル、雷モデルの現状

佐藤陽祐 (北海道大学大学院理学研究院)

メソ気象モデルでの雲降水・雷・エアロゾルを表現する物理モデルの開発は、この30年程度で最も盛んに行われてきた数値モデル開発項目の一つであり、本発表ではメソ気象モデルにおける雲微物理モデル、エアロゾル輸送モデル、雷モデルについてその歴史と今後の開発動向をまとめた。

雲微物理モデルは、各格子における水物質の平均的な物理量 (混合比など) を定義して時間発展を計算する ECM がまず開発されてきた。ECM は各格子の平均的な粒径分布を仮定して表現するバルク法 (Kessler 1969; Tomita 2008 など) と、粒径分布や粒子の形状、密度などを直接詳細に計算するビン法 (Khain and Sednev 1996; Chen and Lamb 1994; Hashino and Tripoli 2007) がある。現業モデルでは計算コストの低いバルク法が広く用いられる。ビン法はバルク法の改良などに用いられるが、微物理特性を詳細に扱うと各格子に必要な予報変数が膨大になる「次元の呪い」の問題が顕著になる。そこで、水物質を構成する粒子ごとの時間発展をラグランジュ的に計算する LCM (Shima *et al.* 2009, 2020) が2000年代から開発されている。今後はこの LCM が雲微物理モデルにおける中心的な開発項目の一つとなると考えられる。

エアロゾル輸送モデルはエアロゾルの時空間分布を計算する (Takemura *et al.* 2005; Kajino *et al.* 2021 など)。このエアロゾルの分布に応じて雲粒や氷晶の生成を計算することでエアロゾル・雲相互作用が数値モデルで表現できる。一方で、現業で用いられる多くのメソ気象モデルでは、エアロゾル数濃度を暗に仮定して与えるなどして、エアロゾルを直接考慮していないものが多い。しかし、世界的にはエアロゾルモデルをメソ気象モデルと組み合わせる取り組みは続いており、そのような取り組みは我が国でも必要であると考えられる。

雷モデルは水物質の電荷の時間発展を計算するモデルである。日本では小倉先生に師事した高橋 勲先生が精力的に開発に取り組んできた (Takahashi 1984 など)。この雷モデルは電場の計算に必要なポアソン方程式の求解に計算コストがかかるため、メソ気象モデルで広く用いられるようになったのは近年である (Fierro *et al.* 2013; Dafis *et al.* 2018; Sato *et al.* 2022 など)。放電の時空間スケールとメソ気象モデルの時

空間解像度の間に大きなギャップがあり、放電の計算には大きな不確実性がある。今後は雷モデルも広く使われるようになってともに、放電モデルの開発が主な開発項目となっていくと考えられる。

4. メソ気象の超高解像度シミュレーション

伊藤純至（東北大学理学研究科）

従来の気象モデルは、乱流輸送全体をパラメタリゼーションにより考慮する。乱流輸送を担う「渦」を解像できるほど格子解像度を高めた場合、パラメタライズに伴う不確実性を大幅に低減したラージ・エディ・シミュレーション（LES）とよばれる超高解像度のシミュレーションが実現できる。ただし、計算負荷が増大するため、LESは大気境界層などマイクロスケールの気象が主な対象であった。しかし、並列計算性能、主記憶装置容量、ストレージ容量など様々な観点で、最近15年間でも計算処理能力は10倍以上向上した。これによりメソスケールの気象のLESが容易に実現できるようになった。発表者が関わる「降水を伴うメソ気象」と「乾いたメソ気象」の最近の計算例を通して超高解像度シミュレーションの将来展望を述べた。

気象モデルを単純に高解像度化した場合について、降水の再現精度を系統的に検証した（Ito *et al.* 2017）。気象庁非静力学モデル（JMA-NHM）により、夏季と冬季のそれぞれ1ヶ月以上の各日の日本域の計算を行った。その結果を観測結果（気象庁解析雨量）により検証し、再現精度のスコアを解像度毎に比較した。水平解像度を5 kmから2 kmに高めた場合、スコアの改善がみられたが、さらに2 kmから1 kmや500 mに高めた場合には、明確なスコアの改善はみられなかった。

極端気象の事例研究にも高解像度の気象シミュレーションが用いられるようになった。熱帯（フィリピン、ミンダナオ島）のメソ対流系による大雨事例において、高解像度の気象シミュレーションを行い、地上気象観測により検証した（Lagare *et al.* 2023）。この事例では水平解像度200 mにした場合、強い降雨の再現精度のスコアは明確に改善した。また、2013年の青森・秋田の線状降水帯事例について水平解像度1 kmの計算を行った場合、解析雨量に匹敵する降雨を伴うバック・アンド・サイド・ビルディング型の線状降水帯が現実的に再現された。

一方「乾いたメソ気象」の例として、房総半島上空、また福島市上空において旅客機が晴天乱気流に遭遇し

た2事例の高解像度シミュレーションを紹介した。前者ではケルビン・ヘルムホルツ不安定波とその碎波（Yoshimura *et al.* 2023）、後者では跳ね水現象が合理的に再現され、強い風速振幅は時間・場所ともに現実とよく合致した。

以上のように、「降水を伴うメソ気象」では、高解像度化が結実する場合と、そうでない場合がみられる。「乾いたメソ気象」の極端事例は、高解像度化により驚異的ともいえる精度で再現できている例がある。このような結果となる要因を多面的に探る必要がある。

5. 最新の気象レーダーを用いたメソ気象研究の発展

足立 透（気象研究所台風・災害気象研究部）

およそ80年前に登場した気象レーダーによって、それまで未知であった様々な大気現象が捉えられるようになり、メソスケール気象学（以降、メソ気象と呼ぶ）の幕開けをもたらした。この新しい分野をめぐって精力的な研究がなされたが、小倉先生はまさに、その黎明期から先駆的な役割を担われたお一人である。そこで本講演では、小倉先生への哀悼と敬意を込めながら、気象レーダーとメソ気象研究の発展を概観した。

軍事レーダーで捉えられる大気現象のエコーは当初よりその存在が知られていたが、次第に観測対象として重視されるようになった。こうして1940年代に科学の舞台に登場した気象レーダーは、その後の著しい技術革新を遂げ、反射強度のみならず、ドップラー速度や二重偏波情報などの高度な観測機能を加えられていった。雨域・気流構造の把握や高精度な雨量推定、降水粒子の判別が可能になることで、様々な大気現象の発見や解明につながった。このようにメソ気象研究は、気象レーダーとともに発展したという側面がある。

現在、次世代型の気象レーダーとして注目を集めるのがフェーズドアレイレーダー（PAR）である。数多くの小型アンテナを配列し、各アンテナから放射される電波の位相を制御することにより、ビームの方向を素早く変えることができるこの気象レーダーは、米国・日本・中国において研究開発が進められている。

PARはその素早いスキャン性能を活かして、メソスケール（2 kmから20 km）以下の現象も精細に観測することができる。例えば数分程度の時間スケールを持つマイクロバーストや竜巻の発生過程など、これまで観測が困難であった局所現象の理解が進んできた（Adachi *et al.* 2016；Adachi and Mashiko 2020）。ま

た、対流の盛衰を立体的かつ高頻度に捉えることにより、積乱雲の形成・維持機構や雷活動との関係性についても理解が得られるようになっていく。

このように PAR はメソ気象研究に大きな進展をもたらしつつあるが、国土を広くカバーする現業での利用については、いずれの国でも実現していない。これはまだ課題が多く残されているためであり、広域観測に適した S 帯/C 帯のレーダー開発、二重偏波情報の活用、データ同化・数値予報への応用、人工知能等を用いたナウキャスト技術の確立など、課題解決に向けた取り組みが進められているところである。

新しい気象レーダーが現業で利用されるまでには、一般的に何十年もの歳月を要するものであり、PAR の研究開発はまだ日が浅いと言えるのかもしれない。しかしながら、時空間的にきめ細やかな観測を可能とする PAR は、メソ気象研究のさらなる発展に新しい可能性を秘めている。今後、諸課題に向き合いながら、現象の深い理解と防災気象情報の高度化に向けた研究開発を強く推進していくことが期待される。

なお本講演の準備にあたり、気象研究所の山内 洋氏、梅原章仁氏、鶴沼 昂氏、楠 研一氏、鈴木 修氏に素材提供のご協力をいただいた。ここに深謝を申し上げる。

6. 極端大気現象の予測精度向上に関する展望

伊藤耕介（京都大学防災研究所）

極端大気現象の予測は防災上の基礎情報となるため、その精度向上は社会的にも重要な課題である。本発表では、局地的豪雨と集中豪雨の予測について、専門家へのインタビューを踏まえ、近年の動向と将来展望について整理した。局地的豪雨や集中豪雨は数十分～数時間のスケールで起こる大気現象だが、それらの背景にある大気総観場・放射の日変動・海面水温といった環境条件はよりゆっくりと変化していく。そのため、現在、レーダー・アメダスの情報を基に時間外挿で短時間予測を行う手法と数値予報モデルを基礎として数時間から数日先を予測する手法がともに有効活用されている。観測的には（特に洋上の）水蒸気や風を面的に捉えることが難しく、モデル的には境界層乱流や雲微物理過程の表現が課題となっている。近年、大規模な観測プロジェクトやフェーズドアレイレーダーが予測精度向上に貢献することが示されてきた。さらにひまわり後継機により、時空間的に稠密な3次元の水蒸気観測が得られ、今後の改善に貢献していく

可能性にも期待できる。計算機性能が将来的に向上した場合に、これをどう活かすかということに関しては、高解像度化、高度な物理スキームの導入、計算安定性の確保、計算領域の拡張、同化システムの高精度化、実行時間の短縮など様々な方向性がありうる。高解像度化を施すことで、微細な構造が表現できるようになることは大きな利点であるが、計算負荷が著しく高くなるため、他の項目とのバランスを考えながらシステム全体のデザインを進めていくことが重要であろう。また、海面水温解析やトラフの再現性など、基礎的でありながら、まだ改善の余地が大きな箇所もある。予測精度向上の観点では、これらの技術的な問題を丁寧に修正していくことも必要であるように思う。このほか、強非線形性や予測可能性の短さといった極端大気現象予測の困難さもあるが、それらの点についても十分に研究を行い、多くの大学・研究機関・現業機関の協力や議論のもと、よりよいシステム作りを目指していくことが必要であろう。

7. 台風の航空機観測

坪木和久（名古屋大学宇宙地球環境研究所／
横浜国立大学台風科学技術研究センター）

1990年代のはじめのころ、東京大学の旧海洋研究所が中野区の南台にあり、その5階の一番奥が海洋気象部門だった。奥から一つ手前の部屋が、木村龍治先生の部屋であるとともに、研究室のみんなが集まって話をするところだった。小倉先生は週に1度ほど、そこに来られて、雑談や研究の話をされるのが常であった。私もいろいろな話を聞かせていただいた。そのなかに米国の航空機観測の話もあったと思う。ただ、ハリケーンの観測の話があったかどうかは、よく覚えていない。その頃から30年近くがたち、台風の航空機観測を日本でも本格的にできるようになったが、その感想を伺うことができなかったことが心残りではない。

そのようなことで、小倉先生の追悼シンポジウムの話題として、台風の航空機観測が適切かどうか迷うところであったが、メソ気象研究の将来展望ということで話させていただいた。

台風は日本における風水害の最大要因である。近年の台風災害を見ても一つの台風で1兆円を超える被害が出ている。しかしながら中心気圧や最大地上風速は衛星観測による雲パターンから推定されており、スーパー台風のような強い台風では誤差が大きい。また、進路予報は改善が進んでいるが、強度予報は過去数十

年で改善が見られない。その要因は、台風の内部コアの構造や急発達などのメカニズムが十分理解されていないことである。

そこで名古屋大学を中心とするグループは、T-PARCI (Tropical cyclone-Pacific Asian Research Campaign for Improvement of Intensity estimations/forecasts) という、台風の航空機観測プロジェクトを開始した。その第1フェーズが2016年から2021年に実施され、特に強度の直接観測とそれによる強度予報の改善を目的とした。第2フェーズは2021年から2025年まで実施されている。これらはともに科研費基盤研究Sでサポートされている。

第2フェーズでは台風強度の直接観測に加えて、多重壁雲の暖気核構造の観測と急発達のメカニズムの解明という非常に挑戦的な目標を設定した。

観測では新しく就航したガルフストリームIVというジェット機を使用するが、まず、それにドロップゾンデの観測装置を設置しなければならなかった。幸いにして名古屋大学総長の裁量経費によるサポートで設置することができ、別のジェット機からドロップゾンデの射出が問題なくできることを確認した。

これを用いて、2021年に台風第16号 (Mindulle) の観測を行った。この台風は二重壁雲構造をしたスーパー台風であったが、観測時はこれらの特徴が終わった後だった。2022年には台風第14号 (Nanmadol) の観測に成功した。この台風は二重壁雲構造をしており、スーパー台風に発達する過程と最大強度の状態を観測し、眼内部の暖気核のデータが得られた。

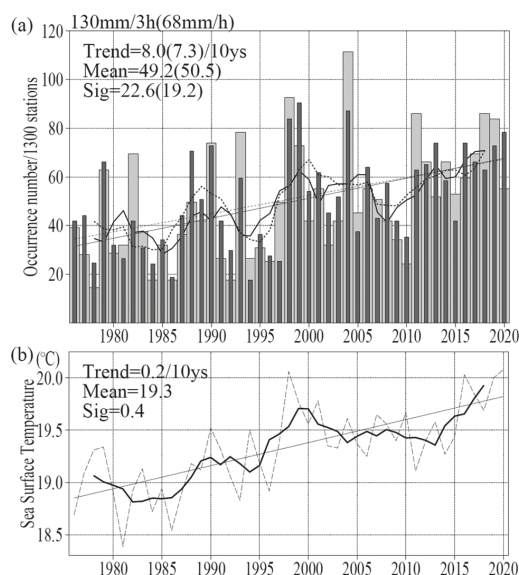
このような成果を小倉先生はどのようにご覧になるだろう。本当はその成果をお目にかけて、ご意見や感想を伺いたかったが、今となってはそれもかなわない。先生のご冥福を心よりお祈りする。

8. 集中豪雨と線状降水帯に関する課題～海の影響～

加藤輝之 (気象研究所台風・災害気象研究部)

小倉先生は気象大学校の予報業務研修で講師を務められたことがあり、その内容をまとめられたものがメソ気象の基礎理論 (小倉 1997) という教科書である。その講義は吉崎正憲氏に引き継がれたのち、私が担当し、図解説中小規模気象学 (加藤 2017) として最新の知見も含めて内容をまとめ直した。気象庁のホームページからダウンロードすることができるので、メソ気象を学ぶ上で是非役立ててもらいたい。

集中豪雨事例数における線状降水帯の割合は約半数 (台風・熱帯低気圧を除くと約2/3) であり、特に6月～7月の梅雨期の南日本 (九州を含む) ではほとんどが線状降水帯によって集中豪雨がもたらされ、このことが梅雨前線に伴う大雨の特徴であることが示されている (津口・加藤 2014; Kato 2020)。また、アメダスデータを用いた集中豪雨の調査 (加藤 2022) では、長期変化傾向に基づき1976年と2020年とを比較すると、集中豪雨 (130mm/3h以上) の発生数が約2.2倍、短時間大雨 (68mm/h以上) が2.0倍になる (第2図a)。短時間大雨の増加が地球温暖化の影響を強く受けていることがIPCCのレポートの中で報告されており、集中豪雨の増加にも同様に大きく影響しているものと考えられる。また、第2図bをみると、集中豪雨の発生数は日本近海のSSTの変動と高い相関関係 (相関係数: 0.49) にあるが、梅雨期の相関係数は0.11 (春期: 4-6月) ～0.21 (夏期: 7-9月) とそれほど高くない



第2図 (a) アメダス3時間降水量130mm以上 (灰色、実線) と1時間降水量68mm以上 (黒色、破線) の1300地点当たりの年単位の発生回数の経年変化。折れ線は5年移動平均、直線は長期変化傾向。(加藤 2022) (b) 日本近海のSSTの年変化 (破線)。太折れ線は5年移動平均、直線は長期変化傾向。海面水温の長期変化傾向 (日本近海) (https://www.data.jma.go.jp/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html, 2023.6.12閲覧) の気象庁データを基に作成。

かった。これは、SST 以外に、大雨をもたらす下層水蒸気の日本列島への流入が総観場に伴う気圧配置に強く依存するためだと考えられ、今後総観擾乱との関係などの統計的調査が必要である。

海上での下層水蒸気の蓄積では、東シナ海上で水蒸気混合比 2 g/kg 程度の下層水蒸気量の増加をもたらす。その増加量は東シナ海への流入前の値に対して 10% 強でしかないが、5 K 程度の相当温位の増大になり、それにより自由対流高度が低くなり、浮力がなくなる高度（平衡高度）が高くなることで大雨の発生に繋がる。下層水蒸気量の増加には、SST 分布、特に黒潮域での影響の大きい事例が報告されており（Kato 2013）、さらなる複数の事例での調査が必要である。海上の水蒸気量の日変化について 3 時間ごとの気象庁メソ解析を用いて調査したところ、高度 500m の水蒸気混合比・水蒸気フラックス量の極大が深夜から早朝に出現していた。この結果は集中豪雨の発生時刻の特性に一致しているものの、解析値の妥当性の検討も含めて、極大をもたらす要因の調査が必要である。

謝 辞

今回のシンポジウムを開催するに当たって、会場の準備・運営をしていただいた東大大気海洋研究所および気象研究所のみなさま、特に、小倉先生の講演ビデオの編集およびオンライン配信等に協力していただいた廣川康隆氏、伊藤享洋氏、栃本英伍氏に感謝いたします。

略語一覧

ECM : Eulerian Cloud Model

LCM : Lagrangian Cloud Model

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

IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル

SST : Sea Surface Temperature 海面水温

参 考 文 献

- Adachi, T. and W. Mashiko, 2020: High temporal-spatial resolution observation of tornadogenesis in a shallow supercell associated with Typhoon Hagibis (2019) using phased array weather radar. *Geophys. Res. Lett.*, **47**, e2020GL089635, doi:10.1029/2020GL089635.
- Adachi, T., K. Kusunoki, S. Yoshida, K. Arai and T. Ushio, 2016: High-speed volumetric observation of a wet

microburst using X-band phased array weather radar in Japan. *Mon. Wea. Rev.*, **144**, 10, doi:10.1175/MWR-D-16-0125.1.

- Chen, J.-P. and D. Lamb, 1994: The theoretical basis for the parameterization of ice crystal habits: Growth by vapor deposition. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 1206-1222.
- Cho, H.-R. and Y. Ogura, 1974: A relationship between cloud activity and the low-level convergence as observed in Reed-Recker's composite easterly waves. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 2058-2065.
- Dafis, S., A. Fierro, T. M. Giannaros, V. Kotroni, K. Lagouvardos and E. Mansell, 2018: Performance evaluation of an explicit lightning forecasting system. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 5130-5148.
- Fierro, A. O., E. R. Mansell, D. R. MacGorman and C. L. Ziegler, 2013: The implementation of an explicit charging and discharge lightning scheme within the WRF-ARW model: Benchmark simulations of a continental squall Line, a tropical cyclone, and a winter storm. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 2390-2415.
- Fovell, R. G. and Y. Ogura, 1988: Numerical simulation of a midlatitude squall line in two dimensions. *J. Atmos. Sci.*, **45**, 3846-3879.
- Hashino, T. and G. J. Tripoli, 2007: The spectral ice habit prediction system (SHIPS). Part I: model description and simulation of the vapor deposition process. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 2210-2237.
- Ito, J., S. Hayashi, A. Hashimoto, H. Ohtake, F. Uno, H. Yoshimura, T. Kato and Y. Yamada, 2017: Stalled improvement in a numerical weather prediction model as horizontal resolution increases to the sub-kilometer scale. *SOLA*, **13**, 151-156.
- Kajino, M. et al., 2021: Comparison of three aerosol representations of NHM-Chem (v1.0) for the simulations of air quality and climate-relevant variables. *Geosci. Model Dev.*, **14**, 2235-2264.
- Kato, T., 2013: Effect of warm ocean current on the formation of low-level humid air causing a F3 tornado storm observed in middle Japan on 6 May 2012. *CAS/JSC WGNE Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling*, **43**, 5.07-5.08.
- 加藤輝之, 2017: 図解説中小規模気象学. 気象庁, 316pp.
https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/expert/pdf/textbook_meso_v2.1.pdf (2023.6.12閲覧)
- Kato, T., 2020: Quasi-stationary band-shaped precipitation systems, named "senjo-kousuitai", causing localized heavy rainfall in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **98**, 485-509.
- 加藤輝之, 2022: アメダス 3 時間積算降水量でみた集中豪

- 雨事例発生頻度の過去45年間の経年変化. 天気, 69, 247-252.
- Kessler, E., 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. Meteor. Monogr., Amer. Meteor. Soc., 84pp.
- Khain, A. P. and I. Sednev, 1996: Simulation of precipitation formation in the Eastern Mediterranean coastal zone using a spectral microphysics cloud ensemble model. Atmos. Res., 43, 77-110.
- 木村龍治, 新野 宏, 2023: 小倉義光先生のご逝去を悼む. 天気, 70, 29-31.
- Lagare, C. T. Yamazaki and J. Ito, 2023: Numerical simulation of a heavy rainfall event over Mindanao, Philippines, on 03 May 2017: mesoscale convective systems under weak large-scale forcing. Geosci. Lett., 10, 23, doi:10.1186/s40562-023-00277-8.
- Nagata, M. and Y. Ogura, 1991: A modeling case study of interaction between heavy precipitation and a low-level jet over Japan in the Baiu season. Mon. Wea. Rev., 119, 1309-1336.
- Ogura, Y., 1952: The theory of turbulent diffusion in the atmosphere (I). J. Meteor. Soc. Japan, 30, 23-28.
- Ogura, Y., 1962: Convection of isolated masses of a buoyant fluid: A numerical calculation. J. Atmos. Sci., 19, 492-502.
- Ogura, Y., 1963a: A consequence of the zero-fourth-cumulant approximation in the decay of isotropic turbulence. J. Fluid Mech., 16, 33-40.
- Ogura, Y., 1963b: The evolution of a moist convective element in a shallow, conditionally unstable atmosphere: A numerical calculation. J. Atmos. Sci., 20, 407-424.
- 小倉義光, 1984: 一般気象学. 東京大学出版会, 314pp.
- 小倉義光, 1990: メソ対流系の構造と組織化に及ぼす環境の影響. 天気, 37, 439-465.
- 小倉義光, 1992: メソ気象センター設立のすすめ. 天気, 39, 581-583.
- 小倉義光, 1997: メソ気象の基礎理論. 東京大学出版会, 215pp.
- Ogura, Y. and H.-R. Cho, 1973: Diagnostic determination of cumulus cloud populations from observed large-scale variables. J. Atmos. Sci., 30, 1276-1286.
- Ogura, Y. and M.-T. Liou, 1980: The structure of a mid-latitude squall line: A case study. J. Atmos. Sci., 37, 553-567.
- Ogura, Y. and N. A. Phillips, 1962: Scale analysis of deep and shallow convection in the atmosphere. J. Atmos. Sci., 19, 173-179.
- Ogura, Y. and T. Takahashi, 1973: The development of warm rain in a cumulus model. J. Atmos. Sci., 30, 262-277.
- Ogura, Y., T. Asai and K. Dohi, 1985: A case study of a heavy precipitation event along the Baiu front in northern Kyushu, 23 July 1982: Nagasaki heavy rainfall. J. Meteor. Soc. Japan, 63, 883-900.
- Sato, Y., S. Hayashi and A. Hashimoto, 2022: Difference in the lightning frequency between the July 2018 heavy rainfall event over central Japan and the 2017 northern Kyushu heavy rainfall event in Japan. Atmos. Sci. Lett., 23, doi: 10.1002/asl.1067.
- Shima, S., K. Kusano, A. Kawano, T. Sugiyama and S. Kawahara, 2009: The super-droplet method for the numerical simulation of clouds and precipitation: a particle-based and probabilistic microphysics model coupled with a non-hydrostatic model. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 135, 1307-1320.
- Shima, S., Y. Sato, A. Hashimoto and R. Misumi, 2020: Predicting the morphology of ice particles in deep convection using the super-droplet method: development and evaluation of SCALE-SDM 0.2.5-2.2.0, -2.2.1, and -2.2.2. Geosci. Model Dev., 13, 4107-4157.
- Takahashi, T., 1984: Thunderstorm electrification—A numerical study. J. Atmos. Sci., 41, 2541-2558.
- Takemura, T., T. Nozawa, S. Emori, T. Y. Nakajima and T. Nakajima, 2005: Simulation of climate response to aerosol direct and indirect effects with aerosol transport-radiation model. J. Geophys. Res. Atmos., 110, doi:10.1029/2004JD005029.
- Tomita, H., 2008: New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice. J. Meteor. Soc. Japan, 86A, 121-142.
- 津口裕茂, 加藤輝之, 2014: 集中豪雨事例の客観的な抽出とその特性・特徴に関する統計解析. 天気, 61, 455-469.
- Watanabe, H. and Y. Ogura, 1987: Effects of orographically forced upstream lifting on mesoscale heavy precipitation: A case study. J. Atmos. Sci., 44, 661-675.
- Yoshimura, R., J. Ito, P. A. Schittenhelm, K. Suzuki, A. Yakeno and S. Obayashi, 2023: Clear air turbulence resolved by numerical weather prediction model validated by onboard and virtual flight data. Geophys. Res. Lett., 50, e2022GL101286, doi:10.1029/2022GL101286.