5.1 はじめに

現在、局地モデル (LFM) は JMA-NHM を用いて現 業運用されているが、この後継として asuca を利用す るための開発を行っている。2011 年度に JMA-NHM とほぼ同等の物理過程の組み込みが完了したことから、 その性能を確認するため、2011 年度末より当時の LFM と同等の設定で asuca による準リアルタイムの予報実 験 (以下、日々実験と呼ぶ)を行ってきた。また、LFM が 2013 年 5 月 29 日にその計算領域を日本域へと拡張 したことにあわせて、asuca の日々実験についても同 じく計算領域を拡張して引き続き実験を行っていると ころである。

本章では LFM 向けの設定で行った asuca の日々実 験の仕様と予測結果について述べる。以下、LFM 向け の設定とした asuca を「asuca 版 LFM」、JMA-NHM をベースとする現業運用中の LFM を「現 LFM」と記 述する。なお、本原稿執筆時点での asuca 版 LFM の開 発状況は、現業化に向けた最終調整を行っているとこ ろであり、LFM として現業に導入する段階では若干仕 様が変更となる可能性があることに留意いただきたい。

第5.2節では、asuca版LFMの日々実験の仕様について述べる。第5.3節ではいくつかの特徴的な事例の 予測結果を簡単に示す。第5.4節では、asuca版LFM と現LFMの積雲対流表現の比較や、数値実験の結果 から見えてきた両モデルに共通する課題についての現 状の理解を述べる。

5.2 日々実験の仕様

表 5.2.1 に asuca 版 LFM の日々実験の諸元を示す。 なお、asuca の力学コアの諸元については表 1.4.1 をご 覧いただきたい。物理過程は基本的には現 LFM と同 じスキームを選択しているが、物理過程ライブラリの 開発において個々のスキームで改良している点に加え、 開発段階の検討により変更を加えたもの及び今後の変 更を検討しているものがあるため、その点について触 れる。

初期値・境界値、格子設定等

asuca版LFMの初期値・境界値は、現LFMと同じ くそれぞれ局地解析とメソモデル予報値を利用する。 格子の設定は基本的に現LFMと同じである。テス トシステムの都合により、水平格子数はわずかに減ら

している。鉛直層数もモデルトップの1層を減らして 57 層としており、鉛直層間隔の設定も asuca 版 LFM と現 LFM で若干異なっている。現 LFM において、最 上層と最下層の2層は計算の便宜上設定されているも

* 河野 耕平、松林 健吾、倉橋 永

表 5.2.1 LFM としての利用に向けた asuca の実験設定。現 LFM(JMA-NHM) との比較を示す。現 LFM の鉛直層数 における「58(+2) 層」とは、現 LFM で 60 層としている 鉛直層のうち最上層と最下層の 2 層は計算の便宜上設定し ている層であり、物理量の予測は行なっていないため、こ のように表記している。

	現LFM	asuca版LFM
初期値	局地解析	
境界値	メソモデル予報値	
水平格子数	1581 x 1301	1571 x 1291
水平格子間隔	2km	
鉛直層数	58(+2)層	57 (+0)層
鉛直層間隔	40 - 661.5m	40 - 656m
鉛直座標	z [*] 座標	
地図投影法	ランベルト正角円錐図法	
側面緩和領域	180km(90格子)	
地形	GTOPO30(約3km相当に平滑化)	
積分時間間隔	8秒	50/3秒
予報時間	9時間	
雲物理過程	3-iceのバルク法(数濃度は予報しない)	
境界層過程	改良Mellor-Yamada Level3(原 2008)	
地表面過程	平板地表面モデル(原ほか 2008)	
雲放射過程	北川(2000)	
晴天放射過程	藪ほか(2005)	

ので物理量の予測は行なっていないが、この2層を合 わせて 60 層と数えることが多い。表中の「鉛直層数」 の「58(+2) 層」はこのことを意味する。これらは、い ずれも現業化段階では現 LFM と同じ格子数、層設定 にする予定である。また、鉛直座標は、この実験では 現 LFM と同じく z* 座標の設定であるが、現業化の際 は鉛直ハイブリッド座標 (Ishida 2007; 石田 2008) とす る予定である。

側面緩和領域とは第2.5節で述べた通り、人為的な 境界において水平方向に伝播した波が反射しないよう に設ける領域であり、その領域の予測値を側面境界条 件を与えるモデル結果に近づけるように人為的な時間 変化率を加えるための領域である。そのため、波が反 射しないための最低限の広さにすることが望ましい。 現 LFM では側面境界から180 km(90 格子)を緩和領 域としており、asuca 版 LFM においても同じ幅の緩和 領域としている。一方で、各国の他のモデルではより 狭い緩和領域を用いているものもある。例えば Unified Model では8 格子 (Davies 2014)、また、WRF-ARW のユーザーズガイド¹ によれば4 ないしは9 格子 (実

¹ http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/ user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf

験によって異なる)、COSMOのユーザースガイド²で は8格子としている。最適な格子数については現在調 査中であり、将来変更する可能性がある。

地形は現LFM と同じく GTOPO30(米国地質調査所 (USGS) による 30 秒メッシュの標高データ) から約 3 km(水平格子間隔の 1.5 倍) 相当の解像度に平滑化した 後に急斜面を除去した地形を用いているが、この処理 により小スケールの地形の起伏が生じることが確認さ れたため、現業化時点では急斜面を除去した後に平滑 化することを計画している。

積分時間間隔 Δt は、現 LFM の $\Delta t = 8$ 秒に対し、 asuca 版 LFM では $\Delta t = 50/3 \simeq 16.67$ 秒としている。 これは、asuca では Wicker and Skamarock (2002) の 3 段階ルンゲクッタ法の導入等により、積分時間間隔 を長くしても安定に計算できるようになったためであ る³。

雲物理過程

雲物理過程は、現 LFM と同様にバルク法により雲 水、雨、雲氷、雪、霰の質量の比を予報変数とし、数濃 度は予報しない (3-ice, 1-moment)。ただし、第4.1.1 項 で述べた通り、時間積分にはシーケンシャルスプリッ ティングを用いている。

境界層過程

境界層過程は、現LFMと同様に改良 Mellor-Yamada Level 3 スキーム (原 2008) を用いている。ただし、原 (2012) が述べている通り、このスキームは鉛直 1 次元 モデルによる評価を経て改良されており、asuca での 利用に際してはこの改良を取り込んでいる。

地表面過程

地表面過程については、現LFMと同じ平板地表面モ デル (原ほか 2008)を用いる。ただし、草開 (2012)で 述べられている通り、地表面と大気間の結合における 計算安定性を確保するためにインプリシットに結合す ることが望ましい。JMA-NHMには導入されていない が、物理過程ライブラリには境界層と地表面をインプリ シットに結合するカップラーが実装されており、asuca ではこれを用いている。なお、現時点で用いている地 表面過程は、土地利用状況ごとに決めたパラメータを それぞれの面積率で平均することによりサブグリッド スケールの不均一性を考慮しているが、本来は地表面 状態によって熱収支の特性は大きく異なるため、この 方法では十分とは言えない。現在、複数の地表面状態 が混在する格子においてそれぞれの熱収支を独立に計 算し、その面積率で平均化したフラックスを大気に返

² http://www.cosmo-model.org/content/model/ documentation/core/cosmoDyncsNumcs.pdf

³ 16 秒あるいは 17 秒でなく $\Delta t = 50/3 \simeq 16.67$ 秒という 設定は、 $\Delta t \times タイムステップ数が現状想定する最小出力時$ 間間隔 10 分に合う値 (50/3 秒 × 36 step = 600 秒) を選んだためである。 す方法 (タイル化)の開発を進めている。その手始めと して、海陸混在格子へのタイル化適用に向けて調査を 行っている段階である。

放射過程

放射過程は、現LFM と同じスキームを利用する。放 射過程は計算量が多いため、高速化を目的として空間 的・時間的に計算対象格子を間引くことがある。asuca 版 LFM では、時間間引きとして現 LFM と同じく 900 秒に1回計算しているが、現 LFM で行なっている空 間間引きに関しては asuca 版 LFM では行なわないこ ととした。これは、asuca と物理過程ライブラリとの コーディングにおける親和性を考慮したこと⁴による。

5.3 事例検証

本節では、実際の事例に対し、asuca 版 LFM と現 LFM を比較する。

強雨予測の確認

ここでは、まずいくつかの強雨事例を取り上げ、そ れぞれの強雨域の表現について確認する。図 5.3.1 に 平成 24 年 7 月九州北部豪雨、図 5.3.2 に平成 25 年 7 月の山口・島根の豪雨、図 5.3.3 に平成 24 年台風第 17 号について、解析雨量と asuca 版 LFM 及び現 LFM の 降水予測の結果を示す。概ねいずれの事例においても 特徴的な強雨域が両モデルとも表現されていた。以下、 個々の事例について詳しく見てみる。

図 5.3.1 (平成 24 年 7 月九州北部豪雨) では、両モ デルとも線状の強雨帯を表現できている。しかし、他 の初期時刻では強雨域の予測位置が実況とずれてしま う結果や強雨域を予測できなかった例もあった。これ らの初期時刻においては、asuca 版 LFM と現 LFM で 同じように強雨域がずれ、強雨を予測できなかった。 この事例では、asuca と JMA-NHM の違いよりも初期 値・境界値の違いが大きいと考えられる。

図 5.3.2 (平成 25 年 7 月の山口・島根の豪雨)では、 両モデルともに山口県・島根県境の強雨域を表現でき ている一方、山口県中央部の強雨ピークを表現できて いない点、四国にかかる降水帯の表現が過剰である点 も両モデルで共通している。また、降水のピーク値に ついても、両モデルで同等の値となっている。

図 5.3.3 (平成 24 年台風第 17 号)では、紀伊半島に 見られる実況の強雨域を両モデルともに良く表現し、 紀伊水道の降水ピークも表現している。ただし、日本 海の降水帯は両モデルとも揃って表現できていない。台 風の示度を実況と比較するため、同予想による潮岬に おける海面更正気圧の時系列を図 5.3.4 に示す。asuca

⁴ 物理過程ライブラリは鉛直1次元で構築されており、asuca からはその呼び出しをカラムごとに行っている。物理過程の 組み込みに際し、この基本構造を保つには空間間引きを行わ ないほうが望ましい。



図 5.3.1 2012 年 7 月 12 日 06JST の前 3 時間積算降水量 (mm)。左から解析雨量、asuca 版 LFM の 6 時間予測値、現 LFM の 6 時間予測値



図 5.3.2 2013 年 7 月 28 日 09JST の前 3 時間積算降水量 (mm)。左から解析雨量、asuca 版 LFM の 6 時間予測値、現 LFM の 6 時間予測値



図 5.3.3 2012 年 9 月 30 日 15JST の前 3 時間積算降水量 (mm) と海面更正気圧 (hPa)。左から解析雨量、asuca 版 LFM の 9 時間予測値、現 LFM の 9 時間予測値



図 5.3.4 2012 年 9 月 29 日 21UTC 初期値の潮岬における 海面更正気圧の実況値 (緑色)、asuca 版 LFM(桃色)、現 LFM(青色)の予測の時系列。横軸は予報時間であり、FT=0 は 9 月 30 日 06JST、FT=9 は 9 月 30 日 15JST に相当 する。

版 LFM と現 LFM で海面更正気圧もほぼ同じ予想と なっており、実況との対応がよいことがわかる。

この他の事例について見ても、ほとんどの場合で asuca 版 LFM と現 LFM では大きな予想の差は見ら れていない。

日々実験ではモデルの特性を確認することと合わせ て、計算安定性の確認も行なっている。上の事例に見 られる集中豪雨や台風のような強い降水や上昇流が生 じる事例に対しても計算不安定を起こさず計算できる ことをこれまでの実験で確認できている。

平成 24 年 8 月の猛暑

平成 24 年の夏は全国で猛暑となり、特に 8 月上旬 から中旬にかけて太平洋側を中心に気温が著しく高く なった。中でも、8 月 11 日は本州を中心に概ね晴天と なり、関東平野の多くの地点で 35 度を超えた。当日の 関東の気温予想と実況を図 5.3.5 に示す。地上気温予想 は asuca 版 LFM と現 LFM の予想で概ね一致している ことが分かる。また、最高気温が 39.3 度まで上昇した 埼玉県熊谷の気温の予想と実況の時系列を図 5.3.6 に 示す。このように、時系列で見ても asuca 版 LFM と現 LFM の予報の傾向は大きく変わらないことが分かる。

夏季の 24 事例を対象に、asuca 版 LFM と現 LFM でアメダス地上気温との比較検証 (瀬川・三浦 2006) を 行った結果を図 5.3.7 に示す。この結果から、asuca 版 LFM と現 LFM で同じような地上気温バイアスがある ものの、asuca 版 LFM は現 LFM よりバイアスが低減 しており、平方根平均二乗誤差の改善も確認されてい る (図略)。

平成 24 年 12 月の冬型事例

平成24年12月25日は、北海道の東に発達した低気 圧があり、北海道と本州を中心に強い冬型の気圧配置 となった。平成24年12月25日21時JSTを対象とし た予想衛星画像⁵と、対応する実況の衛星赤外画像を 図5.3.8に示す。この結果から、日本海における雲域は asuca版LFMと現LFMでほぼ似た予想をしているも のの、東シナ海や日本の南海上では asuca版LFMの 方が現LFMより雲域を広く予想しており、実況との 対応が良いことが分かる。

この事例に限らず、asuca版LFMでは現LFMに比べて特に冬型時に下・中層雲が多く予想される傾向があり、実況との対応がよい。また、短波放射量の地上観測値との比較においても、改善の傾向が得られている⁶。

日々実験の結果から

これまでの日々実験から、asuca版LFMと現LFM の間で大きな予報特性の変化は確認されておらず、本 節で示したように地上気温や雲域の予想が改善する結 果が得られている。また、日々実験を通じてモデル間 の相互比較を行うことによって、今まで現LFMに内 在していた問題点がより明確になってきており、今後 の予測精度向上につながる知見も得られている。この ような実験を積み重ねることにより、今後のモデルの 精度向上に取り組んでいきたい。

5.4 積雲対流発生の表現の課題

永戸ほか (2013) は、現 LFM における積雲対流の扱 いの課題⁷のひとつとして、積雲対流のイニシエーショ ンに関する表現が不十分であること、その結果、対流 の発生が遅れやすい傾向があることを指摘している。

本節では、現業 LFM が抱える積雲対流のイニシエー ションの課題に関して、asuca 版 LFM と現 LFM のモ デル予報値の水平波数スペクトル分布における高波数 成分との関係から見えてきた特徴について現状の理解 を述べる。

5.4.1 高波数成分と対流の発生との関係

前節では、asuca 版 LFM と現 LFM とを比較し、降 水予測結果がほとんど変わらないことを述べたが、こ のことは、現 LFM の課題である対流発生が遅れやす い傾向についても言え、asuca 版 LFM でも同様の課題 がある。また詳細に見ると、asuca 版 LFM は現 LFM と比べて対流の発生が(わずかではあるが)さらに遅 れやすい傾向が見られた。

一方、第2.7節で述べた JMA-NHM の数値拡散の強 さを変更する数値実験について、その降水分布図を確 認したところ、数値拡散を強めていくにしたがって対

⁵数値予報モデルの物理量から衛星固有の情報を加味して計 算し、衛星画像として可視化した資料 (大和田 2006, 2013)。 ⁶ただし、この予想衛星画像の雲は放射過程で用いている雲 量ではないことに、注意が必要である。

⁷ 積雲パラメタリゼーションを用いない水平格子間隔 2 km のモデルが直面している問題



図 5.3.5 2013 年 8 月 11 日 12JST の地上気温。左から実況値、asuca 版 LFM 予報値の 6 時間予報値、現 LFM 予報値の 6 時 間予報値。



図 5.3.6 2013 年 8 月 11 日 21UTC 初期値の asuca 版 LFM(赤実線) と現 LFM(赤破線)の熊谷の地上気温予想。 茶線は実況値を表す。縦軸は気温を、横軸は時間を表し、左 端が FT=0(8 月 10 日 06JST)、右端が FT=9(8 月 10 日 15JST)。



図 5.3.7 2012 年の夏季の 24 初期値を対象とした地上気温の 予報時間別検証結果(平均誤差)。赤線が asuca 版 LFM の 検証結果、緑が現 LFM の検証結果を表す。



図 5.3.8 2012 年 12 月 25 日 21JST の実況と予想の衛星赤外画像。左から実況、asuca 版 LFM の 9 時間予報値、現 LFM の 9 時間予報値。

流の発生が遅れるという傾向が見られた。数値拡散を 施さない場合と現 LFM よりも数値拡散を強くかけた 場合の JMA-NHM の降水予測結果を図 5.4.1 に示す。 数値拡散を施さない場合(左図)に比べて、数値拡散 を強くかけた場合(右図)は対流の発生が遅いことが 分かる (全体的に、より下流の東側から降水域が始ま る)。スペクトル分布の観点からは、数値拡散を強めて いくにしたがって高波数側のスペクトル密度が小さく なる関係にある(図 5.4.2)。

積雲対流の発生条件としては、大気の成層状態が潜 在不安定であることに加えて、空気塊を自由対流高度 まで持ち上げる強制上昇の存在が必要である。この強 制上昇としては、地形によるもの、風の収束によるも の、混合層の発達によるものなどがある。モデルにお いて対流の発生を適切に表現するには、この強制上昇 を適切に表現する必要がある。積雲対流を発生させる 地形や風の収束による強制上昇の水平スケールは、積 雲対流のスケールから考えると数 km 程度以下の小さ なスケールである場合が多いと考えられる。したがっ て、水平格子間隔 2 km のモデルでは、高波数成分に 相当する小さなスケールの現象の表現が、対流の発生 に重要な役割を果たすと言える。

一方、この JMA-NHM の実験結果は、モデル内に存 在する数値スキームに起因する高波数の数値振動(ノ イズ)によっても対流が発生してしまうことも示して いる。このことは、例えば Bryan (2005)等によって指 摘されており、また、asuca における以下の数値実験で も確かめられている。asuca において、高波数側のエ ネルギーが大きくなると対流発生が早くなることを確 認するために、温位の移流項の計算に中央4次差分ス キーム⁸を使って意図的にノイズを生成する数値実験 を行ったところ、極端に対流の発生が早まる結果が得 られている⁹。つまり、第2.7.2 項でも述べたように、 実効解像度以下のスペクトル分布が実大気に近い方が 必ずしも良いとは限らない(ここでは、対流発生が早 まる傾向はあるが、その対流の発生が必ずしも正しい とは限らない)ことを示している。

上記の実験結果からは、高波数のノイズが偽の対流 を生じさせうることも含め、モデル予報値の高波数成 分が対流の発生に重要であることが分かった。このこと を踏まえて、図 5.4.3 の asuca 版 LFM と現 LFM のス ペクトル分布と両モデルに共通する積雲対流発生が遅

れるという課題との関係について考える。図5.4.3のス ペクトル分布に対応する降水分布図を図 5.4.4 に示す。 asuca 版 LFM (中図) と現 LFM (右図) の降水予測結 果を比較すると、この事例においても概ね同等の結果 であるが、詳細を見ると、asuca 版 LFM は現 LFM に 比べて対流の発生がわずかに遅れる傾向が見られてい る。asuca 版 LFM と現 LFM のスペクトル分布におけ る高波数成分と積雲対流の発生との関係は上記の実験 から得た結果と整合している。しかし、上記の実験結 果を踏まえて図 5.4.3 で最も注目すべきことは、asuca 版 LFM、現 LFM ともに対流発生に必要な強制上昇と いったスケールの現象が表現できていない(解像でき ていない)ことであると考えている。ただし、高波数 のノイズが偽の対流を生じさせうることを考慮すると、 実効解像度以下のスペクトル分を実大気のそれに単に 近づければ良いわけではない。解像できないスケール の高波数成分はできるだけ取り除いた上で、その効果 をパラメタイズすることが一つの選択肢であると考え ている。

5.4.2 積雲対流発生の表現についての今後の課題

本節で示した、asuca の開発過程において実施した 数値実験の結果からは、モデルでの積雲対流の発生に は、高波数の数値振動(ノイズ)が偽の対流を生じさ せうることも含めて、モデル予報値の高波数側に相当 する小さなスケールの現象の表現が重要であることが 分かった。これにより、現業 LFM が抱える積雲対流 の扱いについての問題点がより明確になってきたと考 える。高波数側でエネルギーを減衰させる措置は、モ デルの離散化に起因する必要な措置ではあるものの、 asuca版 LFM、現 LFM のスペクトル分布は、両モデ ルともにそのスケールの現象の表現が不足しているこ とを示唆している。表現が不足している高波数側の効 果を何らかの方法で正しく表現していくことが今後の 課題である。現在、物理過程の開発において、対流発 生に対する高波数成分の効果をパラメタライズするア プローチを試みているところである (原ほか 2013)。

5.5 終わりに

本章では、asuca の局地モデルとしての現業化に向 けた開発の現状について述べた。

第 5.2 節では asuca 版 LFM の仕様について説明し た。格子および層設定、計算領域等の基本的な仕様は 現 LFM から変更する予定はない。物理過程は基本的 には現 LFM と同じスキームを選択しているが、物理 過程ライブラリの開発における個々のスキームの改良 が取り込まれている。

第 5.3 節 では、いくつかの特徴的な事例に対して現 LFM による予測結果と比較することにより asuca 版 LFM の予測結果を確認した。現状、asuca 版 LFM と

⁸振幅の減衰は小さいが、分散性(波数により位相誤差が異 なる)の誤差が大きくノイズを生じさせやすい。例として、 一様流の1次元移流のテスト(第2.6.2項)で時間積分にリー プフロッグ法、移流スキームに中央4次差分スキームを用い て矩形波を移流させると分散性の誤差によってノイズが生じ るが(図2.6.2)、この結果はスペクトル分布の観点(振幅の 大きさ)では解析解と一致する。

⁹ ただし、この場合の温位のスペクトルは図 2.7.1 の右図に 示したような、高波数側がめくれあがった適切でない分布に なる。



図 5.4.1 2011 年 7 月 28 日 12JST の前 6 時間積算降水量 (mm)。JMA-NHM の 9 時間予報値。(左)数値拡散を施していな い。図 5.4.2 のスペクトル分布図において最も上側に位置する線に対応する結果。(右)数値拡散を強めた。図 5.4.2 のスペ クトル分布図において最も下側に位置する線に対応する結果。



図 5.4.2 図 2.7.3 を再掲。温位の水平波数スペクトル分布。 JMA-NHM の数値拡散の強さを変更した結果。数値拡散を 強めていくにしたがって高波数側のスペクトル密度が小さ くなる。

現 LFM の間で大きな予報特性の変化は確認されてい ないが、地上気温や雲域の予測が改善する結果が得ら れている。asuca の局地モデルとしての現業化に向け た開発は現時点では最終段階であり、今後、現業化ま でに細部の調整を図る予定である。しかし、現業化当 初の予測精度という面では、本章で示した内容と大き く変わることはないと考えている。

第 5.4 節では、水平格子間隔が 2 km という状況に おいて積雲対流を如何に表現していくかという現 LFM



図 5.4.3 図 2.7.2 を再掲。温位の水平波数スペクトル分布。 赤が現 LFM(JMA-NHM), 緑が asuca 版 LFM。asuca 版 LFM は現 LFM よりも高波数側のスペクトル密度が小さい。

から抱える課題について、asucaの開発過程で見えて きた現状の理解について報告した。これまで、asuca及 び物理過程ライブラリの現業化に向けた開発を行って きた中で、今までに内在していた現 LFM の課題がよ り明確になってきたところもあり、今後の予測精度向 上につながる知見を得ている状況にあると考えている。 これらの知見を活かしつつ、引き続き改良に努めてい きたい。



図 5.4.4 2011 年 7 月 28 日 12JST の前 6 時間積算降水量 (mm)。(左)解析雨量、(中) asuca 版 LFM の 9 時間予報値、(右) 現 LFM の 9 時間予報値

参考文献

- Bryan, G. H., 2005: Spurious convective Organization in simulated squall lines owing to moist absolutely unstable layers. *Mon. Wea. Rev.*, **133**, 1978–1997.
- Davies, T., 2014: Lateral boundary conditions for limited area models. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 140, 185–196.
- 永戸久喜, 原旅人, 倉橋永, 2013: 日本域拡張・高頻度 化された局地モデルの特性. 平成 25 年度数値予報研 修テキスト, 気象庁予報部, 18–41.
- 原旅人, 2008: 改良 Mellor-Yamada モデル. 数値予報 課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 128–132.
- 原旅人, 大泉三津夫, 三浦大輔, 2008: 地表面過程. 数値 予報課報告・別冊第54号, 気象庁予報部, 166-194.
- 原旅人, 2012: 鉛直 1 次元モデルによる評価 (1)-雲のな い陸上の境界層の日変化 (GABLS2). 数値予報課報 告・別冊第 58 号, 気象庁予報部, 138–149.
- 原旅人, 河野耕平, 石田純一, 松林健吾, 永戸久喜, 2013: 現業高解像度モデルにおける対流の表現とその課題・ 解決に向けた試み. 第15回非静力学モデルに関する ワークショップ講演予稿集.
- 石田純一,2008: 気象庁非静力学モデルの支配方程式系 と地形に沿う鉛直ハイブリッド座標の導入. 数値予 報課報告・別冊第54号, 気象庁予報部,27-43.
- Ishida, J., 2007: Development of a hybrid terrainfollowing vertical coordinate for JMA Nonhydrostatic Model. CAS/JSC WGNE Res. Activ. Atmos. Oceanic Modell., 37, 309–310.
- 草開浩, 2012: 地表面過程. 数値予報課報告・別冊第58 号, 気象庁予報部, 29-41.
- 大和田浩美, 2006: 予想衛星画像. 気象研究ノート, **212**, 105–120.

- 大和田浩美, 2013: 予想衛星画像. 数値予報課報告・別 冊第 59 号, 気象庁予報部, 76-80.
- 瀬川知則, 三浦大輔, 2006: 統計検証. 平成 18 年度数値 予報研修テキスト, 気象庁予報部, 59-83.
- Wicker, L. J. and W. C. Skamarock, 2002: Time-Splitting Methods for Elastic Models Using Forward Time Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2088– 2097.