気象・気候を対象としたコミュニティモデルSCALE
～論文やUsers Guideには載らないチューニング～

技術解説

佐藤陽祐*、足立幸穂**

Overview of community weather/climate model SCALE

Key Words: Meteorology, Climate, Numerical simulation

はじめに：数値天気予報と数値気象モデル

天気予報は、現代社会において広く利用されている。例えばその日の個人の予定、気象条件に影響を受ける企業活動の計画、気象災害の防災・減災のための利用などである。この天気予報は、数値気象モデルと呼ばれる物理法則に従って、現在の大気の状態から将来の大気の状態（すなわち将来の天気の状態）を計算するシミュレーションコードを用いた数値シミュレーション（以下、数値実験と表記）に基づいて実施されている。

気象庁では日々、気象庁が持つ大型計算機（スーパーコンピュータ）を用いて数値気象モデルによる数値実験が行われ、その計算結果の出力を、天気予報等に利用しやすい情報に変換（応用処理）した上で、気象庁の予報官が確認し、天気予報（防災気象情報）を発表している。このような数値実験に基づく天気予報は数値天気予報と呼ばれる。気象庁による天気予報の精度は、降水の有無に関して84 %、最高気温の誤差は1.3 ºC（令和6年の毎日5時発表「明日の予報」(https://www.data.jma.go.jp/yoho/kensho/HPdata/HPdata2024/zc_2024.html) の全国平均）と高い精度を誇っていると言える。このような高い精度の予報は数値天気予報なしには成立しない。その意味で、数値天気予報の屋台骨とも言える数値気象モデルは、現代社会に大きな貢献をしている技術であると言える。

数値気象モデルを用いた計算の利用は天気予報だけにとどまらない。たとえば、黄砂、砂漠の砂、海塩、火山噴出物に代表される自然起源の大気汚染物質や、工場から排出される微粒子や微量気体といった人為起源の大気汚染物質の予測にも用いられる（例えば、気象庁から提供される黄砂予報 https://www.data.jma.go.jp/env/kosa/fcst/ など）。また、2011年に発生した福島第1原子力発電所起源の放射性物質の大気中での動態調査に用いられるなど、数値気象モデルは大気中でのあらゆる物質の輸送現象に適用されて我々が生活する現代社会を支えている。その意味で、数値気象モデルと大型計算機は現代社会になくてはならない重要なインフラと言える。

数値気象モデルは世界中で開発され、さまざまなものが存在しているが、大きく分けて、全球モデルと領域モデルに大別される。全球モデルはその名の通り、全地球を計算対象にする数値モデルであり、地球規模の時空間スケールの現象を対象とする。例えば、週間天気に用いられるのは全球モデルである。領域モデルは、特定の場所のみを計算対象とする数値モデルであり、全球モデルに比べて対象領域は狭いが、より小さい時空間スケールの現象を対象とする。例えば、日本の気象庁で開発されたJapan Meteorological Agency Non-Hydrostatic Model (JMANHM: Saito et al. 2006)、asuca (Ishida et al. 2022)、米国で開発されたWeather Research and

* Yousuke SATO

1983年4月生まれ
東京大学大学院 理学系研究科 地球惑星科学専攻 博士課程（2012年）
現在、大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 教授 理化学研究所 計算科学研究センター 客員研究員 博士(理学)
TEL：06-6879-7602
E-mail: yousuke.sato@civil.eng.osaka-u.ac.jp

** Sachiho A. ADACHI

1980年10月生まれ
筑波大学大学院 生命環境科学研究科 地球環境科学専攻 博士課程（2008年）
現在、理化学研究所 計算科学研究センター 研究員 博士（理学）
TEL：078-940-5792
E-mail: sachiho.adachi@riken.jp

Forecasting model (WRF; Skamarock 2008) などである。

本稿前半では著者らが所属する理化学研究所計算科学研究センターが中心になって、我が国で開発した数値気象モデル Scalable Computing for Advanced Library and Environment (SCALE: Nishizawa et al. 2015, Sato et al. 2015) の領域モデルバージョン (SCALE-Regional Model: SCALE-RM) について、その概略と、それを用いることでどのような実験が可能かを簡潔に記述する。

また、本稿後半では SCALE をはじめとした領域気象モデルを用いる際に実施する「調整」の例を紹介する。このような調整は物理チューニングとも呼ばれ、領域気象モデルを用いて数値実験を行う際に、しばしば実施する重要なプロセスである。理想的には、どんな場合でも高い精度で現象を再現し、「調整」を要しない数値モデルが実現されることが望ましい。しかし、実際には、さまざまな制約により、当該理想の実現は容易ではない。そのため、開発者をはじめ、領域気象モデルを長らく利用する者の多くにとっては、自分が対象とする現象を数値モデルで再現するためにこのような調整を行わなければならないことはよく知られている。ところが、多くの場合、投稿論文など公開される文書には、調整後の結果のみ記載され、調整による影響やその方法が文書に残ることはない。本稿後半ではそのような通常は文書として残ることがないが、重要な事項について、その文書を残すことを一つの目的とする。特に後半は SCALE のユーザーを対象とした記述になっている箇所が多いが、その点はご容赦いただきたい。

SCALE-RM を用いた数値実験の例

SCALE-RM は他の領域気象モデルと同様、地球全体を覆って計算を実施する全球モデルの出力もしくは再解析データなどの大気や地表面・陸面データを用いて、対象とした計算領域における大気の状態（風速、風向、気温、湿度、雲、降水、日射量など）や土壌・地表面（地表面気温や土壌水分量など）の状態の時間発展（将来の状態）を計算することができる。例えば、図 1 は SCALE のユーザーガイド (https://scale.riken.jp/documents/ , 2025 年 9 月 22 日閲覧) に記載されている現実事例のチュートリアルを実施することによって得られる結果である。2007 年 7 月 14 日から 15 日にかけて、鹿児島県及び四国沖を通過した台風の再現実験の結果であり、台風周辺の海面気圧や降水量、高度 10 m の風速・風向を示している。このチュートリアルでは公開されている客観解析データ（NCEP_FNL: National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, 2000）を初期値・境界値として用いて、日本付近の計算を実施している。NCEP_FNL の水平解像度は 1.25° と O (100 km) であるのに対して、SCALE-RM を用いることで対象とする領域の気象場の詳細な計算（図 1 の例は水平解像度 20 km）が可能となる（このような低解像度の広領域のデータから高解像度の計算をする方法を力学的ダウンスケーリングとも呼ぶ)。

日々の天気予報を作成する際にも、気象庁が作成している気象場の解析値や、週間天気予報などを実施するために計算している全球モデルの出力を初期値・境界値にし、asuca という領域気象モデルによって数値天気予報を実施していることから考えると、SCALE-RM で実施している計算は、基本的には日々の数値天気予報の計算と同様のものであり、必要なデータを取得できれば SCALE-RM でも同様の数値天気予報が可能であることがわかる。実際に SCALE-RM を用いて数値天気予報を実施した例も存在する (岩井ら 2024)。

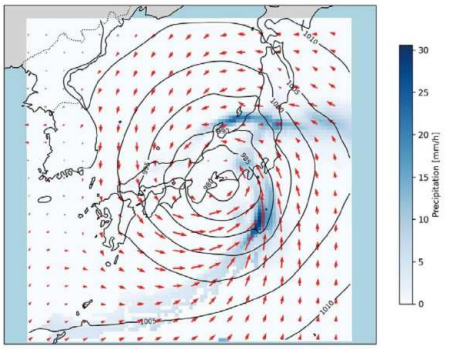

図 1　SCALE-RM によって計算された 2007 年 7 月 14 日から 15 日にかけて、鹿児島県及び四国沖を通過した台風 4 号周辺の気圧 (等高線、単位は hPa)、降水量 (陰影)、及び、高度 10m の風速風向 (ベクトル)。2007 年 7 月 15 日 9 時 (日本時間) の結果である。

また現実的な大気を対象とした数値実験のみならず、例えば、地形や地球の曲率、地球の回転を無視

した実験といった、現実大気では起こり得ない大気状態を仮定したさまざまな実験も可能である。このような理想実験は、単純化・理想化された条件を設定して実行することで、複雑な大気現象の特定の要因を分離・強調してその影響を明確にしたり、基本的なメカニズムを解明したりするために用いられる。理想実験の例としては、非常に限定的な領域で計算される層積雲（Sato et al. 2014 など、図 2）、雲が発生しない乾燥条件下で地表から加熱を与えた際に発生する乱流構造（Nishizawa et al. 2015）、地表面摩擦のない条件下で繰り返し発生する積乱雲（マルチセル）（Kondo and Sato 2025）、放射対流平衡実験（Yanase et al. 2022）など、例を挙げれば枚挙にいとまがない。このように SCALE-RM を用いた理想実験は気象学における幅広い分野で利用されている。

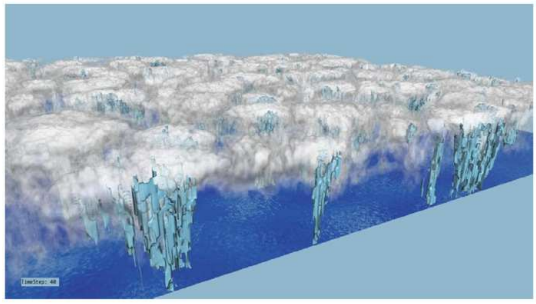

図 2　SCALE-RM による理想実験により計算された、カリフォルニア沖で発生する層積雲の理想実験の結果（横浜国立大学 吉田龍二准教授 提供）。白が雲、水色が雨を表す。（描画は VAPOR: https://www.vapor.ucar.edu/ で実施し、地面の色は計算結果とは無関係である）

SCALE の思想と開発

この SCALE は 2010 年代に開発が開始されたモデルである。BSD2 条項に基づいて公開され、商用、非商用を問わず無償で利用可能な公開されているコードであり、日本語と英語双方の Users Guide が公開され、さまざまな研究者によって用いられている。これらの計算に用いられる SCALE-RM が具体的にどのような方程式の時間発展を、どのような数値解法で実施しているかは、SCALE-RM の Description Document（https://scale.riken.jp/documents/）や、Nishizawa et al.（2015）に詳しく記載されているため、そちらを参照されたい。

SCALE は主に開発者や開発者と共同研究を行う研究グループをはじめとした理学の分野で用いられてきたが、近年は工学分野でも徐々に用いられるようになってきた（たとえば長谷川ら 2024）。SCALE のユーザーが増加するに伴い、開発者がユーザーサポートをする機会も増えているが、その際に、「Users Guide や投稿論文には掲載されていない技術的な側面」についてのサポートをすることが多くある。

ユーザーが SCALE を利用する際に、まず目を通すのが Users Guide や、SCALE を使った実験により発表された投稿論文（投稿論文リストは https://scale.riken.jp/publications/）である。しかしながら、Users Guide は、分量の制限や、ユーザーの可読性の観点から、SCALE の詳細な仕様を一つ一つ記載することは難しい。また投稿論文は、科学的な新規性や、そのための解析に焦点を当てるがゆえに、やはり実験設定や SCALE 自体の詳細な仕様を全て記載できないことがほとんどである。これらの事情から、論文のみの情報から再実験を実施できない問題がある。近年は、共通のデータリポジトリサービス（例えば zenodo: https://zenodo.org/ など）にソースコードや実験設定のファイルを登録し、投稿論文出版時に論文にデータリポジトリの情報を付加することで、この問題を緩和するための取り組みが実施されている。しかしながら、公開された設定ファイルの内容が Users Guide に記載された標準的な設定と異なっていた場合、論文の読者がなぜそのような設定にしたかといった「Users Guide や論文に掲載されていない情報」を知ることは困難である。

このような情報はノウハウといっても良いので、以降「ノウハウ」と記載する。そのため、通常の場合は、開発チームのサポートを得ながら、ユーザー自身がさまざまな実験を積み重ねて、経験的にそのような「ノウハウ」を獲得していくプロセスが必要になる。多くのユーザーが、このようなプロセスを経るものの、場合によってはこの「ノウハウ」を獲得するというプロセスがやり遂げられずに利用を諦めるというユーザーも数多く存在すると想像する。

そこで、本稿後半では、読者にこのようなノウハウの例を共有する目的で、SCALE の調整の具体例として「物理チューニングのための感度実験」とその結果を紹介する。誌面の制限から本稿では著者らが持つノウハウを全て紹介することはできないが、

今後SCALEを用いて実験をするユーザーに有益になれば幸いである。

領域モデルを用いる際に実施する調整の例

SCALE-RMに関わらず、多くの数値気象モデルは対象としている現象を再現するために、数多くの試行実験を重ねて、物理チューニングを行い、対象とする現象が再現できた実験をいわゆる基準実験（コントロール実験とも呼ばれる）とする。その上で、基準実験の結果を詳細に解析する、またはその実験から何かの条件を変更した実験をすることで、対象とする現象のメカニズムやその現象による影響評価などを実施する。

つまり、現象の理解に十分と認められる水準での再現が得られる基準実験の設定が定められるまでは、対象とする現象に対する科学的な知見を得ることは困難である。著者らの経験から、多くの場合、基準実験の設定を決めるに至るまでに実施する試行実験の数は、論文などで掲載される実験の数などよりははるかに多い。また、基準実験の設定を得るまでの試行錯誤が、研究全体の中で最も時間を要することも多く、「基準実験を得られれば成果の半分以上は得られたようなもの」という意見を耳にすることすらある。

本稿では、以降このような試行実験とそれによるチューニングの例として「計算領域の設定の調整」「雲微物理モデルのパラメーターチューニング」を過去に実施した例についての記載をする。

計算領域の設定による調整

1つ目の例はSato et al. (2022)で実施された、平成29年7月に発生した九州北部豪雨を対象とした数値実験の基準実験の設定を得るために実施した計算領域の調整である。Sato et al. (2022)ではSCALE-RMを用いて、平成29年に発生した九州北部豪雨を対象として数値実験を実施した。その際、降水の再現性について観測（レーダーアメダス合成雨量）との比較を通して、基準実験の設定を決めた。

実験設定は、水平解像度1 km、鉛直60層（層厚は40m ～ 683m）、モデル上端の高度は21.5kmである。初期値、側面境界値には気象庁提供の気象庁メソ解析データ（MANL）の風速、大気密度、温度、比湿、土壌水分、土壌温度、地表面温度（海水温含む）を用い、2017年7月5日の00UTCから翌6日の00UTCまでの24時間の数値実験を実施した。実験設定の詳細はSato et al. (2022)を参照されたい。Sato et al. (2022)では図3aの灰色で示した領域を計算領域として計算を実施し、論文に記載されている解析を行った。この図3aの計算領域を設定するまでに、試行実験として、計算領域の位置や大きさを変え、それ以外の設定を全く同じにした実験を数多く行い、最も降水の再現性が高いものを基準実験とした。

例として、試行実験で用いた3つの計算領域を図3b-dで、それらの計算領域の設定で得られた実験結果（計算期間全体での積算降水量の分布）を図4に示す。この図から計算領域の位置や大きさが異なるだけで、その他の設定が全く同じであっても、降水量の多い場所が大きく異なっていることがわかる。このような降水量の水平分布の違いは、主に、雲モデルのミスマッチと呼ばれる問題を避けるために行っている、初期値・境界値の与え方によって生じる問題である。

このことを説明するためにまず、雲モデルのミスマッチについて説明する。初期値・境界値に用いる客観解析データは、通常は、数値気象・気候モデルの計算結果に観測データをデータ同化することで得られる。そのため、客観解析データの雲を構成する水物質の質量などは、それを作成するために使用された数値モデル（MANLならJMANHMやasuca）で計算された水物質の質量（q_c）などの値に基づいている。それらは、さまざまな仮定に基づいて計算された値であり、仮定される物理特性（粒径分布や雲粒の落下速度など）はモデルごとに大きく異なる。そのため、あるモデルで計算されたq_cを別のモデルにそのまま与えたとしても、計算結果は大きく異なってしまう。このような問題を雲モデルのミスマッチとよぶ。このようなミスマッチを極力起こさないために、SCALE-RMをはじめ多くの領域気象モデルでは、大気の初期値や側面境界の気象場には、風速、大気密度、温度、比湿は与えるが、雲を構成する水物質を与えないで計算を行い、初期から数時間の結果や、側面境界周辺の結果を解析しないのが慣例である。

このような扱いのために、雲がある領域を計算領域の側面境界に設定してしまうと、本来は雲がある

場所で雲がなく、そこから計算領域内部（今はSCALE-RMの計算領域内部）で上昇流が発生し、雲ができるまでに一定の時間と距離が必要になる。Sato et al. (2022) の九州北部豪雨の事例では、計算領域の北西～西北西から降水域が計算領域に流れ込む環境であったため、その領域に計算領域を広く取った図3b–dの計算領域での実験の方が基準実験よりも九州の上流側（すなわち西～北西側）から降水域が見られるようになっている。最終的にSato et al. (2022) では図3aの領域を基準実験として解析を実施したが、観測の降水域とはずれが生じている。このような状況にならないようにするために、対象とする現象を引き起こすメカニズムが計算対象領域内に含まれるように計算領域を設定することが望まれる。

この例のように、領域気象モデルの結果は、計算領域の決め方に非常に敏感であることを知っておく必要があり、試行実験を通して、基準実験となる計算領域を設定する必要があることに注意しなければならない。

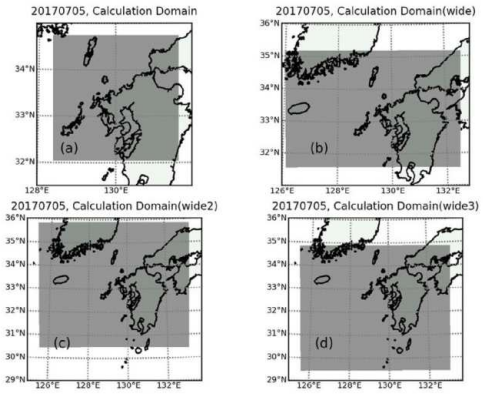

図3　Sato et al. (2022) の基準実験の計算領域 (a) を得るまでに実施した計算領域の位置を変えた試行実験の計算領域の例 (b–d)。灰色が計算領域を示す

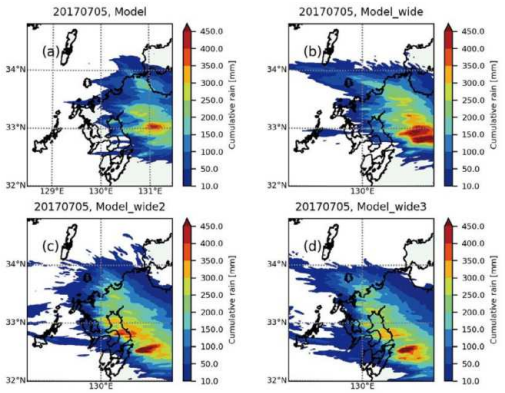

図4　図3の計算領域で計算された計算時間全体の積算降水量の分布（計算設定は、計算領域が異なること以外はSato et al. 2022の2017年の事例と全く同じである）

雲微物理モデルのパラメータチューニング

次に足立ら (2015) で実施された雲微物理モデルのチューニングについて記載する。豪雨の原因となる降水現象の多くは、発達した積乱雲によってもたらされる。そのため、降水量を計算するためには、モデルで積乱雲を構成する雲とそこからの降雨・降雪を表現する必要がある。大気中で雲粒が生成し、降雨や降雪に至るプロセスや、それに伴う潜熱の出入りといった大気へのフィードバックを表現するモデルコンポーネントは、雲微物理モデルや積雲対流パラメタリゼーション（以後、雲コンポーネント）と呼ばれる。

しかしながらこれらの雲コンポーネントも完璧なものではなく、さまざまなレベルで経験的なパラメータや仮定が存在している。そのため、ある事例で雲や降水の再現性が良かったとしても、別の事例では良くないということが起こり得る。そのため、まず初めにこのような経験的なパラメータをあり得る範囲で変化させた試行実験を通してパラメータの調整を実施し、対象とする現象をよく再現するパラメータの組み合わせを決める作業が必要となる場合がある。このようなチューニングも前節で紹介した計算領域に関する感度実験と同様、投稿論文などでは記述されることは少ない。

足立ら (2015) では、関西地域における将来の水資源及び極端降水に伴う災害リスクの評価を目標に、その前段階として、6月から9月の夏季降水を対象

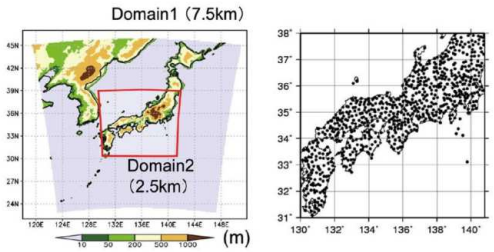

図5　(左)足立ら(2015)で実施された数値実験の計算領域（2段のネスト実験で実施し、外側はDomain 1（水平解像度は7.5 km）、内側はDomain 2（水平解像度は2.5 km）。(右) 解析に用いたAMeDAS地点の場所。

とした過去再現実験をSCALE-RMにより実施し、モデルの再現性の検証を行った。初期値と境界値は、気象庁提供の全球客観解析データ（気象場）、NCEP-FNL（土壌水分や土壌温度等）、日平均海面水温データ（MGDSST；Kurihara et al. 2006）を用いた。計算領域は図5左に示す範囲で、解析にはDomain2の結果を用いた。利用した雲微物理モデルは1-moment bulkモデル (Tomita 2008) である。

モデルの総降水量および極端降水の出現頻度の再現性の検証は、計算領域内にある気象庁が運用する地域気象観測システム (Automated Meteorological Data Acquisition System: AMeDAS) の観測点（図5右）における1時間降水量のヒストグラムについて、観測とモデル結果を比較することにより行なった。まず初めに、他の実験で使われていた雲微物理モデルのパラメータセット2種類について試行実験を行い、過少もしくは過大評価傾向にあることを確認した。そこで、雲微物理モデルのパラメータのうち、値自体の不確実性が大きな複数のパラメータについてそれぞれ値を振った試行実験を実施し、降水の結果への感度が大きな4つのパラメータを表1のとおり特定した。次に、これらのパラメータを現実的な範囲を大幅に逸脱しない範囲で網羅的に変更したパラメータセットを10組用意し、試行実験を実施した。

表1　足立ら (2015) で調整されたTomita(2008) のパラメータと変更範囲、及び、最も再現精度が高いと評価されたパラメータセット (Best set)。各パラメータの単位など、詳細はTomita (2008) に詳しく記載されている。

パラメータ*	説明	変更範囲	Best set
c_r (Cr)	雨の落下速度に関するパラメータ	30～100	78
d_g (drag_g)	霰の落下速度に関するパラメータ	1.0～2.5	2.5
β_1 (beta_saut)	雲氷と雪の変換効率に関するパラメータ	4.5×10^{-3} ～ 6.0×10^{-3}	6.0×10^{-3}
γ_{saut} (gamma_saut)	雲氷と雪の変換効率に関するパラメータ	0.02 ～ 0.06	0.06

*：パラメータ名は、1段目はTomita (2008) での表記、2段目の括弧内の表記はSCALEのコード中での表記

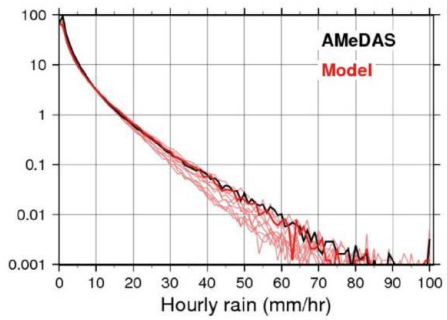

図6　足立ら(2015)で実施された夏季3年間の(黒)AMeDASおよび、(赤)モデルの1時間降水のヒストグラム。赤太線は最も再現精度が高いBest setの結果。

図6は、夏季3年間（2008, 2010, 2011年）の1時間降水量のヒストグラムを示す。赤線で示される通り、パラメータの組み合わせが異なる10個の実験から得られたヒストグラムは大きくばらついており、雲微物理モデルのパラメータ調整一つで、結果は大きく変わることがこの図からわかる。また、10組のパラメータセットのうち降水の再現精度の判定は、観測とモデル降水量の空間相関係数 (r)、及び、ヒストグラムの一致度を評価する式 (1) で示される指標を定義し、評価を行った。

$$I = \sum_{j=1}^{N} (S_j / O_j) d_j \Big/ \sum_{j=1}^{N} d_j, \qquad (1)$$

Nは降水強度のビンの数（今回は19に設定）、S_j、O_jはそれぞれのビンにおけるSCALEと観測の出現頻度、d_jはビンの幅である。10組のパラメータセットのうち、rとIの成績が共に最も良かったパラメータセット（表1の一番右列、Best set）をその後の実験や解析で用いた。

このように、領域気象モデルを用いるにあたっては、その再現性を重視するのであれば、本節で記載したような物理チューニングが必要となる場合があることはユーザーも理解しておく必要があろう。

おわりに

本稿では、SCALE-RMを用いるユーザーが実験をする際に考慮すべきではあるが、投稿論文やUsers Guideには記載されない調整について2つの例を挙げて記載をした。具体的には計算領域の調整と、雲微物理モデルのパラメータ調整である。このような調整やそのための試行実験のほとんどは文書

として残らない。また本稿で挙げた以外にもさまざまな調整が行われていることをユーザーは知っておくべきであろう。

このような調整は時として、「都合の良いように調整している」という誤解を招くことがある。調整するパラメータの意味をわからず闇雲に調整をした場合、そのような捉えられ方をしても仕方がない。しかしながら足立ら(2015)もそうであったが、パラメータの調整を行う際には、そのパラメータの物理的意味を考え、そのパラメータにどの程度の不確実性があるかを考慮した上で、調整するパラメータやその範囲を決めている。言い換えれば、チューニングは決して「都合の良いように調整」するために行うものではなく、「モデルの不確実な部分を調整」することで結果の信頼性を向上させるために行われるべき過程である。冒頭に記載の通り、理想的には、どんな地域の現象も高い精度で再現し、「調整」を要しないモデルの実現が望ましい。しかし、実際には、解像度の制約、モデル化に伴う様々な仮定、未知のパラメータの存在、利用可能な観測データの制約等により、たとえ計算機能力が今より大幅に向上したとしても、当該理想の実現は容易ではない。

本項の一つの目的はSCALEをはじめとした領域気象モデルを使い始めるユーザーに対して、このような調整が時として必要であることを示すことである。実際にチューニングをするとなると、どの設定を調整可能なのか？どのパラメータをどのように修正すべきか？ということを知るのは容易ではない。そのような場合は、開発者をはじめとしたモデルのことをよく知る者とともに調整を行うことが重要となる。本稿を通してそのような調整の重要さを、新たに領域気象モデルを用いるユーザーに周知し、ユーザーの役に立つことができれば幸いである。

参考文献

1) 気象庁：天気予報の検証結果(令和6年の年集計): https://www.data.jma.go.jp/yoho/kensho/HPdata/HPdata2024/zc_2024.html (2025) (2025年9月30日 閲覧)
2) K. Saito, T. Fujita, Y. Yamada, J.-I. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito, & Y. Yamazaki: The Operational JMA Nonhydrostatic Mesoscale Model, *Mon. Wea. Rev.,* Vol. 134, pp.1226-1298 (2006)
3) J.-I., Ishida, K. Aranami, K. Kawano, K. Matsubayashi, Y. Kitamura, & C. Muroi: ASUCA: The JMA Operational Non-hydrostatic Model, *J. Meteorol. Soc. Jpn.,* Vol. 100, No. 5, pp.825-846, (2022)
4) W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, Z. Liu, J. Berner, W. Wang, J. G. Powers, M. G. Duda, D. M. Barker, & X.-Y. Huang: A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4, NCAR Technical Notes NCAR/TN-556+STR, (2008)
5) S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Sato, Y. Miyamoto, & H. Tomita: Influence of grid aspect ratio on planetary boundary layer turbulence in large-eddy simulations, *Geosci. Model Dev., Vol. 8, pp.* 3393–3419 (2015)
6) Y. Sato, S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, Y. Kajikawa, & H. Tomita: 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.,* Vol. 2 No, 23, doi: 10.1186/s40645-015-0053-6 (2015)
7) National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. NSF National Center for Atmospheric Research., doi:10.5065/D6M043C6. (2000) (2025年9月30日閲覧)
8) 岩井直太, 佐藤陽祐, 吉川栄一, 佐藤浩平, 足立邦夫：数値モデルを用いた航空機被雷危険領域の早期予測情報提供に向けた試み, *日本気象学会2024年秋季大会予稿集*, P427 (2024)
9) Y. Sato, S. Nishizawa, H. Yashiro, Y. Miyamoto, & H. Tomita: Potential of Retrieving Shallow-Cloud Life Cycle from Future Generation Satellite Observations through Cloud Evolution Diagrams: A Suggestion from a Large Eddy Simulation, SOLA, Vol. 10, pp. 10-14 (2014)

10) M. Kondo & Y. Sato: Transition of dominant cloud microphysical processes for increasing lightning preceding downbursts in multi-cell convective clouds, *Atmos. Res.,* Vol. 324, 108203, doi: 10.1016/j.atmosres.2025.108203, (2025)

11) T. Yanase, S. Nishizawa, H. Miura, and H. Tomita: Characteristic form and distance in high-level hierarchical structure of self-aggregated clouds in radiative-convective equilibrium. *Geophys. Res. Lett.,* Vol.49, e2022GL100000, doi:10.1029/2022GL100000, (2022)

12) 長谷川菜月，入江政安，永野隆紀，大江里奈，永井椋，宮原裕一，豊田政史，矢島啓：風の非一様性が諏訪湖の流動・水質に及ぼす影響に関する数値解析，特集号（水工学）Vol.81, No.16, https://doi.org/10.2208/jscejj.24-16024 (2024)

13) Y. Sato, S. Hayashi, & A. Hashimoto: 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.,* Vol. 23, e1067, doi: 10.1002/asl.1067 (2022)

14) 足立幸穂，吉田龍二，山浦剛，西澤誠也，佐藤陽祐，八代尚，梶川義幸，富田浩文：西日本夏季を対象としたSCALEの現在気候再現性評価，*日本気象学会 2015 年秋季大会予稿集*，P385 (2015)

15) Y. Kurihara, T. Sakurai, & T. Kuragano: Global daily sea surface temperature analysis using data from satellite microwave radiometer, satellite infrared radiometer and in-situ observations, *Wea. Service Bull.,* Vol. 73, s1-s18 (in Japanese)

16) H. Tomita, New Microphysical Schemes with Five and Six Categories by Diagnostic Generation of Cloud Ice, *J. Meteorol. Soc. Jpn.,* Vol. 86A, pp.121-142, (2008)