

気象庁非静力学モデルの現業化と メソスケール気象予測の高度化研究

—2015年度岸保賞受賞記念講演—

齊 藤 和 雄*

1. はじめに

この度は日本気象学会より岸保賞を頂き、誠に有難うございました。数値予報の大家であられた岸保勘三郎先生のお名前を冠した賞の重さに恐縮するとともに、推薦そして選考下さった先生方に厚くお礼申し上げます。受賞理由となった「気象庁非静力学モデルの現業化とメソスケール気象予測の高度化を通じた社会貢献」は、いずれも一人で行ったことではなく、グループで一緒に仕事をして下さった多くの方々に深く感謝致します。

ここでは選定理由に沿って、1) 気象研究所での非静力学モデル開発、2) 数値予報課での非静力学モデル現業化、3) 気象研究所でのメソ気象予測高度化研究、の3つのテーマについて主に紹介したいと思います。この内、1)については、2000年に日本気象学会賞を頂戴した時にも一部解説している(齊藤 2001a)ので、重複する部分については簡単に触れるのみとし、2)と3)を中心に解説します。以下ではお名前の後の所属は、気象庁や気象研究所については省略して表記します。

2. 気象研究所での非静力学モデル開発

2.1 気象研究所への異動

私は1988年4月に気象庁予報部数値予報課から気象研究所予報研究部第一研究室に異動しました。当時の研究室長は、私の気象大学時代時代の卒業研究論文「気

象擾乱の時間積分とノイズの減衰法について」(齊藤 1980)の指導教官であった近藤洋輝さんでした。上記は、「松野スキーム」とも呼ばれる Euler-backward の繰り返し時間積分法を低周波成分と高周波成分に項分離した浅水方程式系に適用し、各成分の増幅率を調べる研究でした。卒業研究を行った1978年に気象大学校にあった計算機は、FORTRAN コードを紙テープや磁気ドラムで保存編集する HITAC のものでした。増田善信さん(元予報研究部室長)が気象庁の電子計算機室で開発されたという2次元の格子点値を3次元スプライン内挿して数字と空白でプリンタ用紙にコンターを引く「コントマ」を使って、等高線をプリンタ(ラインプリンタではなく、タイプライタが1文字ずつ印字するもの)に出して、それを1枚ずつ8mm テープカメラで撮影して浅水波が拡がる様子を動画にしたりしました。低周波成分の全エネルギーを保存させるためのアイデアが卒業研究中に浮かんで、卒業研究の内容を気象集誌に論文(Kondo *et al.* 1982)としてまとめることが出来ました。

気象大学校を卒業後、最初の赴任地であった福岡航空測候所では、増田善信さんの数値予報に関するご著書(増田 1981)の輪読会を職場で持ったり、山口栄治さん(元関西航空地方気象台長)の人脈で九州大学の気象学教室に顔を出したりしました。その後の異動先となった、気象衛星センターや予報部数値予報課では、高野 功さん(現台風研究部部長)、平 隆介さん(元関西航空地方気象台長)、横山 博さん(元総務部参事官)、馬場(野村)厚さん(故人)らと報告や論文を書かせて頂くとともに、櫃間道夫さん(元観測部長)、二宮洸三さん(当時数値予報課長、元気象庁長官)、長谷川直之さん(現仙台管区気象台長)ら

* 気象研究所, ksaito@mri-jma.go.jp

—2015年9月28日受領—

—2015年12月10日受理—

に大変お世話になりました。

気象研究所では、近藤さんがメソモデルに関する論文の輪読を中心とするゼミを催して下さり、青梨和正さん（現台風研究部室長）、原 昌弘さん（現地地磁気観測所課長）らと、Takeda (1971) や Klemp and Wilhelmson (1978) などの湿潤対流の数値モデリングに関する論文を勉強させて頂きました。

2.2 山越え気流の研究と実地形シミュレーション

私が予報研究部に配属された当時、第一研究室では、1991年に急逝された猪川元興さんが非静力学モデルの開発を進められていて、最初の研究として四国の局地風「やまじ風」のシミュレーションをやってみることを薦められました。猪川さんのモデルは Clark (1977) の定式化を参考にした地形に沿った座標系を用いる非弾性方程式系の非静力学モデルでしたが、1988年の時点では、開放境界条件にまだ問題があって、猪川さんご自身は、数値実験は主に周期境界条件で実行されていました。私は将来的に実地形のシミュレーションを行いたかったので、山を入れて開放境界条件でモデルがきちんと動くようにすることから始めました。このために側面放射境界条件を見直すとともに、タイムフィルタや側面境界の質量フラックスの総和などに関する細かなバグの修正を行いました。また実地形ファイルや大気鉛直プロファイルを外部から与えて前処理を別プログラムで行うようにコードを作り変えました。数値実験にあたってのもう一つの改良として、碎波に伴う計算不安定に対処するために上部吸収層の取り方を変更するとともに、対流モデル用に設計されていた Klemp and Wilhelmson (1978) の乱流クロージャモデルを、Deardorff (1980) に基づいて、安定大気に対しては混合距離が小さくなるようにするとともに逆プラントル数や粘性消散率を混合距離の関数にするように手直しを行いました。

解放境界条件でモデルが大きな問題なく動くようになったため、実験の設定を少しずつ現実に近づけながらシミュレーションを行っていきました。やまじ風については、1987年4月21日に発生した事例について、鹿児島と潮岬の高層観測データに基づく大気鉛直プロファイルを用いて、一般風を次第に強めていく実験を2次元モデルで行い、愛媛県の三島消防署で観測された風の時間変化がある程度再現できることを示し、やまじ風概念モデルを提唱しました (Saito and Ikawa 1991)。また3次元の山に対する線形山岳波の解析解 (Smith 1980) とモデルの比較を行うとともに

に、関東地方の実地形で海陸風のシミュレーションを行った結果を、気象研究所技術報告 (Ikawa and Saito 1991) と天気 (斉藤・猪川 1992) に発表しました。一連のモデル開発については、気象庁の全国予報技術検討会資料に、1989年から1997年まで、6回報告させて頂きました。

猪川さんは1991年12月23日に、睡眠中の心不全により42歳の若さで急逝されました。生前猪川さんは全くの健康体で、亡くなる直前の21日も土曜の午後の研究室でモデルについての議論をしていたところでした。あまりに突然の鬼籍入りに、年末に執筆中だった1991 (平成3) 年度の全国予報技術検討会資料に葬儀直後の思いを「追記」として書かせて頂きました。また翌年ご親族 (加藤照之東大地震研教授) が編纂された猪川さんの著作集について、「天気」の「会員の広場」 (斉藤 1992) に紹介させて頂きました。

やまじ風の研究については、モデルを3次元にして鞍部を伴う山脈における線形と非線形レジームの山越え気流のシミュレーションを行い、線形解析解を用いた理論的考察を行うとともに、1987年4月のやまじ風を四国の一部の地形を用いた矩形領域のモデルで再現する実験を行いました。この論文 (Saito 1993) は、私が書いた論文の中でも最も気に入ったものの一つになりました。

1991年9月、後に「りんご台風」などとも呼ばれる台風第19号による影響で、日本海に入った台風本体からはるかに離れた四国山地北側の支脈である鳳凰山脈で四国電力中央東幹線の大規模送電鉄塔12基が倒壊する大きな被害が出ました。四国では40 m/s を超える瞬間風速を記録した気象官署は無かったのですが、鉄塔に設置されていた地上高27.5 m の風速計で鉄塔の倒壊直前に65 m/s を超える風がスケールアウトして記録されました。またこのときは、市街地にある三島消防所でも62 m/s という驚くべき瞬間風速が記録されました。この事例についての現実的なシミュレーションをネスティングモデルを開発して行いました (Saito 1994)。ネスティングモデル作成に際しての改良点として、基本場を初期場の水平平均で求めてモデル内では3次元配列で持つようにし、海面水温、地表面粗度、ウェットネスをモデルに導入しました。モデルの初期条件と境界条件は当時の気象庁の現業領域予報モデルだった日本域スペクトルモデル (JSM) の予報値を内挿しました。連続の式を強い拘束条件に変分法を用いて風速の3成分を修正し非発散の初期場を

作成しました。修正量は3次元ポアソン方程式を逐次緩和法で解いて求めました。実験は、外側10 km、内側2.5 km 格子間隔の非静力学モデルで行い、降水過程を考慮しないドライモデルながらアメダスの各地点や鉄塔で観測された風の時間変化が良く再現されていました。日本で初めての非静力学モデルを用いた実事例の予測実験でした。なおこの1991年のやまじ風被害を契機として、通商産業省（当時）の音頭で電力中央研究所に「局地風対策研究推進委員会」が設置され、2000（平成12）年度まで特別委員をさせて頂きました。

気象集誌に掲載された上記3つのやまじ風に関する論文と、谷間地形に山脈がある場合の浅水流に生じるハイドロリックジャンプについての理論的考察（Saito 1992）を合わせて、学位論文（Saito 1995）にまとめました。学位論文の提出に関して、東京大学（当時）の山岬正紀先生、予報研究部にいらした永田雅さん（現気象研究所長）には大変お世話になりました。なお、おろし風を中心とする山越え気流についての解説は、斉藤（1994）に報告しています。

上記の他、山越え気流と地形性降水に関する数値実験による研究を2つ行いました。一つは名古屋大学水圏科学研究所（当時）の故武田喬男先生との科研費研究「地形効果による降雨の強化・集中化機構に関する研究」における紀伊半島での地形による降水増大に関する数値シミュレーションと線形解析解に関する考察に関する論文（Saito *et al.* 1994）で、紀伊半島風上側下層では斜面上と別にブロッキング（安定大気中で山に向かう気流が山を越えられない現象）に伴う2次元的な上昇流のピークが海上にあり、一般風が小さいほど海上のピークは風上側に生じることを示しました。もう一つは村上正隆さん（元予報研究部室長）らと行った科学技術庁振興調整費研究「降積雪対策技術の高度化」での日本海側山岳地系での降雪に関するシーディングの効果を含めた感度実験（Saito *et al.* 1996）で、地形性降雪には氷の過程が重要で、warm rain では山岳斜面上で凝結した雲水は十分な降水に転換する前に風下側に出てしまうこと、降水効率の増大には山による持ち上げ効果のみではなく、温度低下に伴って氷晶数が増大する天然の種まき効果が重要であることなどを示しました。また日本海上の特定の場所で氷晶生成を促進する実験を行い、人工的な種まきによる降雪の抑制あるいは促進の可能性を示しました。

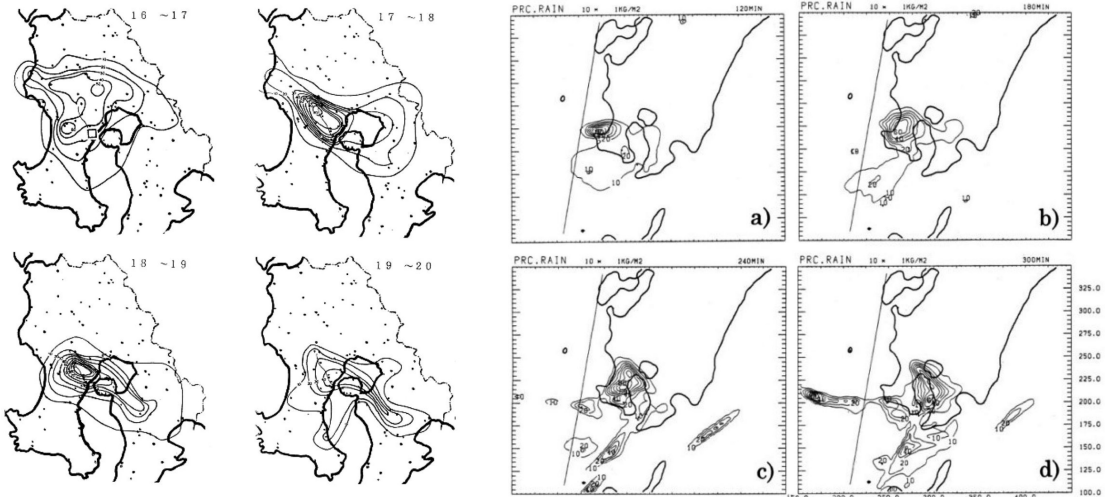
2.3 気象研究所非静力学モデル（MRI-NHM）の開発

モデルである程度再現実験ができるようになったので、次に行ったのは、降水を含む事例についての予報実験が可能な本格的メソモデルを開発するということでした。基礎方程式系として、それまで実験に用いていた非弾性方程式からマップファクターを含む完全圧縮系にし、密度を場所と時間の関数として状態方程式から診断して、浮力項は温位の摂動からではなく密度の摂動から直接（厳密に）求めるようにしました。音波の扱いとしては、水平鉛直とも陰解法を用いるセミインプリシット法（HI-VI法）を用いました。HI-VI法では非弾性モデルで出てくる楕円型の気圧方程式の直接法による解法が応用出来るという利点がありました。また気圧方程式の下部境界条件を変更して、実事例のシミュレーションのように地風面摩擦がある場合にはそれまで行っていた直接法での繰り返し計算をやめる高速化を行いました。なお論文にはしなかったのですが、この頃直接法に高速フーリエ変換（FFT）を用いるオプションも作成しています。残念ながら100×100程度の問題サイズではループ長が短くなって当時主流だったベクトル型のスパコンでは計算時間短縮のメリットが得られませんでした。

モデルが水物質を含む場合でも浮力項を密度摂動から直接求めるため、密度を単位体積当たりの湿潤大気と含まれる水物質の質量の総和で定義し、水物質の重みを考慮した仮温位「質量仮温位」を導入しました。雨、雪、あられなどの降水に伴う密度の時間変化を連続の式に考慮するため、空気に対する相対的な終端落下速度に基づく質量変化の項を連続の式の右辺に加え、フラックス形式についても補正しました。

マップファクターの導入としては、JSM に倣ってポーラステレオ投影を用い、運動方程式には地球曲率に関する項も評価できるようにしました。連続の式の体積積分により親モデルの平均気圧の変化から側面境界条件で与える質量フラックスの総和を決めるようにしました。これらの詳細については、斉藤（1999a, 2001a）に述べています。

平成5年8月豪雨の予報実験に改良したモデルを適用した論文に Saito（1997）があります。第1図の左は、1993年8月6日16-20時における1時間ごとの観測降水量、右は8月6日15時を初期値とする水平格子間隔5 km の非静力学モデルによる同時刻の降水量です。観測された鹿児島県での降水域の集中や移動が良



第1図 左) 1993年8月6日16-20時における1時間降水量。櫻井・細山田 (1994) より。右) 8月6日15時の初期値とする水平格子間隔5 kmのMRI-NHMによる同時刻の降水量。Saito (1997) より。

く表現されています。またこの事例のアメダス地表風では、メソ対流系に伴って低気圧性の局地循環が解析されていましたが、それについても5 kmのモデルで大変良く再現されていました。

1996年の気象庁現業領域予報モデルの領域スペクトルモデル(RSM)への更新に対応して、鉛直座標系の変更($\sigma \rightarrow \sigma-p$ ハイブリッド)や地図投影法の変更(ポーラステレオ→ランベルト)への対応なども追加しました。モデルにはこのほか、加藤輝之さん(現予報研究部室長)が雨滴の落下の計算にBox-Lagrangian法を導入し、積雲対流スキームや地表面温度の予測、移流補正スキームも追加してくれました(Kato 1995; Kato and Saito 1995)。これらにより、気象研究所非静力学モデルMRI-NHM(斉藤・加藤1996)として、様々な研究に広く利用できるようになりました。

2.4 MRI-NHMに関する研究プロジェクト

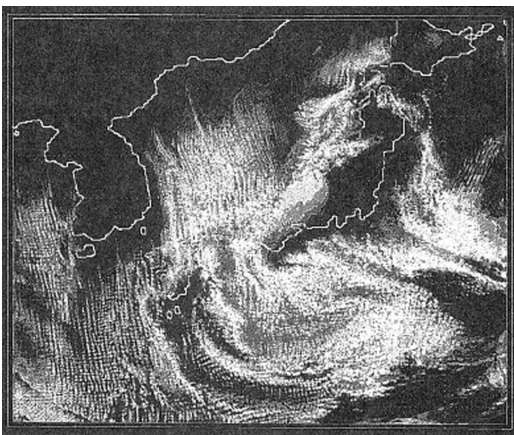
MRI-NHMに関していくつかの国際的な共同研究や試みを行いました。特に印象深かったものとして、科学技術庁日豪科学技術交流研究員制度でオーストラリア気象局研究センター(BMRC)に1年間滞在する機会があり、1995年11月から12月にかけてオーストラリア北部準州のMelville島とBathurst島(Tiwi諸島)で行われた海洋性大陸雷雨観測実験MCTEX(Maritime Continent Thunderstorm Experiment; Keenan *et al.* 2000)に数値モデリングの立場で参加

したことがあります。この地域は“Boiler-box”の異名をとる地球上で最も対流活動が活発な地域の一つで、Hectorと呼ばれる日変化性の積乱雲が出現することで知られています。MCTEX期間中に観測支援のためにBMRCが特別運用した領域モデル(LAPS)に2.5 kmと1 kmのMRI-NHMを2重ネスティングし、Tiwi諸島に発生する日変化性対流雲の発展をシミュレートしたもので、海風前線面に沿って生じる積雲列や、海風側での水平対流ロール、島の内側でのオープンセル型の多角形をしたRayleigh-Benard対流状の擾乱に伴う積雲の発生、午後の海風前線の侵入による収束域のマージとそれに引き続く深い対流の発達など、観測された対流の日変化が良く再現されました。この論文(Saito *et al.* 2001a)は、現在でも国外研究者からも多く引用して頂いています。

1997年には秋に1か月間、招聴短期客員科学者としてドイツ気象局研究開発部に滞在する機会があり、欧州で現業利用されている非静力学数値予報モデルCOSMOの前身となったLokal-Modell(LM)とMRI-NHMについて、ドイツ気象局のスパコンCRAY C-98を用いて山岳波の表現や計算効率の比較を行いました(Saito *et al.* 1998)。LMは水平方向を陽解法してタイムスプリットを行うHE-VI法を用いており、MRI-NHMで用いているHI-VI法に比べて短いタイムステップで計算する必要がありますが3次元の楕円方程式を解かなくても良いという利点が

あります。論文の知見としては、MRI-NHMの1回の3次元楕円方程式直接解法に要するCPU時間は、LMの1回あたりの小さなタイムステップによる積分に要するCPU時間の2倍強で、音速に対するクーラン数と楕円方程式直接解法の繰り返し計算の回数的大小関係が、どちらのモデルがより効率的になるかを定める大まかな目安となる、というものでした。この滞在では、Smith (1980) の論文に基づいて作成した3次元山越え気流の線形解析解を計算するプログラムをドイツ気象局の要請で置いてきたため、現在でも論文を引用して頂いています。

今日のスパコンでは常識となっている分散主記憶型並列計算機が1990年代の後半から出回るようになりました。科学技術庁では1997年3月に計算科学技術推進会議の下に地球シミュレータ部会を設置し、640ノード(5120CPU)から構成される当時としては世界最高速の並列ベクトル計算機を開発する「地球シミュレータ」計画を策定しました。これを受けて、科学技術振興調整費研究「高精度の大気・海洋変動予測のための並列ソフトウェア開発に関する研究」(研究代表者は東京大学(当時)住 明正先生)が行われ、副課題「非静力学モデルの最適化並列プログラム構築に関する研究」に数値予報課の室井あしさん(現札幌管区気象台部長)らとサブ課題代表者として取り組みました。MRI-NHMの並列化が、公益法人高度情報科学技術研究機構の協力も得て行われました(斉藤ほか1999)。



第2図 並列化したMRI-NHMによる寒気吹き出し雲のシミュレーション。IDLによる可視化。斉藤(2001b)より。

第2図は、1999年3月に気象研究所に導入された初めての分散主記憶型並列計算機型のスパコンHITAC-SR8000を用いた並列計算による寒気吹き出し雲のシミュレーション(斉藤2001b)です。鉛直積算した雲水量を気象研究所に導入されている対話型データ処理言語IDL(Interactive Data Language)を使って可視化しました。僅か4ノードによる計算で水平格子間隔は3kmと、今日の視点からは雲解像モデルとしては必ずしも十分ではない実験ですが、この画を始めて目にしたときは自分でも大きな驚きでした。この図は、大きなパネルとなってお台場にある日本科学未来館に数年間展示された他、東京大学から北海道大学を経て海洋研究開発機構に移られていた松野太郎先生から、全球非静力学モデルを開発する必要性を確信する契機になったと、後日伺いました。この事例は、日本海ポーラーロウの出現を伴っており、東京大学海洋研究所(当時)の柳瀬 亘さんが気象研究所にも足を運んで、領域を限って水平格子間隔2kmのシミュレーションも行っています(Yanase *et al.* 2002)。なお寒気吹き出し雲のシミュレーションについてはその後、当時気象研究所にいた永戸久喜さん(現数値予報課数値予報班長)が水平格子間隔1kmで本物の衛星画像と見まがう図を作成しています(Eito *et al.* 2010)。

この他、GCSS(GEWEX雲システム研究; GEWEX Cloud System Science Team 1993)の海上スコールラインを対象とした雲解像モデルの国際相互比較(Redelsperger *et al.* 2000)への参加、気象庁内で行われた関東地域メソ解析プロジェクトへの参加(斉藤1999b)、大阪管区気象台との地方共同研究によるパソコン上でMRI-NHMを動作させ結果の解析・管理を行う統合制御ソフト「NHM統合環境」の開発(上野ほか2000)、任意の等角投影法への対応と球面上の直交曲線座標系への拡張(円筒正距座標)による全球非静力学モデルの開発(斉藤2003a)などについての取り組みを行いました。

3. 気象庁非静力学モデルの開発と現業化

3.1 数値予報課との共同開発

近年は数値モデルが汎用化・巨大化し、並列化やデータ同化のための随伴モデルの作成など、開発のコストが大きくなっています。このため、複数の予報センターや研究機関が独自にモデルを持つよりも、共同で開発・管理する方がメリットがあるようになってき

ています。このような情勢を受けて、気象庁でも数値予報課と気象研究所で数値予報モデルを共同開発していく方針が1998年に確認されました。非静力学メソモデルについては、MRI-NHM とその並列版をベースに、HE-VI 法を導入して研究と現業予報の両方に利用する統一モデルの開発が行われました。HE-VI 法は、分散処理型計算機で通信負荷が少なく済むという利点があり、数値予報課で開発が行われていた(室井 1998) ほか、Ikawa and Saito (1991) でも準圧縮の方程式系を使った場合について解説されています。HE-VI 法の再実装が行われ(室井ほか 1999)、統合モデル「気象研究所/数値予報課統一非静力学モデル(MRI/NPD-NHM)」の詳細を気象研究所技術報告に刊行しました。この技術報告(Saito *et al.* 2001b) は、多くの数式を含み英文133ページに及びますが、当時気象研究所予報研究部第二研究室長をされていた中村 一さんがお一人でその全編に目を通しコメントを下さりました。編集委員会からの依頼とは言え、ボランティアとしての丁寧な閲読に頭が下がる思いでした。

この統一モデルの開発は、FORTRAN90などの新しいコーディング手法も取り入れた、現業用の発展版としての気象庁非静力学モデル(JMA-NHM; 以下単にNHMと記載する)の共同開発につながってきました。

3.2 時間積分の安定化

私は2001年4月に気象研究所から数値予報課に異動しました。与えられた命題は非静力学グループ(当時)のグループリーダー(GL)として、非静力学メソモデルを2003年度末までに現業化する、というものでした。気象庁では2001年3月からメソモデル(MSM)の運用を始めていました。MSMは静力学スペクトルモデルであるRSMを水平解像度10 kmに高解像度化したもので、東西3600 km、南北2880 kmの領域に対する18時間予報を当時の気象庁のスパコンSR8000の40ノードで約20分で終わらせていました。非静力学モデル現業化の条件は、モデルをMSMから置き換える形で同じメソ解析を初期値として同じ領域を同じ解像度で計算する、但し大幅な計算時間の増加は認められない、というもので、30分以内で計算を終わらせる必要がありました。しかし現実にはNHMは力学過程・物理過程ともにMSMよりも計算量が多く、予測精度の確保とともに計算時間の大幅な短縮がどうしても必要でした。そのためにはタイムステップをある

程度大きくとった場合でもモデルが安定に動く必要があります。

ここでNHMのHE-VI法についておさらいしておく、タイムスプリットに関しては、物理過程や移流については通常のタイムステップ Δt のリーブフロッグ法で解き、位相速度の大きな音波については小さなタイムステップ $\Delta \tau$ を用いるものでした。水平方向の陽解法については、まず水平方向の運動量(U , V)について、forwardで以下のように解きます。

$$\frac{U^{\tau+\Delta\tau}-U^{\tau}}{\Delta\tau} + \frac{\partial P^{\tau}}{\partial x} + \frac{\partial G^{1/2}G^{13}P^{\tau}}{G^{1/2}\partial z^*} = -(ADVU+RU) \quad (1)$$

$$\frac{V^{\tau+\Delta\tau}-V^{\tau}}{\Delta\tau} + \frac{\partial P^{\tau}}{\partial y} + \frac{\partial G^{1/2}G^{23}P^{\tau}}{G^{1/2}\partial z^*} = -(ADV V+RV) \quad (2)$$

ここで $G^{1/2}$ や G^{13} , G^{23} は地形に沿った座標系に伴う座標変換のメトリック、 $ADVU$, $ADV V$ は移流項、 RU , RV はその他の項です。次に、鉛直方向の陰解法として、運動量 W と気圧の摂動 P をbackwardで解きます。

$$\frac{W^{\tau+\Delta\tau}-W^{\tau}}{\Delta\tau} + \frac{1}{mG^{1/2}} \frac{\partial P^{\beta}}{\partial z^*} + \frac{g}{mC_m^2} P^{\beta} = \frac{1}{m} BUOY - (ADV W - RW) \quad (3)$$

$$\frac{P^{\tau+\Delta\tau}-P^{\tau}}{\Delta\tau} + C_m^2(-PFT + m^2 \left(\frac{\partial U^{\tau}}{\partial x} + \frac{\partial V^{\tau}}{\partial y} \right)) + m \frac{\partial}{\partial z^*} \left[\frac{1}{G^{1/2}} \{ W^{\beta} + m(G^{1/2}G^{13}U^{\tau} + G^{1/2}G^{23}V^{\tau}) \} \right] - PRC = dif.P \quad (4)$$

ここで m はマップファクター、 C_m は音速、 $ADV W$ は移流項、 RW はその他の項、 $dif.P$ はレーリーダンピング、 PFT は非断熱項です。 $BUOY$ は浮力で、2.3節で述べたようにHI-VI法では密度摂動から直接計算していました(その場合は、左辺第3項の気圧摂動の項は消える)が、HE-VI法ではこの時点では温位摂動から計算していました。 PRC は降水物質の落下に伴う質量変化で、添え字 β と γ は陰解法する場合のタイムステップ τ と $\tau+\Delta\tau$ の重み付き平均です。

現業化に向けたテストとして、MSMと同じ条件で

NHM を動かす日々実験を始めました。気象研究所での再現実験などでは水平格子間隔10 km の場合、 Δt として20秒を用いる場合が多かったのですが、それでは時間がかかるため30秒にしたところ、第3図左に示すような不自然なノイズ状のパターンがオホーツク海上の気圧場に現れました。発現したのが擾乱のある降水域ではなく冷涼な海上であることから、このノイズの原因は重力波と考えられました。重力波はプラントバイサラの振動数を持ち、その大きさは温位を θ として

$$N = \sqrt{\frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}} \quad (5)$$

と表されます。N は温位の鉛直傾度が 3 K/km 位の通常の気中では 0.01s^{-1} 程度ですが、温位の鉛直傾度が大きいところではもっと大きくなります。重力波を安定に時間積分するためには、N の逆数よりも小さなタイムステップをとる必要があります (Tapp and White 1976) が、N の逆数は100 m で 3 K 以上の温位傾度があれば30秒よりも小さくなるので、海水温が低いオホーツク海上の大気下層でそのようなことが起きても不思議はありません。

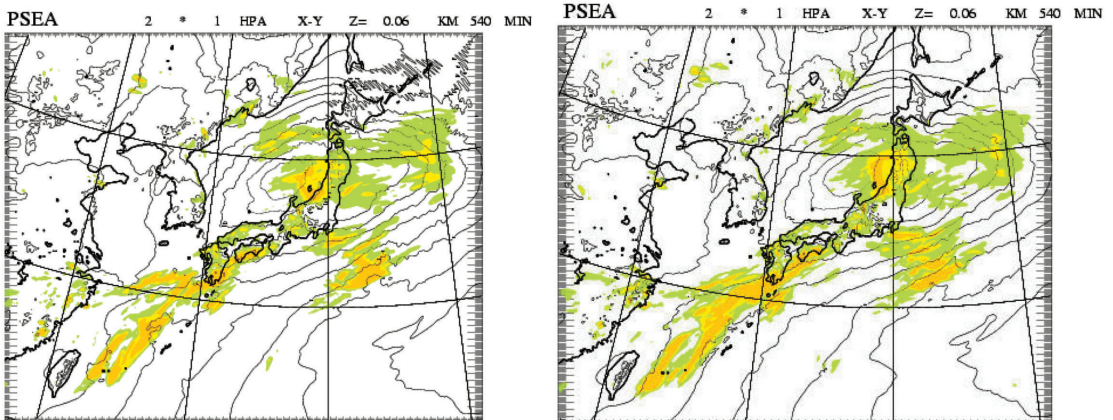
重力波を安定化するために、温位の基本場鉛直移流の項を小さな時間刻みで評価することにしました。その場合、 θ と W の式は以下ようになります。

$$\begin{aligned} & \frac{\theta^{\tau+\Delta\tau} - \theta^{\tau}}{\Delta\tau} \\ &= - \left(W^{\tau} \frac{N^2 \bar{\theta}}{g} + w \frac{\partial \theta'}{\partial z} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{Q}{c_p \pi} + \text{dif.} \theta \\ &= - \left(W^{\tau} \frac{d\bar{\theta}}{dz} + w \frac{\partial(\theta - \bar{\theta})}{\partial z} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{Q}{c_p \pi} + \text{dif.} \theta \\ &= - \left\{ \frac{d\bar{\theta}}{dz} (w^{\tau} - w) + ADV\theta \right\} + \frac{Q}{c_p \pi} + \text{dif.} \theta \\ &= - \frac{d\bar{\theta}}{dz} (w^{\tau} - w) + \left[\frac{\partial \theta}{\partial t} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

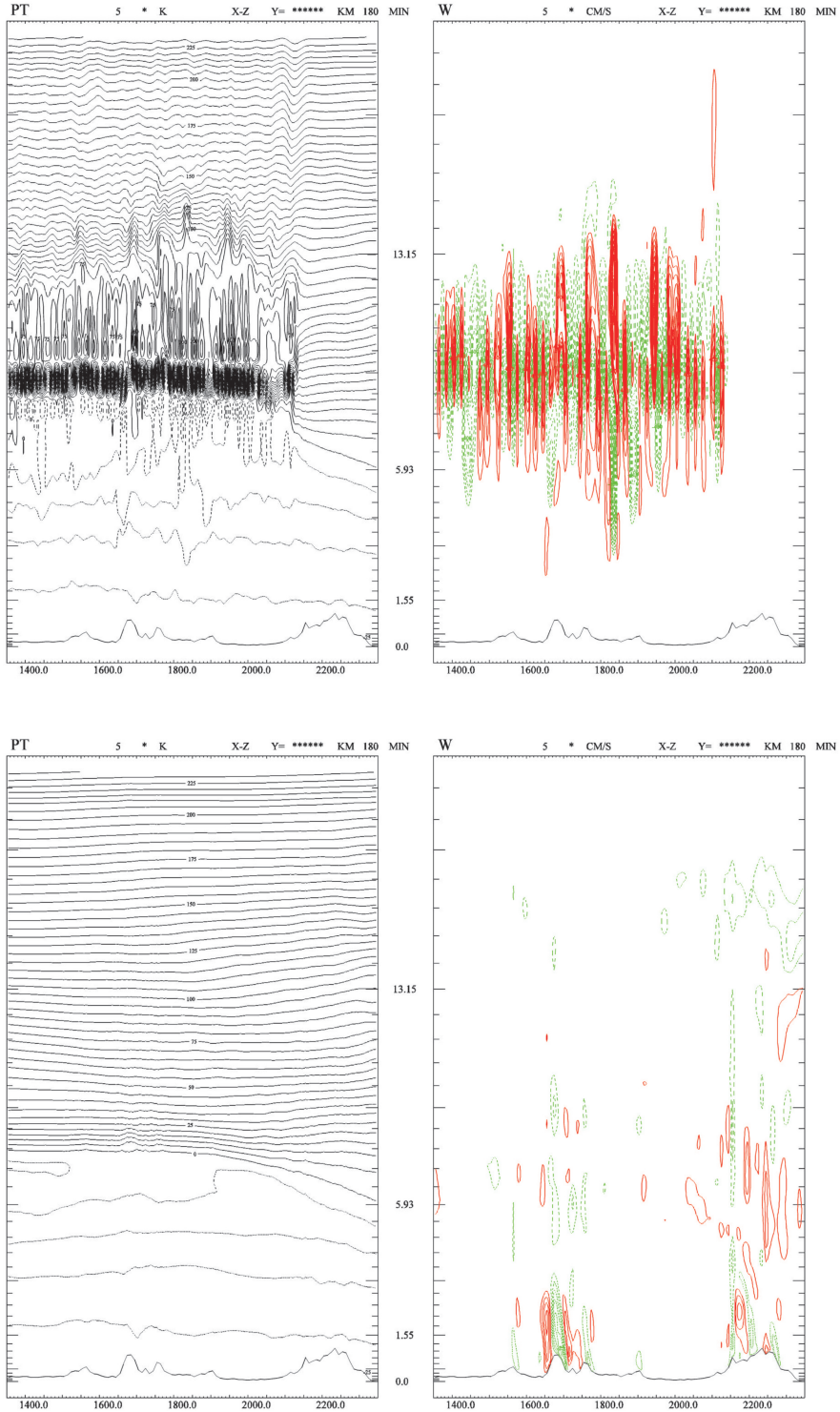
ここで c_p は定圧比熱、 π は無次元化した気圧 (エクスター関数)、 $ADV\theta$ は移流項、 Q は非断熱加熱です。また W の backward 積分の部分は以下のように変形します。

$$\begin{aligned} & \frac{W^{\tau+\Delta\tau} - W^{\tau}}{\Delta\tau} + \frac{1}{mG^{1/2}} \frac{\partial P^{\beta}}{\partial z^*} + \frac{g}{mC_m^2} P^{\beta} \\ &= \frac{1}{m} \frac{\rho G^{1/2} \theta^{\tau+\Delta\tau} (1 + 0.61q_v) (1 - q_c - q_r - q_i - q_s - q_g)}{\theta_m} g \\ & - (ADVW - RW) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで P^{β} は陰解法における気圧の未来値、 q_v , q_c , q_r , q_i , q_s , q_g は水物質 (水蒸気、雲水、雨、雲氷、雪、あられ) の混合比です。 $ADV\theta$ についてはフラックス型の移流項をそのまま用いるため、大きな時間刻みの値と小さな時間刻み内の値の差の基本場鉛直移流を評価しています。Forward-backward の間に、温位と浮力の計算を行います。温位の式の右辺第



第3図 2001年6月19日06UTCのメソ解析を初期値とする水平格子間隔10 km のNHMによる9時間予報の平均海面気圧 (コンター間隔は2 hPa) と前3時間雨量。左) 重力波のスプリット前、タイムステップ30秒。右) 重力波スプリット後、タイムステップ40秒。



第4図 2002年4月9日06UTCを初期値とするNHMの3時間の予報による沿海州付近の東西鉛直断面図。上段) 移流スプリットしない場合。左) 温位, 右) 上昇流。下段) 同じく移流をスプリットした場合。斉藤(2003)より。

1項は、一次風上差分で評価し、右辺第2項は、雲物理のところ一度仮の時間積分をして求めておくようにしました。第3図右は、重力波を $\Delta\tau=12$ 秒でスプリットし、 Δt としては40秒を用いた場合の図で、オホーツク海上に見られた気圧のノイズが消えています。

日々実験ではその後、 $\Delta\tau$ を10秒に変更し、移流補正スキームも併用することで $\Delta t=30$ 秒で計算不安定を起こす事例がなかったのですが、秋になって強い寒気が入るようになると、ジェット軸直下の気圧場に乱れが生じるようになりました。NHMにはSkamarock and Klemp (1992)に基づく発散の勾配を運動方程式に加える発散抑制フィルタが入っていたのですが、コードのバグを修正するとともに、係数を水平と鉛直で変えるようにしました。これらについては詳しくは斉藤 (2003b) で記述しています。

上記の工夫により $\Delta t=40$ 秒でのテストを行ったところ、風が強く明瞭な逆転層がある事例では重力波の安定化が十分でないことがありました。第4図は、2002年4月9日06UTC初期値のケースでの沿海州付近の鉛直断面図で、高度8kmの逆転層付近で不安定が生じています。また春先になるとともに、深い対流が発達する事例では、しばしば鉛直流が10 m/s以上と大きくなり過ぎて、 $\Delta t=40$ 秒では安定に積分出来ないことが生じるようになりました。このため、計算安定性を高めるための工夫として、移流を小さな時間刻み $\Delta\tau$ で評価することになりました。

移流項を小さな時間刻み $\Delta\tau$ で評価する場合、NHMでは移流計算に移流補正のスキームが用いられており、小さな時間刻みで毎回高次の移流を計算するのは効率的とは言えません。そこで、移流補正を用いないフラックス形式中央2次による移流寄与分 ADV_L のみを $\Delta\tau$ で評価して、移流項を下式で補正することとしました。

$$ADV = ADV(kt) - ADV_L(kt) + ADV_L^\tau \quad (8)$$

これにより、例えば W に対する式は、

$$\begin{aligned} & \frac{W^{\tau+\Delta\tau} - W^\tau}{\Delta\tau} + \frac{1}{mG^{1/2}} \frac{\partial P^\beta}{\partial z^*} + \frac{g}{mC_m} P^\beta \\ & = \frac{1}{m} \rho G^{1/2} \theta^{\tau+\Delta\tau} (1 + 0.61q_\theta) (1 - q_c - q_r - q_i - q_s - q_g) g \\ & - (ADV_W - ADV_LW + ADV_LW^\tau - RW') \quad (9) \end{aligned}$$

となります。ここで RW' には前項の発散抑制フィルタを含めています。温位の式も同様な考えから

$$\begin{aligned} & \frac{\theta^{\tau+\Delta\tau} - \theta^\tau}{\Delta\tau} \\ & = -(ADV_\theta - ADV_L\theta + ADV_L\theta^\tau) + \frac{Q}{c_p\pi} + dif.\theta \\ & = ADV_L\theta - ADV_L\theta^\tau + \left[\frac{\partial\theta}{\partial t} \right] \quad (10) \end{aligned}$$

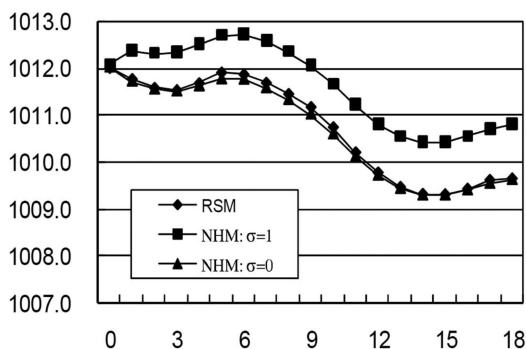
で計算することにより重力波のスプリットを兼ねることが出来ます。ここでは計算効率のため、上記の補正は大きな時間刻み Δt と $\Delta\tau$ の比を $ns=2\Delta t/\Delta\tau$ とするとき、 $(ns-1)/2+1$ から $ns-1$ の間のみで行うことにしました。第4図下段は移流をスプリットした場合の予報結果で、不安定が解消しています。

これらの改良により $\Delta t=40$ 秒でモデルを安定に動かすことが出来るようになりました。元のモデルで $\Delta t=20$ 秒を用いた場合に比べて、ステップ数は1/2に減り、トータルの計算時間は61%に短縮しました。

3.3 平均気圧の問題

数値予報課の体制は2002年4月に大きく変わり、課長が佐藤信夫さん(元気象研究所長)から中村一さんに、数値予報班長の露木義さん(元予報研究部長)は、中村さんの後任として気象研究所予報研究部第二研究室長に異動され、私が班長を引き継ぐことになりました。非静力グループのGLだった時に比べ、全球モデルを含む課内全般のモデル開発への目配りや判断も求められるようになりました。

MSMと同じ条件でのNHMによる日々実験が進み精度検証をしてみると、領域平均気圧が親モデルであるRSMのそれと比べて上昇してしまう問題があることが分かりました。第5図は、2003年3月1日06



第5図 RSMとNHMのMSM領域平均海面気圧の時間変化。初期値は2003年3月1日06UTC。縦軸は気圧(hPa)、横軸は予報時間。斉藤(2008)より。

UTCを初期値とするNHMの領域平均気圧とRSMの同じ領域の平均気圧の比較です。この例では18時間の積分期間中、◆で示すRSMの平均気圧は約2.5 hPa低下し、18時間後には1009.6 hPaになっています。一方■で示すNHMのそれは、1.3 hPaの低下にとどまり、1010.8 hPaで、RSMよりも1.2 hPa平均気圧が高くなっています。気圧の変化を良く見ると、モデルの立ち上げ直後にいきなり1 hPa近く気圧が上昇し、以後漸増しています。気圧の上昇に関しては計算スキームの保存性の問題が考えられますが、NHMの連続の式と運動量方程式はフラックス形式となっており、また少なくとも最初の立ち上げ直後の上昇は、保存性の問題ではないと考えられます。試みにHI-VIで同じ計算を行ってみると、この気圧上昇は現れません。従って、側面境界の問題(質量フラックス)や物理過程、移流補正スキームの問題でもないことになります。

この時点でのHI-VI法とHE-VI法の違いの一つに、前節で述べた浮力BUOYの計算の仕方がありました。密度の基本場からの差(摂動)は

$$(\rho - \bar{\rho}) = -\rho \frac{\theta'_m}{\theta_m} + \frac{P'}{C_m^2} \quad (11)$$

$$C_m = \sqrt{\frac{C_p}{C_v} RT_m} \quad (12)$$

のように質量仮温位(あるいは温度)の摂動と気圧の摂動に分けられます。NHMでは、浮力BUOYを表記し

$$BUOY = \sigma \frac{\rho G^{1/2} \theta'_m}{\theta_m} g - (1 - \sigma) (\rho - \bar{\rho}) g G^{1/2} \quad (13)$$

で定義し、鉛直方向の運動方程式を

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} + \frac{1}{m_3 G^{1/2}} \frac{\partial P}{\partial z^*} + \frac{\sigma}{m_3} \frac{gP}{C_m^2} \\ = \frac{1}{m_3} BUOY - ADVW + RW \end{aligned} \quad (14)$$

と表します。ここで σ はBUOYの定義に関するスイッチパラメータで、 $\sigma = 1$ のとき(質量仮)温位の摂動から、 $\sigma = 0$ のとき密度摂動から浮力を計算します。これはSaito(1997)による質量仮温位の導入と完全圧縮系モデルへの改良に際し、 $\sigma = 0$ として浮力を密度摂動から直接計算するオプションが加えられた

ものです。この段階では、このオプションはHI-VI法のみで用いられ、HE-VI法では $\sigma = 1$ の場合のみがサポートされていました。

HE-VI法での音波項の鉛直インプリシットの式は、

$$\begin{aligned} \frac{W^{\tau+d\tau} - W^\tau}{\Delta\tau} + \frac{1}{m_3 G^{1/2}} \frac{\partial P^\beta}{\partial z^*} + \frac{g}{m_3 C_m^2} P^\beta \\ = \frac{1}{m_3} BUOY - (ADVW - RW) + (1 - \sigma) \frac{g}{m_3 C_m^2} P^\tau \end{aligned} \quad (15)$$

となります。上記の左辺第3項は、 σ の値にかかわらず存在し、右辺第3項は、 $\sigma = 0$ の場合のみ現われることに注意する必要があります。言うまでもないことですが、 W の式の単純なインプリシット化

$$\frac{W^{\tau+d\tau} - W^\tau}{\Delta\tau} + \frac{1}{m G^{1/2}} \frac{\partial P^\beta}{\partial z^*} = \frac{1}{m} BUOY - ADVW - RW \quad (16)$$

は、BUOYに含まれる気圧摂動を安定化していないため、計算不安定を生じます。

式(11)の関係は、微小摂動に対しては近似なしに成り立つため、浮力を(質量仮)温位摂動から計算するか($\sigma = 1$)密度摂動から計算するか($\sigma = 0$)は、計算精度に大きな違いをもたらさない筈ですが、NHMの場合、気圧方程式境界条件の扱いから、 $\sigma = 0$ で計算することが重要でした。HE-VI法では、 P^β に対する鉛直1次元気圧方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 P^\beta}{\partial z^{*2}} + G^{1/2} \frac{\partial}{\partial z^*} \left(\frac{g}{C_m^2} P^\beta \right) - (G^{1/2})^2 \left\{ \frac{2}{C_m \Delta\tau (1 + \beta)} \right\}^2 P^\beta \\ = FP.HE.INV + FP.HE.VAR \end{aligned} \quad (17)$$

を解く必要があります。 $\sigma = 1$ の場合、上下部境界条件は $W = 0$ から

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{m_3 G^{1/2}} \frac{\partial}{\partial z^*} + \frac{g}{m_3 C_m^2} \right) P^\beta \\ = - (ADVW - RW) + \frac{1}{m_3} BUOY \end{aligned} \quad (18)$$

で与えられます[†]。左辺に気圧摂動の項($gP^\beta/m_3 C_m^2$)が表れますが、NHMの上下部境界条件は、ハーフレベル(W のレベル) $kz = 1 + 1/2$ と $nz = 1/2$ で定義されているため、正しく境界条件を与える

[†] 下部境界条件として摩擦ありの場合。摩擦なしの場合は、 $W^* = 0$ が境界条件となる。

ためには $kz = 1$ と nz での P^β の値が必要になります。楕円型気圧方程式(17)は、 P の $kz = 2$ から $nz - 1$ までの解しか与えないため、NHM では便法として、 $kz = 1$ と nz での P^β の値を P^τ の鉛直補外から求めていましたが、この方法が、気圧を上昇させてしまう原因でした。

HI-VI と同様に、 $\sigma = 0$ の場合を含めて、境界条件を

$$\left(\frac{1}{m_3 G^{1/2}} \frac{\partial}{\partial z^*} + \frac{g}{m_3 C_m^2} \right) P^\beta = - (ADVW - RW) + \frac{1}{m_3} \left\{ BUOY + (1 - \sigma) \frac{g}{C_m^2} P^\tau \right\} \quad (19)$$

で与えることにしました。上式は $\sigma = 0$ の場合、右辺に $(g P^\tau / m_3 C_m^2)$ の項が存在しますが、この項は左辺の気圧摂動の項と相殺するので、上下部境界条件での気圧摂動項の決定精度は、問題にならなくなります。

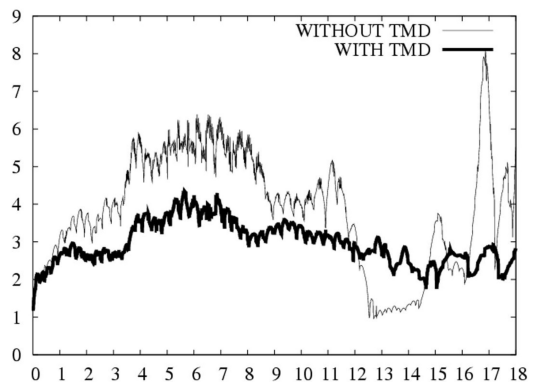
第5図の▲は $\sigma = 0$ にした場合のNHMの領域平均気圧の時間変化で、立ち上げ直後の気圧上昇は見られなくなり、領域平均海面気圧は境界条件を提供するRSMのそれに非常に良く追随するようになっていきます(斉藤 2008)。

3.4 地表面フラックスの陰解法化と適応水蒸気拡散の導入

日々実験を進めていたところ、2003年9月になって、強い台風が台湾を通過し地表付近で強風が生じた事例でモデルが計算不安定を起こしました。MRI-NHMでは鉛直拡散係数に線型安定条件に基づく上限を設定していましたが、それでは地表面付近の鉛直拡散が不十分になる場合があるため、永戸さんがFujiibe *et al.* (1999) で用いられた鉛直拡散の陰解法の扱いを2002年6月に再実装してくれていました。最下層(地表面フラックス)についてのみ、陰解法化していなかったのですが、当時は問題視していませんでした。計算不安定が地表面フラックスの計算部分であることが分かり、バルク係数を引数にして、フラックスを陰的に解くように永戸さんに依頼し、修正が2003年10月に行われました。これにより強風の事例でも $\Delta t = 40$ 秒で安定動作するようになりました。

NHMでは、積雲対流パラメタリゼーションとして、Kain-Fritsch (KF) スキームを用いています。KFスキームは、対流有効潜在エネルギー (CAPE) を除去することによりモデル大気の大気対流不安定を取り

除くものですが、水平格子間隔10 kmのNHM(以下、10 km NHM)の現業化テストにおいてモデル大気を完全に安定化させてしまうと、予報後半に強い雨が予想されなくなってしまうという問題が生じました。このため、CAPE除去率をオリジナルの90%から85%に小さくして、予報後半でもある程度強い雨が表現できるように調整が行われました(Ohmori and Yamada 2006)。大気を完全には安定化させない場合、10 kmの格子間隔では上昇流が非現実的に大きくなってしまっていました。第6図は、2003年7月18日18UTCを初期値とするMSM領域10 km NHMによる領域最大上昇流の時間変化で、細線に示すように予報時間17時間付近で8 m/sに達するスパイク状の大きな上昇流が表れています。非静力学モデルでは、大きな鉛直流は鉛直方向のCFL条件を通じて計算安定性に直接影響します。この大きな上昇流は、ほとんどがgrid point stormと呼ばれる格子スケールのもので、2003年11月、ブラジルでの第19回大気科学委員会数値実験作業部会(WGNE)に参加した時に、英国気象局のAndrew Lorencさんから、非静力学数値予報モデルUnified Model (UM)にgrid point stormの発生を抑制するために「適応水蒸気拡散(Targeted Moisture Diffusion; TMD)」を導入したという情報を得ることが出来ました。ある閾値より上昇流の大きな格子点において、水蒸気に対して大きな2次の水平拡散をかけるというもので、早速NHMにも導入しました(斉藤・石田 2008)。第6図



第6図 MSM領域10 kmNHMによる領域最大上昇流の時間変化。初期値は2003年7月18日18UTC。縦軸は風速 (m/s)、横軸は予報時間 (hr)。細線は適応水蒸気拡散 (TMD) なし、太線はTMDありの場合。斉藤・石田 (2008) より。

に太線で示すのは、TMD をかけた場合の領域最大上昇流で、スパイク状の上昇流が消え、最大値は 4 m/s 以下になっています。降水強度が非常に大ききところを除いて適応水蒸気拡散の有無は予報結果全体には殆ど影響を与えません。

3.5 NHM の現業化

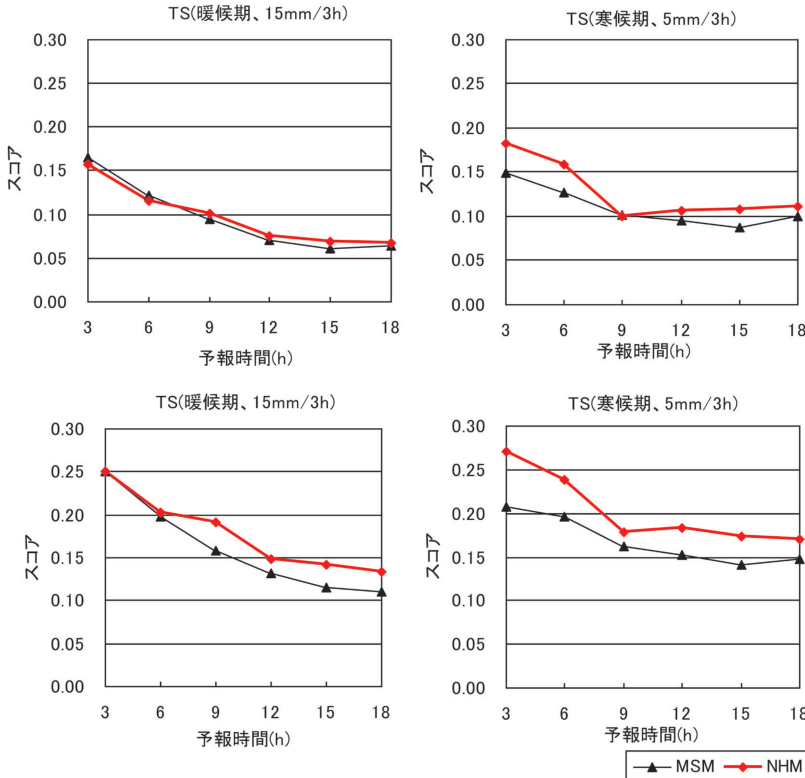
前節までに述べてきた改良に加え、藤田 司さん（現予報課アジア太平洋気象防災センター所長）、山田芳則さん（現予報研究部室長）、石田純一さん、熊谷幸浩さん（現気象衛星課）、荒波恒平さん、大森志郎さん（現予報課）、長澤亮二さん、田中（熊谷）小緒里さん（現情報利用推進課）、成田正巳さん（現予報課）、山崎陽介さんら数値予報課メソモデルグループのメンバーらが精力的にモデルの現業化のための開発に取り組んでくれました。その詳細は、気象庁予報部（2008）に記述されています。山田さんと大森さん、成田さんは、雲物理過程の高速化や積雲スキームの開発・調整、藤田さんは移流を中心とする計算スキームの確認、石田さんと荒波さんはシステム全般や入出力を含めた効率化を、熊谷さんはノンローカル境界層スキームの開発と導入を、長澤さんは放射過程を、田中さんは検証を、主に担当されました。NHM が 2004（平成16）年度末に現業化出来るかは 2003 年の年末まで確定していなかったのですが、積雲スキームの時間変化率に関するバグが見つかり、石田さんが正月休み返上で日々実験をやり直して、年明けに漸く旧 MSM を上回る性能が示せるようになりました。

予報部内の了解が得られて 2004 年 3 月 29 日から、NHM を用いた非静力学 MSM の試験運用が始まりました。NHM の試験運用の開始にあたり、NHM の性能評価試験を行って、NHM と当時の静力学 MSM の予想精度の比較を行いました。暖候期と寒候期に対してそれぞれ 16 日間（64 初期時刻）に対して計算を行いました。場の検証では、暖候期は、地上気圧（Psea）、500 hPa 面高度（Z500）、250 hPa 面風速（Wind250）全ての要素で、全ての予報時間を通じて、NHM の方が静力学 MSM よりも平方根平均二乗誤差（RMSE）が小さくなりました。寒候期は、NHM の RMSE は静力学 MSM と比べて、Z500 では若干大きくなりましたが、Psea ではほぼ同等で、Wind250 では一貫して小さくなりました。500 hPa 面の高度場以外の要素（風、気温、湿数）、及び 700 hPa、250 hPa の殆どの要素でも NHM は静力学 MSM より RMSE が小さくなっていました。降水の検証では、

暖候期においては、NHM と静力学 MSM のバイアスコア（BS）はほぼ同等で、スレットスコア（TS）は僅かに NHM が静力学 MSM を上回っていました。一方、寒候期は、静力学 MSM の BS が 1 よりもかなり大きいものに対して、NHM では 1 に近く、TS は、殆どの閾値に対して NHM が静力学 MSM を上回っていました。

第 7 図は予報時間ごとの TS を示します。暖候期（左；3 時間積算降水量 15 mm を閾値）のスコアは、予報 6 時間目までは静力学 MSM が僅かに良く、それ以降は NHM が良くなっています。寒候期（右；3 時間積算降水量 5 mm を閾値のスコア）は予報時間 9 時間目ではほぼ同等である以外は全ての予報時間で NHM が静力学 MSM を大きく上回っていました。暖候期の最初の予報時間で静力学 MSM の方が僅かに良いのは、この段階では初期値となるメソ解析は、静力学 MSM に基づくメソ 4 次元変分法であったためと思われます。寒候期の予報で NHM が良いのは、静力学 MSM では大規模凝結をそのまま降水とみなしてしまい雪が風下側に流される効果を計算しないため、冬季日本海側などの地形性降雪では降雪域が風上側である北西にずれた場所に予測されてしまい、かつ降水強度も実況よりも大きくなってしまふ欠点があるのに対して、雪やあられを予報変数とする NHM では、固形降水の移流や蒸発をより適切に表現できることによります。下段に示すのは、「1 格子ずれを許容した TS」で、観測で閾値以上の降水があった格子とそれに隣接した格子の中で予報降水量が閾値以上となった格子が 1 つでもあれば「当たり」とした場合です。NHM、静力学 MSM とともに TS は大きくなっていますが、NHM の方が静力学 MSM よりも改善の度合いが大きくなっています。NHM では現象の表現力が上がったため、通常スコアでは僅かな位置ずれに対して不利な場合があります（double penalty）が、1 格子でも位置ずれを許すとスコアは大きく改善することが分かります。

私の二度目の数値予報課在籍は 2004 年 3 月まででしたが、NHM はその後非静力学 MSM として 2004 年 9 月に現業化されました（Saito *et al.* 2006）。非静力学 MSM にはその後数値予報課により第 1 表にあるような様々な改良が加えられています。2006 年 3 月には、気象庁のスーパーコンピュータシステム更新に伴って水平格子間隔 5 km・鉛直 50 層化され、3 時間おき 1 日 8 回の運用が始まっています。また 2007 年 5



第7図 MSMとNHMの予報時間ごとのスレッドスコア。左上) 暖候期の3時間積算降水量15mm 閾値としたもの、右上) 寒候期の3時間積算5mmを閾値としたもの、下段は同じく1格子ずれを許容した場合のスコア。斉藤ほか(2004)より。

第1表 非静力学MSMの主な変更。

2004年9月	非静力学モデルと雲物理過程の導入
2005年3月	空港気象ドップラーレーダー動径風データ利用開始
2006年3月	5km50層化, 8回/日運用
2007年5月	33時間予報(03, 09, 15, 21UTC) 開始と物理過程改良
2009年4月	非静力学メソ4次元変分法(JNoVA) 導入(15km40層)
2009年10月	GPS可降水量データ利用開始
2010年11月	積雲対流スキーム改良
2010年12月	衛星輝度温度データ直接同化開始
2011年6月	レーダー反射強度による水蒸気推定データ利用開始
2013年3月	計算領域の拡大
2013年5月	39時間予報(00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21UTC) 開始
2013年9月	マイクロ波イメージャAMSR2 輝度温度データ利用開始

月には1日4回の予報時間が33時間予報に延長されるとともにメラー山田中西新野(MYNN)スキームと呼ばれるレベル3の乱流クロージャモデル(Nakani-

shi and Niino 2004; Hara 2010) が現業数値予報モデルとしては世界で初めて導入されています(Saito *et al.* 2007), 2009年4月の非静力学メソ4次元変分法(JNoVA) 導入(Honda *et al.* 2005) や2009年10月のGPS可降水量データ利用開始には気象研究所も貢献しています(小司2015)。

第8図に示すのは、静力学MSMを含むMSMの3時間雨量10mmに対するTSの経年変化です。12カ月移動平均は当初の0.15から最近では0.35近くになっています。2004年9月のNHMの導入によるスコアの改善は、斉藤・牧原(2007)で一度報告していますが、その後も2009年4月のJNoVA導入などによりスコアはさらに改善しています。このMSMの降水予測精度の向上は、気象庁の降水短時間予報の改善にも寄与しています。第9図には、夏季(6-8月)を対象とする2002年と2012年の降水短時間予報の予報時間ごとTSを持続予報(PER), 補外(EX6), モデル(MSM)とともに示したものです。左に示す2002年の時点では、持続予報は4時間後までモデルを上回っており、補外は6時間後までモデルを上回っていました。補外とモデルの

マージは、4時間後以降の補外予報を少し改善している程度でした。右図に示す2012年夏季には、モデルは3時間後には持続予報と同程度となり5時間で補外を

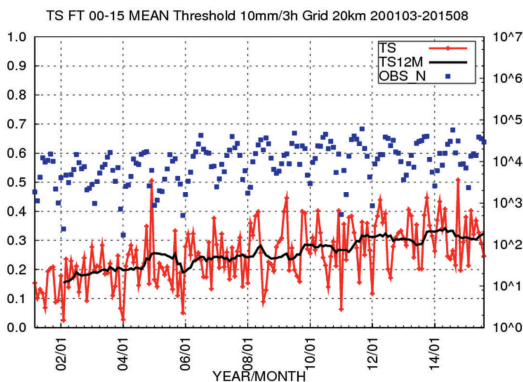
上回っています。またモデルのマージによる補外の改善の度合いも大きくなっています。

気象庁では、2012年8月から水平格子間隔2kmの局地モデル(LFM)の運用を開始しています。当時、LFMは、気象庁の現業数値予報モデルでは初めて積雲対流パラメタリゼーションを用いないモデルで、積乱雲の集合体であるメソ対流系をMSMよりも適切に表現する能力を持っています。2014年8月に発生した広島市の土石流災害の事例では、豪雨発生前日18時からのLFMが広島付近での非常に強い線状降水の発生を予測し、大雨警報の早目の発表につながりました。

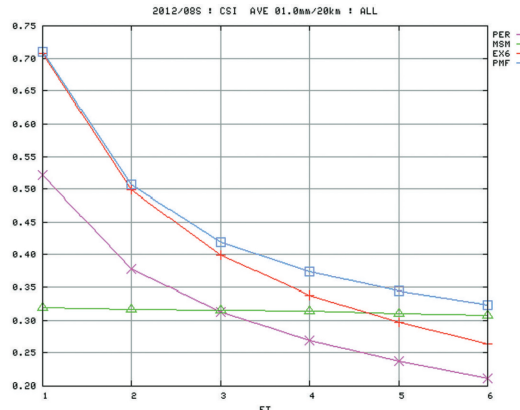
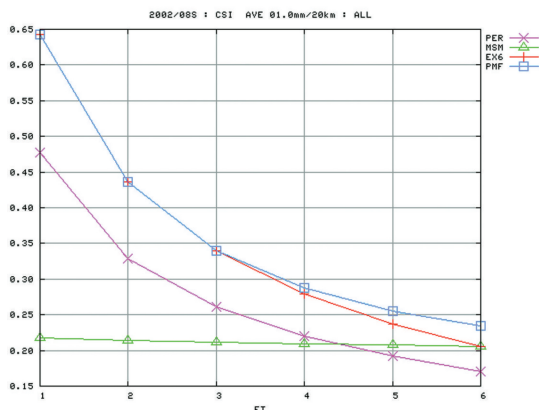
なお LFM には、2015年1月から新しい力学フレームに基づく非静力学モデル asuca (気象庁予報部2014) が用いられています。asuca は NHM の資産を継承しながら次世代の計算機アーキテクチャへの対応や数値計算の保存性を重視して数値予報課が中心となって開発しているモデルで、今後の気象庁の短期数値予報の中心になっていくものと思われます。

3.6 全球モデル開発プロジェクト

私が数値予報班長をしていた2002年4月からの2年間、非静力学メソモデルの導入と並んで数値予報課でのもう一つの大きな課題が全球モデルの予報精度向上でした。気象庁での全球モデル(GSM)の運用は1988年に始まり、以降気象庁における数値解析予報システムの基盤モデルとして、短期～週間・季節予報の予測技術の核となっています。GSMの予報精度は、MSMの境界条件を通じて防災情報の精度にも大きな影響を与えることとなります。GSMの予報精度は、年々改善していましたが、その改善の度合いは世界の先進数値予報センターのそれを上回るものではなく、1990年台後半以降は、世界のトップクラスからやや引き離されているのが当時の状況でした。その原因としては、衛星データ同化などモデル開発課題が多岐にわたる広がりを持つようになってきたにもかかわらず庁内での横断的な取り組みが不十分であったこと、モデル開発計画が気象庁としての中・長期の見通しに結びついていなかったこと、データ同化を含めた予測システムの大規模化に対処した戦略的な人員の増強が不十分であったことなどが考えられました。このような問題意識を背景に、気象庁では1999(平成11)年度に長



第8図 MSM降水スロットスコアの変遷。15時間までの予報の平均。3時間雨量10mmを閾値とする。検証格子は20kmで月ごとの値(TS)と前12か月移動平均(TS12M)。OBS Nは観測の総数(右の軸)。気象庁予報部数値予報課による。



第9図 気象庁降水短時間予報の予測精度。閾値1mm/hに対するスロットスコア。左)2002年夏季(6-8月)。右)2012年夏季。気象庁予報部予報課による。

官を本部長とする「モデル技術開発推進本部」を設置し、庁内横断的なモデル技術開発計画の策定と、開発の推進にあたることとなりました。

2002（平成14）年2月に開催されたモデル技術開発推進本部会において、GSMの短期予報の改善が思わしくないことが指摘され、全球モデル開発体制を強化し、「短期予報の精度を世界のトップレベルに」という開発目標を掲げた全球モデル開発プロジェクトが2002（平成14）年度からの2.5カ年計画で始まりしました。モデル開発体制を強化し、開発担当者の多くが複数の課題を抱えて開発に取り組んでいた従来の状況を改め、課題ごとに1人を専任化することを可能とするよう改善しました。全球モデル開発プロジェクトの開発課題としては以下が策定されました。

- ①物理過程の開発
- ②高速力学フレームの開発
- ③サウンドの直接同化
- ④マイクロ波散乱計の同化
- ⑤マイクロ波放射計の同化
- ⑥ゾンデ・航空機の気温同化
- ⑦3次元変分法の改良
- ⑧4次元変分法の導入

これらの開発項目とその内容については齊藤（2004）をはじめとする数値予報課報告別冊にまとめられています。

全球モデル開発プロジェクトが始まって、開発人員を大幅に増員したところ、スパコンへの開発ジョブが輻輳してジョブの実行待ち時間が著しく延びてしまったような開発が進まなくなる、という事態が発生しました。当時の数値予報課のスパコンはSR8000でしたが、ルーチンのために資源の約半分が使われており、残りの資源で様々な性能評価試験（この中には非静力学メソモデルの開発も含まれます）や業務化試験をこなすには性能が不足していました。この状況を抜け出すため、中村一課長（当時）と庁内各方面を奔走して導入したのが開発専用のミニスーパーでした。気象庁の予算事情では異例とも言える措置でしたが、佐藤信夫業務課長（当時）の理解と後押しもあり、2003（平成15）年度に導入することが出来ました。非静力学MSMの開発を専らミニスーパーで行い、浮いた計算資源をGSMの開発に回すようにしました。第10図に気象庁全球モデルによる北半球Z500の5日予報の精度（対初期値RMSEの前1年移動平均）の変遷を示します。全球モデル開発プロジェクトの成果



第10図 気象庁全球モデルによる北半球500 hPa高度場の5日予報の対初期値RMSE（前12か月平均）の変遷。気象庁予報部数値予報課による。破線は全球モデルの開発プロジェクトの期間（2002.4-2004.9）を示す。

が出始めた2003年の後半以降、精度が大きく改善したのが分かります。

2003年10月、数値予報課長の激職を精力的にこなされていた中村一さんが突如体調を崩され、僅か数日の入院の後、急逝されました。気象研究所時代から目をかけて下さっていた直属の上司を失い、言葉もありませんでした。空白を許されない数値予報課の業務は、数値予報を熟知されている露木さんが気象研究所から急遽後任に入られて、滞りなく継続することができましたが、非静力学MSMの現業化と全球モデル開発プロジェクトの2つを常に気に掛けられていた中村さんにその後の進展を見て頂くことが出来なかったのは、現在でも心残りです。

4. 気象研究所でのメソ気象予測高度化研究

4.1 豪雨予測の科研費研究

2004年4月、私は数値予報課から気象研究所予報研究部第二研究室に室長として異動しました。第二研究室では豪雨予測に関する2つの科研費研究を研究代表者として行いました。一つは基盤研究（B）「豪雨の力学的予測のための初期値解析と予測信頼性の評価に関する研究」（H17-H20）で、雲解像4DVAR、メソアンサンブル予報、アンサンブルカルマンフィルタ、GPS可降水量同化等を通じて、豪雨の力学的予測の実証実験につなげる、というものでした。気象研究所からは青梨さん、瀬古弘さん（現予報研究部室長）、小司禎教さん（現気象衛星・観測システム研究部室長）、川畑拓矢さん、原昌弘さん、柳野健さん、

國井 勝さんなどが、筑波大学から田中 博先生と近藤圭一さん（現理化学研究所）、松枝未遠さん（現オクスフォード大学）、京都大学から古本淳一さん、数値予報課から藤田 匡さん、三好建正さん（現理化学研究所）、山口宗彦さん（現台風研究部）、小野耕介さん、本田有機さんらが研究参加してくれました。

もう一つは、上記に引き続く研究として行った基盤研究（A）「局地豪雨予測のための先端的データ同化と雲解像アンサンブル予報に関する研究」（H21-H25）で、上述の科研費研究の成果を発展させながら、よりスケールの小さな局地豪雨を観測データの同化と雲解像モデルで予測する試みを行うというものでした。気象研究所では途中から折口征二さん、横田祥さん、荒木健太郎さんらが加わり、東北大学から岩崎俊樹先生、情報通信研究機構から村山泰啓さん、岩井宏徳さんらが、筑波大学から若月泰孝さん、西 暁史さんが研究参加してくれました。

これらの科研費研究では年2回の研究会を行い、うち1回は国外から研究者を招聘して情報交換に努めました。成果の詳細は2冊の分厚な研究成果報告書（斉藤ほか 2009, 2014a）にまとめられていますが、この中で川畑さんの雲解像4次元変分法同化システム（NHM-4DVAR）の開発とそれを用いたストームスケールでのデータ同化研究（Kawabata *et al.* 2007, 2011, 2013, 2014a,b）、小司さん、瀬古さんのGPS同化研究（Shoji *et al.* 2009；Seko *et al.* 2010）などが大きく進展しました。また三好さんや藤田さん、瀬古さん、国井さん、沢田雅洋さん（東北大学、現気象研究所）らによるNHMに基づく局所アンサンブル変換カルマンフィルタ（NHM-LETKF）の開発やそれを用いた研究も多数行われました（Seko *et al.* 2011；Sawada *et al.* 2015など）。これらは次節以降で紹介する他のプロジェクトも含め、日本における顕著現象の予測可能性研究（余田ほか 2008a）に大きく貢献したと思います。

4.2 WWRP 北京オリンピック2008研究開発プロジェクト（B08RDP）

世界気象機関（WMO）の中で天気予報に深く関わるものとして、世界天気研究計画（World Weather Research Programme；WWRP）があります。WWRPはWMO大気科学委員会（Commission for Atmospheric Science；CAS）の下のプログラムとして、気象予測の精度・リードタイム・利用の向上のための研究を通じて顕著気象に対応する社会の能力を向

上させることを目的として1995年に設立されました（松村 1997）。2015年に組織改編があり、現在は6つの作業部会（ナウキャストとメソスケール天気予報、社会経済研究及び応用、予測可能性とアンサンブル予報、熱帯気象研究、予報検証研究、データ同化と観測システム）と一つのプログラム（砂塵嵐警報と評価システム）による構成（http://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/wwrp_new_en.html 2015. 1.19閲覧）になっています。

WWRP 北京オリンピック2008予報実証/研究開発プロジェクト（B08FDP/RDP）は、2008年8月の北京オリンピックに合わせて各国気象機関が短期予報に関する国際比較実験を行うもので、2000年にシドニーオリンピックに合わせて行われたナウキャストと短時間予報の国際比較 Sydney2000FDP（Keenan *et al.* 2003）に引き続く WWRP 傘下の研究プロジェクトです。北京2008は6時間先までの短時間予報を対象とする予報実証プロジェクト（FDP）と、36時間先までの予報についての研究開発プロジェクト（RDP）の2つのコンポーネントに分かれており、日本（気象研究所/気象庁）は、米国（NCEP：大気海洋庁環境予測センター、NCAR：国立大気研究センター）、カナダ（MSC：カナダ気象局）、中国（NMC：国家気象センター、CAMS：中国気象科学院）、オーストラリア（ZAMG：気象地球力学中央研究所、フランス気象局が協力）などとともに RDP コンポーネントに参加しました。RDP の活動内容の中心は、Tier-1 と呼ばれる水平分解能15 km の領域モデルによるメソアンサンブル予報の相互比較で、実験を通じて得られる技術情報を各国のメソアンサンブル予測システムの開発に役立たせることを、プロジェクトの主な目的としていました。

気象研究所は、数値予報課の協力も得て、NHM を用いた B08RDP 用のメソアンサンブル予測システムの開発を行いました。2007年と2009年に開催された国際ワークショップについては、斉藤ほか（2008）や斉藤・國井（2009）に報告しています。

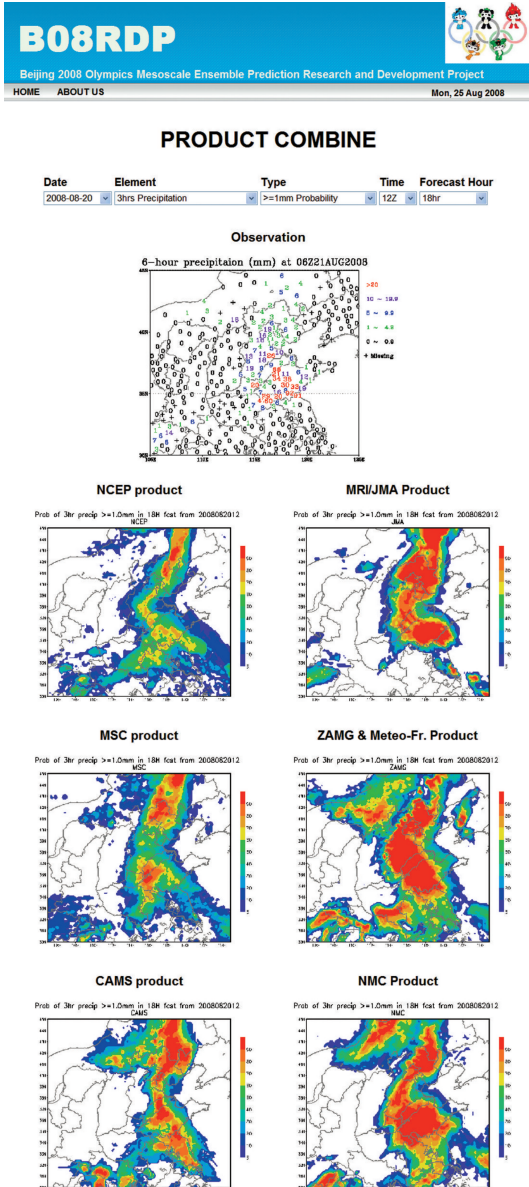
2008年の B08RDP 比較実験は、オリンピック期間を含む7月24日から8月24日の1カ月間を対象に行われました。参加機関は、1200UTC（現地時間午後8時）を初期値とするアンサンブル予報を準リアルタイムで行い、気温、湿度、風、降水量などの予報値を指定されたフォーマットで翌朝6時（日本時間午前7時）までに中国気象局サーバーにFTP送信しまし

た。これらの予報は、B08RDPのウェブサイトにて1日分のリードタイムを持って表示され(第11図)、北京管区気象台の予報官が出すオリンピック会場の予報の参考にも用いられました。

気象研究所では、2008年の本実験にあたって、メソ4次元変分法解析(メソ4D-VAR)を北京域で実行し、コントロールランの初期値を作成するとともに、通常メソ解析用データに加えて、中国内気象観測点による地上降水量とオーストラリア気象局がFDPコンポーネントで作成する北京域の解析雨量を同化した(Kunii *et al.* 2010a)。初期値摂動手法としては、週間アンサンブル予報のダウンスケール(WEP)、全球ターゲット特異ベクトル法(GSV)、メソ特異ベクトル法(MSV)、メソプリーディング法(MBD)、局所アンサンブルカルマンフィルタによるアンサンブル変換(LET)、の5つの手法を開発し、初期値摂動手法を選択するため、予報誤差に対するスプレッドの比と変化傾向、アンサンブル平均24時間予報対初期値RMSEの大きさ、降水のアンサンブル平均のスコアとプライアスコア、を客観的に比較しました。その結果、MSVやMBDのようなメソモデルベースの摂動手法は強雨の短時間予測について良好な成績を示すことやGSVが並雨までの予測やRMSEスプレッド比などで良好な成績を示すことなどが確認できました(Saito *et al.* 2011a)。一方、LETによる摂動は発達率やアンサンブル平均などがやや劣る傾向が見られました。これについては局所化による大域的な摂動構造の維持に改善すべき点が残っているように思われ、現在でも私の問題意識として残っています。

境界摂動として、気象研究所に専用線送信されているRSMC東京責任領域週間アンサンブル予報のP面ファイル(6時間おき1.25度)の前日予報(FT=24-60)からの摂動成分を3時間おきに時空間内挿し、予報時間による振幅の調整を加えて与えました。境界摂動の付与は、領域アンサンブル予報においては予報スプレッドを確保する上で必須であるばかりでなく、MBDとLETについては、プリーディング/同化サイクルにも境界摂動を与えることが、初期摂動や解析精度そのものにも大きな影響を与えることが分かりました(Saito *et al.* 2012)。

B08RDPのプロジェクト全体についてのレビューはDuan *et al.* (2012)に、参加国のメソアンサンブル予報の相互比較についてはKunii *et al.* (2011)にまとめられています。気象研のシステムは、地表の気温や相対湿度などの要素については1位、降水予測については弱雨については1位で並雨~強雨についてはカナダ気象局に次いで2位の、概ね良い成績でした。気象研究所の開発と国際相互比較の詳細などについては、



第11図 2008年8月20日12UTCを初期値とする18時間予報による3時間に1mm以上の降水がある確率の分布図。図中「Observation」は8月21日15時の前6時間降水量。Saito *et al.* (2010a)より。

気象研究所技術報告 (Saito *et al.* 2010a) に報告しています。このプロジェクトで開発した初期値・境界値の摂動手法は、2015年から試験運用が始まった気象庁のメソアンサンブル予報の現業化にも貢献しています。

4.3 東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究

「東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究」は、文部科学省科学技術振興調整費研究の「アジア科学技術協力の戦略的推進」分野の一課題として、2007 (平成19) 年度に採択されました。東南アジア諸国における大気科学研究の協力・連携を強化し、この地域の気象災害軽減に資するための「東南アジア地域気象災害軽減国際共同研究推進ネットワーク」を立上げることと、東南アジア地域での数値天気予報実験を国際的連携の下に実施して、気象災害の軽減判断支援システムを構築すること、などを主な目的としました (余田ほか 2008b)。

研究実施体制は、京都大学が代表機関となり、気象研究所は国内参画機関として、実用モデル開発・応用実験を担当し、

- ①気象庁メソモデルの精緻化と検証予報実験
- ②メソモデル国際共同研究のための環境整備
- ③メソモデルを用いた熱帯域データ同化実験

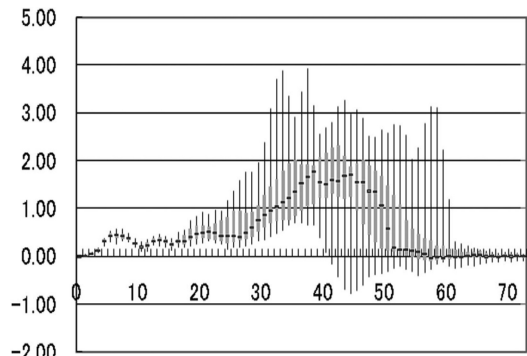
の3つのサブ課題を実施しました。①と②に関しては、Seko *et al.* (2008) は、2005年7月にインドのムンバイで発生した記録的豪雨のNHMによる再現実験を行い、豪雨を発生させた環境や豪雨周囲の気流系の役割などを調べました。Hayashi *et al.* (2008) は日本域および東南アジア域を対象に、2007年1月と7月の各1カ月間を対象に、NHMと米国のコミュニティメソモデルWRFを同一の条件で実行し、衛星データやゾンデ観測と比較することにより、降水や気温・風の予測精度の客観的比較検証を行いました。またTrilaksono *et al.* (2011) は、2007年1-2月を対象にインドネシアジャワ島での豪雨の再現実験を行い、モデルで表現される降水の水平解像度依存性を調べました。Seko *et al.* (2012) はスマトラ島周辺にモンスーン期に発生する対流セルの生成プロセスにおける周辺気流場と重力波の役割を明らかにしました。

2008年5月にミャンマーを襲ったサイクロン「ナルギス」は、同国南部に死者13万人超とも言われる未曾有の高潮被害をもたらしました。この今世紀 (1971年以降) 最大の気象災害を受け、日本気象学会は2008年の秋季大会でスペシャル・セッション「ミャンマーサ

イクロン」を開催し、2010年に「気象集誌」にナルギス関連研究論文の特集号を刊行しました。この研究では、Kuroda *et al.* (2010) が、気象庁全球解析を初期値とし全球予報を境界値とする10 km 解像度のNHMによって、ナルギスの移動と発達、上陸の2日前にある程度予測可能であったことを示すとともに、プリンストン海洋モデル (POM) を用いた高潮の予報実験を行いました。またSaito *et al.* (2010b) は、気象庁全球アンサンブル予報の初期値・予報値からの摂動を用いて、20メンバーの10 km NHMによる熱帯域メソアンサンブル予報システムを開発し、ナルギスの進路予報の誤差も加味した高潮予測を示しました (第12図)。

前述の③に関して、Kunii *et al.* (2010b) は、気象庁メソ4次元変分法解析で用いられている地衡風バランスの関係を見直すことにより、メソ解析を熱帯域に適用できるように改良を加え、ベンガル湾を対象とするポーガス手法も開発してNargisの同化予報実験を行い、初期値の変更によって進路・強度の改善が図れることを示しました。さらにShoji *et al.* (2011) は、メソ解析を用いたベンガル湾付近の地上GPSから得られる可降水量の同化実験を行い、強度予測が改善できることを報告しています。

京都大学では、上述のアンサンブル予測結果を入力データとして用いた気象災害軽減のための判断支援システムを試作しています。これらを含めたプロジェクト全体の詳細は、気象研究所技術報告 (Saito *et al.* 2011b) にまとめられています。



第12図 10 km メソアンサンブル予報によるイラワディ川河口における高潮水位の最大最小および中央値の時間変化。箱の幅は25%と75%確率値を示す。Saito *et al.* (2010b) より。

4.4 WMO 福島第一原発事故気象解析タスクチーム活動

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とそれに伴って発生した津波は、東日本大震災と呼ばれる大きな災害を各地にもたらしました。東京電力福島第一原子力発電所では、国際原子力事故評価尺度でレベル7に分類される極めて重大で広範囲に影響を及ぼす原子力事故が発生しました。

WMOの国連環境計画(UNEP)の一部として活動している委員会に「原子放射線の影響に関する国連科学委員会」(UNSCEAR; United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)があります。福島第一原子力発電所の事故を受けて、UNSCEARは、事故に関する放射線被曝のレベルと影響に関する評価報告書を作成することを決め、WMOはUNSCEARからの協力要請を受けて「福島第一原発事故に関する気象解析についての技術タスクチーム」を2011年11月に設置しました(Draxler *et al.* 2015)。気象庁は事故当事国の国家気象機関としてこのタスクチーム活動に中心的に協力しました(斉藤ほか 2014b)。

タスクチームでは、気象解析場の評価のための5 km解像度の領域大気移流拡散沈着モデル実験を行い、UNSCEARに気象解析場として非静力学4次元変分法に基づく気象庁メソ解析と気象庁解析雨量を提供しました。この領域モデル実験では、2011年3月11~31日を対象として、原子力開発研究機構などによる放射性物質の放出推定を基にして、各メンバーがそれぞれの移流拡散沈着モデルを用いて放射性物質の大

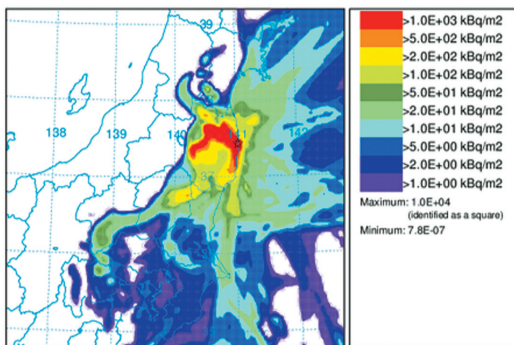
気濃度と沈着の計算を行いました。日本は、気象庁がオキシダント予測や降灰予報の業務に用いていたMSMの予報値を入力とする移流拡散モデル(新堀ほか 2010)をベースに放射性物質の扱いを加えたモデル(RATM)を開発し、大気濃度と沈着の計算結果を観測値で検証し、モデルの評価を行いました(Saito *et al.* 2015a)。第13図に気象庁RATM計算によるセシウム-137の積算沈着量の計算結果の例を示します。福島原発から北西に延びる高濃度の沈着域が概ね良く表現されています。

福島第一原発事故によって引き起こされた広範囲で深刻な放射能汚染という大変衝撃的な出来事は、社会的に最大級の関心事項になったとともに、学問に携わる研究者にもそれにどう向き合うべきかという様々な問いかけをもたらしました。日本気象学会では、事故直後の3月18日に拡散シミュレーションの結果公表に関する理事長メッセージを發出し、2015年3月に、気象学会としての理事長提言(新野 2012, 2015)を行っています。また2011年度秋季大会でスペシャル・セッションを、2012年度春季大会でシンポジウムを持つとともに、2013年1月には米国オーチンでの米国気象学会年次総会に合わせて日米気象学会共催の特別シンポジウムを開催しています(近藤ほか 2013)。日本学術会議では、放射性物質の輸送沈着モデル計算の比較(日本学術会議 2014)を行っており、前述した気象庁RATMの予測に基づく結果も含まれています。

WMOタスクチーム活動に関連して行った気象庁RATMの改良の一部は、2013年3月から気象庁のオキシダント予測業務及び降灰予報業務の改善にも反映しています。タスクチーム活動とそれに関係する気象研でのモデリング研究についての詳細は、気象研究所技術報告(Saito *et al.* 2015b)にまとめています。

4.5 極端気象に強い都市創りとTOMACS

2008年夏季は日本各地で局地的な荒天が頻発しました。岡崎市で時間雨量146.5 mmを記録した平成20年8月末豪雨のほか、7月28日には神戸市で都賀川河川敷にいた子供を含む5人が亡くなり、8月5日には東京都豊島区で下水道工事作業員5人が亡くなる、など急激な増水に伴う痛ましい事故が発生し、社会的にも大きな問題となりました(この神戸都賀川の事例については、前述したShoji *et al.* (2009)やSeko *et al.* (2011)で扱われています)。民間気象会社やマスコミが「ゲリラ豪雨」という言葉を多用するようになったきっかけにもなりました(小倉 2009)。



第13図 2011年3月11日~3月31日に対する気象庁RATM計算によるセシウム-137の積算沈着量。雲内湿性沈着を考慮した場合。Saito *et al.* (2015a)より。

これらを受けて、気象学会2009年度春季大会で、専門分科会「2008年夏季の局地豪雨」を持ち、その後、局地的大雨による災害を減らすための観測とナウキャスト、データ同化とモデリングを融合させたプロジェクト研究を起こせないかと、気象研究所の石原正仁さん（元高層気象台長）、防災科学技術研究所の真木雅之さん（現鹿児島大学）らと相談しました。この相談を契機に、防災科学技術研究所、気象研究所、東洋大学が中心となって国内25の機関が参加する科学技術振興調整費（後の科学技術戦略推進費）研究「気候変動に伴う極端気象に強い都市創り」が2010-2014年度に実施され、2011-2013年夏季を中心として首都圏をフィールドとした前例のない稠密観測が行われました。

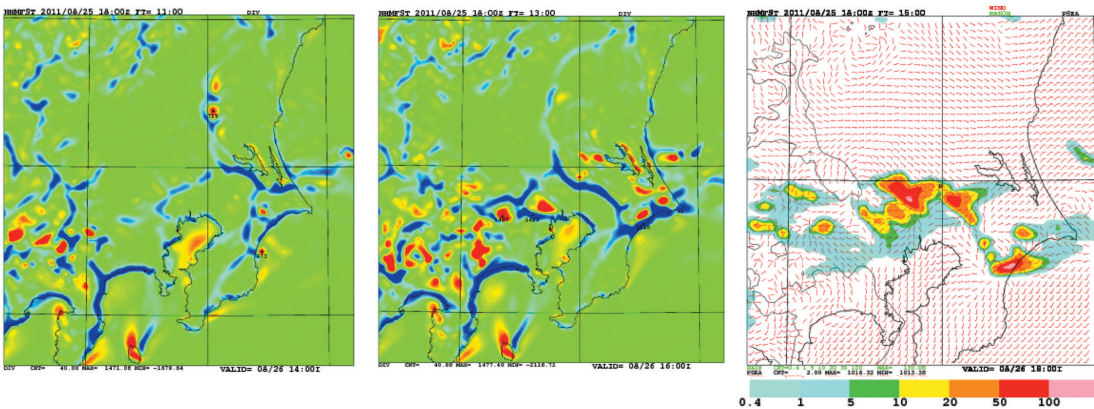
TOMACS (Tokyo Metropolitan Area Convection Study) は、石原さんの命名による上記研究の英名で、上記研究を、顕著な大気現象の機構解明や予測技術の改善に関する WWRP 傘下の RDP として位置づけるための提案を Nakatani *et al.* (2013) が行い、2013年7月に認証されました（中谷ほか 2014）。日本が主催する初めての RDP となりました。これまで、日本、米国、カナダ、ドイツ、ブラジル、フランス、韓国の7か国の参加のもと国際ワークショップを開催しており（Nakatani *et al.* 2015；三隅ほか 2015）、RDP としての TOMACS は2016年夏まで実施される予定です。

第14図は2011年8月26日の首都圏豪雨についての特異ベクトル法を用いた雲解像アンサンブル実験による

予報（齊藤ほか 2016）です。この事例では、鹿島灘と東京湾からの海風が一般場の北西風と収束場を作り、東京都西部～神奈川県に豪雨をもたらしたメソ対流系をトリガーしたことが分かっていますが、海風前線に対応する水平収束域のマージとそれに続く強い対流性降水の発生がモデルで表現されています。

4.6 HPCI 戦略プログラムとポスト京重点課題

神戸に設置されたスーパーコンピュータ「京」を先端研究に用いるための文部科学省の HPCI 戦略プログラムが2011（平成23）年度から行われています。社会的・学術的に大きなブレイクスルーが期待できる分野として5つの分野が選ばれて研究が行われています。このうち分野3「防災・減災に資する地球変動予測」では、気象・気候・地震・津波などによる自然災害に関するシミュレーションを行っています。研究課題の一つが「超高精度メソスケール気象予測の実証」で、海洋研究開発機構と気象研究所が中心となり、東京大学、京都大学、東北大学、名古屋大学、神戸大学、琉球大学、防災科学技術研究所などが参加しています。台風、集中豪雨、局地的大雨や竜巻など顕著気象現象の力学的な予測と、リードタイムを持った定量的確率予測の可能性を実証することを最終的な目的として、1) 領域雲解像4次元データ同化技術の開発、2) 領域雲解像アンサンブル解析予報システムの開発と検証、3) 高精度領域大気モデルの開発とそれを用いた基礎研究、の3つの科学目標に沿った研究を実施しています。（Saito *et al.* 2013；齊藤ほか 2015）。LETKF ネストシステム（Seko *et al.* 2013）を用い



第14図 2011年8月26日の首都圏豪雨事例に対する水平格子間隔2 kmのNHMを用いた特異ベクトル法アンサンブル予報のメンバーp04の下層(1000 hPa)の水平発散(左)14時と(中)16時、(右)18時の前1時間降水量。齊藤ほか(2016)より。

た2012年5月のつくば竜巻の実験, ビル解像 LES モデルによる海風前線の詳細構造の再現 (Chen *et al.* 2015a, b), 高解像度大気海洋結合モデルによる台風強度予測の改善 (Ito *et al.* 2015), サイクロン「ナルギス」のデータ同化と高潮の再現実験 (Duc *et al.* 2015) など, 主な成果は戦略分野3のHP (<http://www.jamstec.go.jp/hpci-sp/> 2015.1.19閲覧) に掲載しています。

HPCI 戦略プログラムは2015 (平成27) 年度で終了しますが, 後継課題としての意味合いを持つポスト「京」重点課題「観測ビッグデータを活用した気象と地球環境の予測の高度化」が2016 (平成28) 年度から本格スタートします。高精度のメソスケール気象予測研究は, サブ課題A「革新的な数値天気予報と被害レベル推定に基づく高度な気象防災」に引き継がれていくものと期待しています。

5. おわりに

私が最初に数値予報課の職員となった1986年から約30年が過ぎました。人生の大半を気象研究所と数値予報課で過ごしてきたこととなります。その多くを気象庁非静力学モデルの開発と現業化, メソスケール気象の研究に費やしてきました。岸保賞の名前に値する業績が残せたとは言い難いですが, 賞の対象となっている「社会貢献」に関して何がしかの寄与が出来たとしたら大変嬉しく思います。この本稿には, 選定理由に述べられた様々な事柄について述べました。私としてはそれぞれに思い入れがあって, 紙数を超過した事をお詫び申し上げます。

「はじめに」でも触れましたが, 本当に多くの方々にお世話になってきました。この「解説」は, 私がそれらの方々にとどのようにお世話になったかを綴ったものになっています。お名前をここに再掲するには多過ぎる全ての方々に変更して深く感謝し, おわりの言葉としたいと思います。最後に本稿をまとめるにあたり, 藤部文昭さん (首都大学東京), 佐藤正樹さん (東京大学大気海洋研究所), および永戸久喜さんをはじめとする気象庁予報部数値予報課の皆様, 大変お世話になったことを記すものです。

参 考 文 献

- Chen, G., X. Zhu, W. Sha, T. Iwasaki, H. Seko, K. Saito, H. Iwai and S. Ishii, 2015a: Toward improved forecasts of sea-breeze horizontal convective rolls at super high resolutions. Part I: Configuration and verification of a Down-Scaling Simulation System (DS³). *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1849-1872.
- Chen, G., X. Zhu, W. Sha, T. Iwasaki, H. Seko, K. Saito, H. Iwai and S. Ishii, 2015b: Toward improved forecasts of sea-breeze horizontal convective rolls at super high resolutions. Part II: The impacts of land use and buildings. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 1873-1894.
- Clark, T. L., 1977: A small-scale dynamic model using a terrain-following coordinate transformation. *J. Comput. Phys.*, **24**, 186-215.
- Deardorff, J. W., 1980: Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. *Bound.-Layer Meteorol.*, **18**, 495-527.
- Draxler, R., D. Arnold, M. Chino, S. Galmarini, M. Hort, A. Jones, S. Leadbetter, A. Malo, C. Maurer, G. Rolph, K. Saito, R. Servranckx, T. Shimbori, E. Solazzo and G. Wotawa, 2015: World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *J. Environ. Radioact.*, **139**, 172-184.
- Duan, Y., J. Gong, J. Du, M. Charron, J. Chen, G. Deng, G. DiMego, M. Hara, M. Kunii, X. Li, Y. Li, K. Saito, H. Seko, Y. Wang and C. Wittmann, 2012: An overview of the Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 381-403.
- Duc, L., T. Kuroda, K. Saito and T. Fujita, 2015: Ensemble Kalman Filter data assimilation and storm surge experiments of tropical cyclone Nargis. *Tellus A*, **67**, 25941, doi:10.3402/tellusa.v67.25941.
- Eito, H., M. Murakami, C. Muroi, T. Kato, S. Hayashi, H. Kuroiwa and M. Yoshizaki, 2010: The structure and formation mechanism of transversal cloud bands associated with the Japan-Sea polar-airmass convergence zone. *J. Meteor. Soc. Japan*, **88**, 625-648.
- Fujibe, F., K. Saito, D. S. Wratt and S. G. Bradley, 1999: A numerical study on the diurnal variation of low-level wind in the lee of a two-dimensional mountain. *J. Meteor. Soc. Japan*, **77**, 827-843.
- GEWEX Cloud System Science Team, 1993: The GEWEX Cloud System Study (GCSS). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **74**, 387-399.
- Hara, T., 2010: Turbulent process. *Tech. Rep. MRI*, (62), 168-178.
- Hayashi, S., K. Aranami and K. Saito, 2008: Statistical verification of short term NWP by NHM and WRF-ARW with 20 km horizontal resolution around Japan

- and southeast Asia. SOLA, 4, 133-136.
- Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata and T. Tsuyuki, 2005: A pre-operational variational data assimilation system for a non-hydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131, 3465-3475.
- Ikawa, M. and K. Saito, 1991: Description of a nonhydrostatic model developed at the Forecast Research Department of the MRI. Tech. Rep. MRI, 28, 238pp.
- Ito, K., T. Kuroda, K. Saito and A. Wada, 2015: Forecasting a large number of tropical cyclone intensities around Japan using a high-resolution atmosphere-ocean coupled model. Wea. Forecasting, 30, 793-808.
- Kato, T., 1995: A box-Lagrangian rain-drop scheme. J. Meteor. Soc. Japan, 73, 241-245.
- Kato, T. and K. Saito, 1995: Hydrostatic and nonhydrostatic simulations of moist convection: Applicability of the hydrostatic approximation to a high-resolution model. J. Meteor. Soc. Japan, 73, 59-77.
- Kawabata, T., H. Seko, K. Saito, T. Kuroda, K. Tamiya, T. Tsuyuki, Y. Honda and Y. Wakazuki, 2007: An assimilation and forecasting experiment of the Nerima heavy rainfall with a cloud-resolving nonhydrostatic 4-dimensional variational data assimilation system. J. Meteor. Soc. Japan, 85, 255-276.
- Kawabata, T., T. Kuroda, H. Seko and K. Saito, 2011: A cloud-resolving 4D-Var assimilation experiment for a local heavy rainfall event in the Tokyo metropolitan area. Mon. Wea. Rev., 139, 1911-1931.
- Kawabata, T., Y. Shoji, H. Seko and K. Saito, 2013: A numerical study on a mesoscale-convective system over a subtropical island with 4D-Var assimilation of GPS slant total delays. J. Meteor. Soc. Japan, 91, 705-721.
- Kawabata, T., K. Ito and K. Saito, 2014a: Recent progress of the NHM-4DVAR towards a super-high resolution data assimilation. SOLA, 10, 145-149.
- Kawabata, T., H. Iwai, H. Seko, Y. Shoji, K. Saito, S. Ishii and K. Mizutani, 2014b: Cloud-resolving 4D-Var assimilation of Doppler wind lidar data on a meso-gamma-scale convective system. Mon. Wea. Rev., 142, 4484-4498.
- 気象庁予報部, 2008: 気象庁非静力学モデルII—現業利用の開始とその後の発展—。数値予報課報告別冊, (54), 263pp.
- 気象庁予報部, 2014: 次世代非静力学モデル asuca。数値予報課報告別冊, (60), 149pp.
- Keenan, T., S. Rutledge, R. Carbone, J. Wilson, T. Takahashi, P. May, N. Tapper, M. Platt, J. Hacker, S. Sekelsky, M. Moncrieff, K. Saito, G. Holland, A. Crook and K. Gage, 2000: The Maritime Continent Thunderstorm Experiment (MCTEX): Overview and some results. Bull. Amer. Meteor. Soc., 81, 2433-2455.
- Keenan, T., P. Joe, J. Wilson, C. Collier, B. Golding, D. Burgess, P. May, C. Pierce, J. Bally, A. Crook, A. Seed, D. Sills, L. Berry, R. Potts, I. Bell, N. Fox, E. Ebert, M. Eilts, K. O'Loughlin, R. Webb, R. Carbone, K. Browning, R. Roberts and C. Mueller, 2003: The Sydney 2000 World Weather Research Programme Forecast Demonstration Project: Overview and current status. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84, 1041-1054.
- Klemp, J. B. and R. B. Wilhelmson, 1978: The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. J. Atmos. Sci., 35, 1070-1096.
- Kondo, H., K. Saito, Y. Mamiya and M. Hara, 1982: On the conservation of the energy of low-frequency waves in iterative time integration schemes. J. Meteor. Soc. Japan, 60, 824-829.
- 近藤裕昭, 山田哲二, 茅野政道, 岩崎俊樹, 堅田元喜, 眞木貴史, 斉藤和雄, 寺田宏明, 鶴田治雄, 2013: 日米気象学会共催「福島第一原子力発電所からの汚染物質の輸送と拡散に関する特別シンポジウム—現状と将来への課題—」報告。天気, 60, 723-729.
- Kunii, M., K. Saito and H. Seko, 2010a: Mesoscale data assimilation experiment in the WWRP B08RDP. SOLA, 6, 33-36.
- Kunii, M., Y. Shoji, M. Ueno and K. Saito, 2010b: Mesoscale data assimilation of Myanmar cyclone Nargis. J. Meteor. Soc. Japan, 88, 455-474.
- Kunii, M., K. Saito, H. Seko, M. Hara, T. Hara, M. Yamaguchi, J. Gong, M. Charron, J. Du, Y. Wang and D. Chen, 2011: Verification and intercomparison of mesoscale ensemble prediction systems in the Beijing 2008 Olympics Research and Development Project. Tellus, 63, 531-549.
- Kuroda, T., K. Saito, M. Kunii and N. Kohno, 2010: Numerical simulations of Myanmar cyclone Nargis and the associated storm surge. Part 1: Forecast experiment with a nonhydrostatic model and simulation of storm surge. J. Meteor. Soc. Japan, 88, 521-545.
- 増田善信, 1981: 数値予報 その理論と実際。東京堂出版, 278pp.
- 松村崇行, 1997: 世界気象機関大気科学委員会 (WMO/CAS) 短時間短期予報研究作業部会と世界気象研究計画 (WWRP) 構想。天気, 44, 847-854.
- 三隅良平, 中谷 剛, 小司禎教, 瀬古 弘, 斉藤和雄, 清野直子, 鈴木真一, 出世ゆかり, 平野洪資, 足立アホ

- ロ, 山内 洋, 2015: 第 2 回 TOMACS 国際 ワークショップの報告—首都圏をフィールドとした極端気象に関する国際共同研究の進捗—。天気, 62, 511-516.
- 室井ちあし, 1998: 非静力モデルの開発。数値予報課報告・別冊, (44), 25-41.
- 室井ちあし, 斉藤和雄, 加藤輝之, 永戸久喜, 1999: 気象庁気象研究所・数値予報課統一メソモデルの開発。日本気象学会秋季大会予稿集, B305.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2004: An improved Mellor-Yamada Level-3 model with condensation physics: Its design and verification. Bound.-Layer Meteor., 112, 1-31.
- Nakatani, T., Y. Shoji, R. Misumi, K. Saito, N. Seino, H. Seko, Y. Fujiyoshi and I. Nakamura, 2013: WWRP RDP Science Plan: Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities (TOMACS). WWRP report for Joint Scientific Committee, 26pp. (available online at https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/Doc4_6_TOMACS_RDP_proposal_20130704.pdf)
- 中谷 剛, 三隅良平, 小司禎教, 斉藤和雄, 瀬古 弘, 清野直子, 鈴木真一, 出世ゆかり, 前坂 剛, 菅原広史, 2014: 第 1 回 TOMACS 国際 ワークショップの報告—WMO 世界天気研究計画・研究開発プロジェクトの開始—。天気, 61, 557-564.
- Nakatani, T., R. Misumi, Y. Shoji, K. Saito, H. Seko, N. Seino, S. Suzuki, Y. Shusse, T. Maesaka and H. Sugawara, 2015: Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities. Bull. Amer. Meteor. Soc., 96, 123-126.
- 日本学術会議, 2014: 東京電力福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質の輸送沈着過程に関するモデル計算結果の比較。日本学術会議総合工学委員会原子力事故対応分科会, 112pp. (執筆協力)
- 新野 宏, 2012: 「原子力関連施設の事故発生時の放射性物質拡散への対策に関する提言」を行うに当たって。天気, 59, 469-474.
- 新野 宏, 2015: 原子力関連施設の事故に伴う放射性物質の大気拡散監視・予測技術の強化に関する提言。天気, 62, 111-112.
- 小倉義光, 2009: お天気の見方・楽しみ方 (16) グリラ豪雨という言葉をなくそう。天気, 56, 555-563.
- Ohmori, S. and Y. Yamada, 2006: Development of cumulus parameterization scheme in the non-hydrostatic mesoscale model at the Japan Meteorological Agency. CAS/JSC WGNE Res. Act. Atmos. Ocean. Model., (35), 4-21-4-22.
- Redelsperger, J. L., P. R. A. Brown, F. Guichard, C. Hoff, M. Kawasima, S. Lang, T. Montmerle, K. Nakamura, K. Saito, C. Seman, W. K. Tao and L. J. Donner, 2000: A GCSS model intercomparison for a tropical squall line observed during TOGA-COARE. Part 1: Cloud-resolving models. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 126, 823-863.
- 斉藤和雄, 1980: 気象擾乱の時間積分とノイズの減衰法について。気象大学卒業研究論文, 36pp.
- 斉藤和雄, 1992: 故猪川元興博士著作集。天気, 39, 684.
- Saito, K., 1992: Shallow water flow having a lee hydraulic jump over a mountain range in a channel of variable width. J. Meteor. Soc. Japan, 70, 775-782.
- Saito, K., 1993: A numerical study of the local downslope wind Yamaji-kaze in Japan. Part 2: Non-linear aspect of the 3-D flow over a mountain range with a col. J. Meteor. Soc. Japan, 71, 247-271.
- 斉藤和雄, 1994: 山越え気流について (おろし風を中心として)。天気, 41, 731-750.
- Saito, K., 1994: A numerical study of the local downslope wind Yamaji-kaze in Japan. Part 3: Numerical simulation of the 27 September 1991 windstorm with a non-hydrostatic multi-nested model. J. Meteor. Soc. Japan, 72, 301-329.
- Saito, K., 1995: Dynamical and numerical study of the downslope wind accompanied by a hydraulic jump. Doctoral dissertation submitted to the Faculty of Science, University of Tokyo, 101pp.
- Saito, K., 1997: Semi-implicit fully compressible version of the MRI mesoscale nonhydrostatic model. —Forecast experiment of the 6 August 1993 Kagoshima torrential rain—. Geophys. Mag. Ser.2, 2, 109-137.
- 斉藤和雄, 1999a: 気圧方程式の数値解法と境界条件。気象研究ノート, (196), 45-56.
- 斉藤和雄, 1999b: 非静力学モデルによる予報実験。関東地域メソ解析プロジェクト, 気象庁技術報告, (120), 152-174.
- 斉藤和雄, 2001a: 非静力学モデルの開発と数値実験による研究—2000年度日本気象学会賞受賞記念講演—。天気, 48, 11-25.
- 斉藤和雄, 2001b: 寒気吹き出し雲の数値シミュレーション。パリティ, 16, 46-51.
- 斉藤和雄, 2003a: 時間積分法。数値予報課報告別冊, (49), 26-35.
- 斉藤和雄, 2003b: 全球非静力学モデル。数値予報課報告別冊, (49), 117-127.
- 斉藤和雄, 2004: 全球モデル開発プロジェクト。数値予報課報告別冊, (50), 1-7.
- 斉藤和雄, 2008: 浮力の扱いの変更。数値予報課報告別冊, (54), 44-45.
- Saito, K. and M. Ikawa, 1991: A numerical study of the

- local downslope wind Yamaji-kaze in Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **69**, 31-56.
- 斉藤和雄, 猪川元興, 1992: 非静水圧ネスティングモデルによる局地風系のシミュレーション. *天気*, **39**, 615-625.
- 斉藤和雄, 石田純一, 2008: 適応水蒸気拡散の導入 (メソ数値予報モデルと応用 第2.4.1節) 数値予報課報告別冊, (54), 52-53.
- 斉藤和雄, 加藤輝之, 1996: 気象研究所非静水圧ネスティングモデルの改良について. *天気*, **43**, 369-382.
- 斉藤和雄, 國井 勝, 2009: 第4回 WWRP 北京オリンピック2008予報実証実験/研究開発プロジェクト (B08 FDP/RDP) ワークショップ報告. *天気*, **56**, 647-654.
- 斉藤和雄, 牧原康隆, 2007: 降水現象の予報高度化の技術. *天気*, **54**, 622-631.
- Saito, K., M. Murakami, T. Matsuo and H. Mizuno, 1996: Sensitivity experiments on the orographic snowfall over the mountainous region of northern Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, **74**, 797-813.
- Saito, K., G. Doms, U. Schaeffler and J. Steppeler, 1998: 3-D mountain waves by the Lokal-Modell of DWD and the MRI mesoscale nonhydrostatic model. *Pap. Meteor. Geophys.*, **49**, 7-19.
- 斉藤和雄, 加藤輝之, 永戸久喜, 室井ちあし, Gopal Kuman, 山岸米二郎, 米村 崇, 1999: 気象研究所非静力学モデルの並列化について. 日本気象学会秋季大会予稿集, B306.
- Saito, K., T. Keenan, G. Holland and K. Puri, 2001a: Numerical simulation of the diurnal evolution of tropical island convection over the Maritime Continent. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 378-400.
- Saito, K., T. Kato, H. Eito and C. Muroi, 2001b: Documentation of the Meteorological Research Institute/ Numerical Prediction Division Unified Nonhydrostatic Model. *Tech. Rep. MRI*, (42), 133pp.
- 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.
- Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita and Y. Honda, 2007: Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271-304.
- 斉藤和雄, 瀬古 弘, 國井 勝, 2008: 第3回 WWRP 北京2008予報実証実験/研究開発プロジェクト (B08 FDP/RDP) ワークショップ報告. *天気*, **55**, 81-89.
- 斉藤和雄, 瀬古 弘, 青梨和正, 小司禎教, 川畑拓矢, 國井 勝, 原 昌弘, 柳野 健, 山口宗彦, 津口裕茂, 本田有機, 小野耕介, 藤田 匡, 古本淳一, 三好建正, 若月泰孝, 松枝未遠, 近藤圭一, 田中 博, 2009: 平成17~20年度科学研究費補助金基盤研究(B)「豪雨の力学的予測のための初期値解析と予測信頼性の評価に関する研究」成果報告書 (詳細版). 363pp.
- Saito, K., M. Kunii, M. Hara, H. Seko, T. Hara, M. Yamaguchi, T. Miyoshi and W. Wong, 2010a: WWRP Beijing 2008 Olympics Forecast Demonstration / Research and Development Project (B08FDP/RDP). *Tech. Rep. MRI*, (62), 210pp.
- Saito, K., T. Kuroda, M. Kunii and N. Kohno, 2010b: Numerical simulation of Myanmar cyclone Nargis and the associated storm surge. Part 2: Ensemble prediction. *J. Meteor. Soc. Japan*, **88**, 547-570.
- Saito, K., M. Hara, M. Kunii, H. Seko and M. Yamaguchi, 2011a: Comparison of initial perturbation methods for the mesoscale ensemble prediction system of the Meteorological Research Institute for the WWRP Beijing 2008 Olympics Research and Development Project (B08RDP). *Tellus*, **63A**, 445-467.
- Saito, K., T. Kuroda, S. Hayashi, H. Seko, M. Kunii, Y. Shoji, M. Ueno, T. Kawabata, S. Yoden, S. Otsuka, N. J. Trilaksono, T. Y. Koh, S. Koseki, L. Duc, K. T. Xin, W. K. Wong and K. C. Gouda, 2011b: International Research for Prevention and Mitigation of Meteorological Disasters in Southeast Asia. *Tech. Rep. MRI*, (65), 198pp.
- Saito, K., H. Seko, M. Kunii and T. Miyoshi, 2012: Effect of lateral boundary perturbations on the breeding method and the local ensemble transform Kalman filter for mesoscale ensemble prediction. *Tellus*, **64**, 11594, doi:10.3402/tellusa.v64i0.11594.
- Saito, K., T. Tsuyuki, H. Seko, F. Kimura, T. Tokioka, T. Kuroda, L. Duc, K. Ito, T. Oizumi, G. Chen, J. Ito and SPIRE Field 3 Mesoscale NWP group, 2013: Super high-resolution mesoscale weather prediction. *J. Phys. Conf. Ser.*, **454**, 012073, doi:10.1088/1742-6596/454/1/012073.
- 斉藤和雄, 瀬古 弘, 青梨和正, 小司禎教, 川畑拓矢, 國井 勝, 大塚道子, 折口征二, 横田 祥, 荒木健太郎, 幾田泰醇, 小野耕介, 村山泰啓, 岩井宏徳, 佐藤晋介, 古本淳一, 岩崎俊樹, 西 暁史, 2014a: 平成21~25年度 科学研究費補助金基盤研究(A)「局地豪雨予測のための先端的データ同化と雲解像アンサンブル予報に関する研究」成果報告書 (詳細版). 637pp.
- 斉藤和雄, 新堀敏基, 原 旅人, 豊田英司, 加藤輝之, 藤田 司, 永田和彦, 本田有機, 2014b: WMO「福島第一原発事故に関する気象解析についての技術タスクチーム」活動. *測候時報*, **81**, 1-30.

- 斉藤和雄, 瀬古 弘, 露木 義, 中村晃三, 坪木和久, 2015: 第5回超高精度メソスケール気象予測研究会報告. 天気, 62, 649-655.
- Saito, K., T. Shimbori and R. Draxler, 2015a: JMA's regional atmospheric transport model calculations for the WMO technical task team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, 139, 185-199.
- Saito, K., T. Shimbori, R. Draxler, T. Hara, T. Toyoda, Y. Honda, K. Nagata, T. Fujita, M. Sakamoto, T. Kato, M. Kajino, T. T. Sekiyama, T. Y. Tanaka, T. Maki, H. Terada, M. Chino, T. Iwasaki, M. C. Hort, S. J. Leadbetter, G. Wotawa, D. Arnold, C. Maurer, A. Malo, R. Servranckx and P. Chen, 2015b: Contribution of JMA to the WMO Technical Task Team on meteorological analyses for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident and relevant atmospheric transport modelling at MRI. *Tech. Rep. MRI*, (76), 230pp.
- 斉藤和雄, 国井 勝, 荒木健太郎, 2016: 2011年8月26日首都圏豪雨の雲解像アンサンブル実験. 気象研究ノート. (投稿中)
- 櫻井仁人, 細山田三郎, 1994: 鹿児島豪雨における降雨の実態. 鹿児島大学調査研究会「1993年鹿児島豪雨災害の総合的調査研究」報告書, 1-12.
- Sawada, M., T. Sakai, T. Iwasaki, H. Seko, K. Saito and T. Miyoshi, 2015: Assimilating high-resolution winds from a Doppler lidar using an ensemble Kalman filter with lateral boundary adjustment. *Tellus*, 67, 23473, doi:10.3402/tellusa.v67.23473.
- Seko, H., S. Hayashi, M. Kunii and K. Saito, 2008: Structure of the regional heavy rainfall system that occurred in Mumbai, India, on 26 July 2005. *SOLA*, 4, 129-132.
- Seko, H., M. Kunii, Y. Shoji and K. Saito, 2010: Improvement of rainfall forecast by assimilations of ground-based GPS data and radio Occultation data. *SOLA*, 6, 81-84.
- Seko, H., T. Miyoshi, Y. Shoji and K. Saito, 2011: Data assimilation experiments of precipitable water vapour using the LETKF system: Intense rainfall event over Japan 28 July 2008. *Tellus*, 63A, 402-414.
- Seko, H., S. Hayashi and K. Saito, 2012: Processes generating convection cells near Sumatra Island in the monsoon season. *Pap. Meteor. Geophys.*, 63, 57-67.
- Seko, H., T. Tsuyuki, K. Saito and T. Miyoshi, 2013: Development of a two-way nested LETKF system for cloud resolving model. *Data Assimilation for Atmospheric, Oceanic and Hydrological Applications*, Springer, 2, 489-505.
- 新堀敏基, 相川百合, 福井敬一, 橋本明弘, 清野直子, 山里 平, 2010: 火山灰移流拡散モデルによる量的降灰予測—2009年浅間山噴火の事例—. 気象研究所研究報告, 61, 13-29.
- 小司禎教, 2015: GNSS 地上観測網による水蒸気量推定と気象学への応用に関する研究—2015年度日本気象学会賞受賞記念講演—. 天気, 62, 983-999.
- Shoji, Y., M. Kunii and K. Saito, 2009: Assimilation of nationwide and global GPS PWV data for a heavy rain event on 28 July 2008 in Hokuriku and Kinki, Japan. *SOLA*, 5, 45-48.
- Shoji, Y., M. Kunii and K. Saito, 2011: Mesoscale data assimilation of Myanmar cyclone Nargis. Part II: Assimilation of GPS-derived precipitable water vapor. *J. Meteor. Soc. Japan*, 89, 67-88.
- Skamarock, W. C. and J. B. Klemp, 1992: The stability of time-split numerical methods for the hydrostatic and the nonhydrostatic elastic equations. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 2109-2127.
- Smith, R. B., 1980: Linear theory of stratified hydrostatic flow past an isolated mountain. *Tellus*, 32, 348-364.
- Takeda, T., 1971: Numerical simulation of a precipitating convective cloud: The formation of a “long-lasting” cloud. *J. Atmos. Sci.*, 28, 350-376.
- Tapp, M. C. and P. W. White, 1976: A non-hydrostatic mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102, 277-296.
- Trilaksono, N. J., S. Otsuka, S. Yoden, K. Saito and S. Hayashi, 2011: Dependence of model-simulated heavy rainfall on the horizontal resolution during the Jakarta flood event in January-February 2007. *SOLA*, 7, 193-196.
- 上野幹雄, 川畑拓矢, 酒井亮太, 白川栄一, 石田純一, 斉藤和雄, 2000: NHM 統合環境の紹介—パソコン版気象研究所非静力学モデル (NHM) 一. 天気, 47, 289-294.
- Yanase, W., H. Niino and K. Saito, 2002: High-resolution numerical simulation of a polar low. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 3_1-3_4.
- 余田成男, 中澤哲夫, 山口宗彦, 竹内義明, 木本昌秀, 榎本 剛, 岩崎俊樹, 向川 均, 松枝未遠, 茂木耕作, 三好建正, 新野 宏, 斉藤和雄, 瀬古 弘, 小司禎教, 2008a: 日本における顕著現象の予測可能性研究. 天気, 55, 117-126.
- 余田成男, 斉藤和雄, 竹見哲也, 西澤誠也, 2008b: 東南アジア地域の気象災害軽減に資する国際共同研究の新展開. 天気, 55, 705-708.

Development of the JMA Nonhydrostatic Model and
Mesoscale Weather Prediction Studies

Kazuo SAITO*

* *Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-0052, Japan.*

(Received 28 September 2015; Accepted 10 December 2015)
