



メソスケールの気象予測

齊藤 和雄*

Mesoscale Weather Prediction

Kazuo Saito*

Key words: Weather prediction, Disaster prevention, Mesoscale, Data assimilation, Ensemble forecast

1. はじめに

日本や東南アジアでは毎年のように気象災害が発生する。2008年には、ミャンマーで5月にサイクロンナルギスの高潮により、死者・行方不明者13万人という最大級の気象災害が発生した。この年は日本では、7月に神戸市都賀川で、8月に東京都世田谷区雑司ヶ谷で、急激な増水による痛ましい事故が発生するなど、各地で局地的な大雨による災害が頻発し、社会的な問題となった。最近でも、平成23年7月新潟・福島豪雨や2011年9月の台風第12号、2012年5月の茨城県つくば市などの竜巻災害や平成24年7月九州北部豪雨などの大きな気象災害が発生している。

水平2~2,000 kmの気象現象をメソ(中間)スケール現象と呼ぶ。台風や前線、集中豪雨や局地的大雨、積乱雲、竜巻やダウンバーストといった災害につながる激しい気象現象が含まれており、その予測は、防災・減災上きわめて重要である。天気予報の技術は、近年めざましく進歩しているが、災害につながるような激しい顕著現象を正確にシミュレーションするのは現在でも大変難しい。本稿では、数値モデルによる気象予測の特徴について簡単に述べ、次世代スパコン「京」の利用を含む災害につながる顕著気象現象の予測に向けた取り組みについても紹介する。

2. 数値モデルによる気象現象の予測

数値モデルによる気象予測は、大気の状態を離散化

して数値的に表現し、物理法則に基づいて大気状態の時間変化を計算して将来の大気の状態を予測するものである。予測の精度を左右する要素としては、数値モデル(領域、分解能、力学過程、物理過程)、初期条件(データ、解析手法)、境界条件の3つが挙げられる。

2.1 数値モデル

乾燥大気の状態を表す代表的な変数としては、風(速度の3成分 u, v, w)、気圧(p)、気温(T)、密度(ρ)がある。これらに対応する基礎的な時間発展式としては、

3方向の運動方程式

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (3)$$

連続の式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

熱力学第一法則

$$\frac{d}{dt}(\ln \theta) = \frac{Q}{c_p T} \quad (5)$$

の5つがあり、診断式としての状態方程式

$$p = \rho RT \quad (6)$$

を加えた6つの式が、基本的な支配方程式となる。ここで g は重力加速度、 R は乾燥空気の気体定数、 Q は非断熱加熱、 c_p は気体の定圧比熱である。 θ は温位と呼ばれる参照圧力 p_0 (通常 1000 hPa) へ断熱的に変化させたときの気体の温度で、

* 気象研究所予報研究部/海洋研究開発機構
Forecast Research Department, Meteorological Research Institute/
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (7)$$

で定義される非断熱過程での保存量である。

数値風洞などに用いられる工学モデルと気象モデルの大きな違いとして、扱う問題の時間・空間的なスケールの違いがある。工学モデルでは扱うスケールが小さいため、密度を一定(非圧縮)と仮定して非断熱効果を無視出来る場合も多く、その場合、支配方程式系は3方向の運動方程式と連続の式の4つに縮退する。一方、気象モデルは、時間スケールとして数時間～一週間、空間スケールとしては鉛直方向に数百 m～数十 km、水平方向には数十 km～地球全体(全球)程度を予報対象領域とするため、大気成層や非断熱効果、地球回転の影響などを考慮する必要がある。

現象の鉛直スケールが水平スケールよりもずっと小さい場合、重力と鉛直気圧傾度力はほぼ釣り合っていて、静力学平衡

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (8)$$

の関係が良い近似で成り立つ。運動方程式(3)の代わりに(8)を用いるモデルを静力学モデルと呼ぶ。静力学平衡の関係を使えば、地表気圧と密度(あるいは気温)から気圧の3次元分布を、鉛直流を水平風と連続の式から診断することができる。地表気圧の時間変化は、連続の式(4)の鉛直積分から水平風による質量フラックスの総和で求めることが出来るため計算に便利で、一般的な天気予報のための数値予報モデル、特に全球モデルでは静力学モデルが伝統的に用いられてきている。近年はモデルの高解像度化に伴って、領域モデルを中心に静力学近似を行わないモデル(非静力学モデル)の利用が主流になりつつあり、後述するように気象庁のメソスケール領域モデルでも2004年から非静力学モデルが使われるようになってきている。非静力学モデルは、静力学近似を行わず鉛直方向にも運動方程式を使うので、扱う現象のスケールに原理的な制限がなくなるが、3次元の気圧と上昇流を直接予報しなければならぬ。また連続の式に圧縮性を考慮する場合、解に音波が含まれるので、そのまま時間積分する(陽解法する)場合、数値的な不安定を起こさずに計算できるタイムステップ Δt は、格子間隔を Δs として CFL 条件(Courant-Friedrichs-Lewy Condition)

$$\Delta t < \frac{\Delta s}{c_s} \quad (9)$$

によって音速 c_s の制約を受ける。気象モデルでは、大

気境界層の表現のためには鉛直方向に数十 m 以下の格子間隔をとる必要がある。音速は 300 m/s を超えるため、陽解法では非常に小さなタイムステップでなければ安定な積分が出来ない。このため、鉛直方向(場合によっては水平方向)には陰解法するなどその扱いに工夫が必要になる(詳しくは、例えば、斉藤(1999)、Saito et al. (2007)などを参照)。計算機能力の向上に伴い、最近では、全球非静力学モデルの開発やそれを用いた研究も行われるようになってきている(例えば、Satoh et al. (2008)、Takahashi et al. (2007))など。

実際の気象モデルでは、大気中の水の状態の表現と、水の状態変化や放射などによる非断熱過程が非常に重要で、その扱いは大変複雑で多岐にわたる。個々の水粒子の振る舞いや、放射や地表面過程、乱流などの物理過程をモデルで完全に直接計算することは一般には不可能なので、これらの過程の格子スケールへの影響を取り込むための何らかの粗視化(パラメタリゼーション)が行われる。代表的なものとしては、バルク法と呼ばれる雲物理過程(水物質を水蒸気、雲水、雨、氷晶、雪、あられ、などのカテゴリーに分け、混合比や数濃度のみのモーメントを計算する手法)や乱流クロロジャモデル(格子スケールで解像出来ない乱流による渦拡散の効果を乱流エネルギーなどの量で粗視化する)などがある。水平解像度が概ね 5 km よりも粗いモデルでは、個々の雲を解像できないため、積乱雲や積雲対流もパラメタリゼーションの対象になり、現業数値予報モデルや気候モデルで広く使われている。

2.2 初期条件

数値モデルによる気象予測は初期値問題であり、メソスケール現象の予測において初期値の精度は決定的に重要である。メソスケールの顕著現象の予測における最大の問題として、現象のスケールに対して十分な精度で初期値を作成することが難しいことが挙げられる。地球温暖化などの気候モデルによる研究と実用的な気象予測との大きな違いがここにある。大気の初期状態把握のためには観測データが必要だが、一般には観測は限られているので、前の時間の数値予報の予報値を第一推定値として、それを観測で修正して初期値を作る作業が行われる。観測データを数値予報に取り込む作業を「データ同化」、データ同化によってモデルの初期時間の場を推定する作業を「解析」と呼ぶ。観測と初期値解析と予報モデルは、観測データと品質管理、初期値と第一推定値で密接に結びついており、近年は後述するように初期値解析にもモデルが使われるようになってきている。

表 1 気象庁メソ数値予報の主な変更

2001年 3月	メソモデル(MSM)運用開始 10 km 40 層
2001年 6月	ウインドプロファイラデータ利用開始
2002年 3月	メソ4次元変分法(4DVAR)導入(20 km 40 層)
2002年 8月	国内航空機観測データ利用開始
2003年 10月	衛星マイクロ波放射計可降水量/降水データ利用開始
2004年 7月	QuikSCAT 散乱計海上風データ利用開始
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動径風データ利用開始
2006年 3月	5 km 50 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(15 km 40 層)
2009年 10月	GPS 可降水量データ利用開始
2010年 11月	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

更としては、2002年3月の4次元変分法の導入(Koizumi et al., 2005)、2009年4月の非静力学4次元変分法の導入とそれに伴うインナーループモデルの20 km から15 km への高解像度化(Honda and Sawada, 2008)などがある。また物理過程の大きな変更としては、2004年9月の非静力学モデル利用開始に伴うバルク法雲物理過程の導入、2007年5月の2次の乱流統計量まで予報するレベル3の乱流クロージャモデルの導入(Hara, 2007)などがある。

図2に2001年3月から2012年11月までのMSMによる降水の予測精度の変遷を示す。日本周辺の解析雨量で3時間1 mm, 10 mm, 50 mmの3つの閾値に対して、20 kmの検証格子を用いて予報時間15時間までのスレットスコア¹の平均値の月毎の値と前12カ月移動平均をプロットしている。月毎の変動が大きい、3時間1 mmの弱い雨や3時間10 mm程度の並雨についての移動平均のスコアは、上下はあるものの年々向上しているのが分かる。その一方、3時間50 mm以上のスコアに見られるように、災害につながるような非常に強い雨の予測の絶対的な精度はまだかなり低い数字に留まっている。

¹ 予報あり実況ありを「適中(FO)」、予報あり実況なしを「空振り(FX)」、予報なし実況ありを「見逃し(XO)」とした場合、 $FO/(FO+FX+XO)$ で計算するスコア。通常の中率と異なり予報なし実況なし(XX)についてはカウントしない。

MSMの強雨の予測精度が十分でないことの原因の一つとして、MSMの格子間隔は5 kmでありこの解像度では積乱雲を直接表現出来ないために積雲対流をパラメタリゼーションしていることがある。気象庁では、2012年8月から解像度2 km 60層の局地モデル(LFM)の運用を東日本を対象として開始しており、2013年に領域を日本全体に拡張する予定である。但し、迅速な予報結果の提供など計算時間の制約から、初期値作成は5 km解像度の3次元変分法で行う計画になっている。

4. 気象研究所でのメソスケール気象予測研究

4.1 メソスケールデータ同化

災害につながるような顕著現象を数値モデルで予測することが難しい最大の原因として、数値モデルに取り込む観測データが十分でなく、初期値の精度が現象のスケールに対して十分でないことが挙げられる。気象研究所では、所内重点研究「メソスケールデータ同化とアンサンブル予報に関する研究」や科研費研究「局地豪雨予測のための先端的データと雲解像アンサンブル手法に関する研究」、および次章に述べるHPCI戦略プログラムなどに関連して、高解像度高頻度での観測データ同化研究を実施している。

4次元変分法を用いた最近のシミュレーションの例としては、Kawabata et al. (2011)による局地豪雨の雲解像同化実験がある。水平解像度2 kmの非静力学4次元変分法(NHM-4DVAR)を用いて空港ドップラーレーダーの動径風と反射強度を1分おきに、国土地理院の地上GPS連続観測システム(GEONET)から得られる可降水量を5分おきに、アメダスなど地表の風と気温を10分おきに同化することにより2005年9月の杉並区における局地的大雨の短時間予測に成功している。Kawabata et al. (2013)は、2009年8月に沖縄ガープ川で発生した増水事故のケースに関して、GPS視線遅延量を同化する実験を行っている。可降水量がGPS観測点上空の大気の水蒸気鉛直積算量に関するデータであるのに対して、視線遅延量は地上観測点とGPS衛星の視線方向の水蒸気の積算量を反映したデータであり、高解像度のデータ同化で水蒸気の3次元分布を得るのに効果を発揮すると期待される。

4.2 メソアンサンブル予報

データ同化の基本は、背景場の誤差情報と観測データの誤差情報に応じたベイズの定理に基づく最尤推定であり、真の初期状態は、解析誤差の大きさに応じた確率密度関数の中に分布している。このため数値モデ

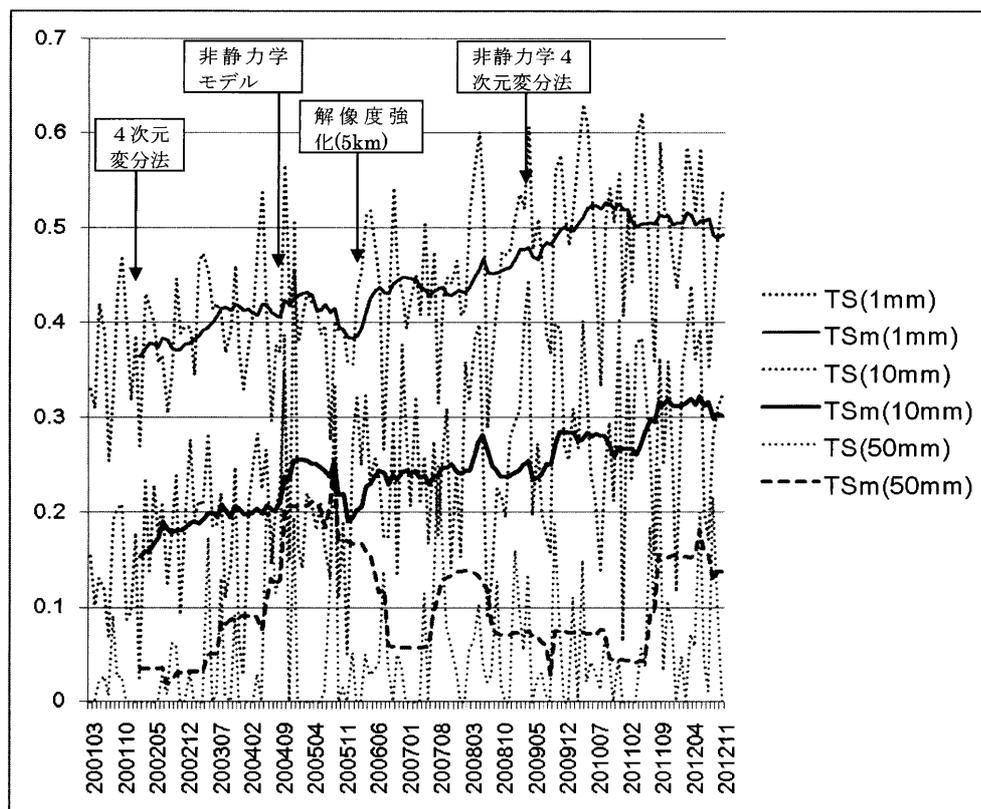


図2 気象庁MSMの月別降水予測スレツトスコア(TS)の経年変化。FT=3から15までの平均。閾値は上から3時間あたり1mm、10mm、50mmで、細線、太線、破線はそれぞれ前12カ月の移動平均(TSm)。気象庁予報部数値予報課の検証による。

ルの初期値には不可避の誤差(解析誤差)が含まれ、仮に数値予報モデルが完全だとしてもその誤差は時間の経過とともに増大する。気象予測のような自由度がきわめて大きな系で確率密度関数の時間発展をそのまま計算することは不可能なので、初期値などの計算条件を僅かに変えた多数の数値予測を実施して予報誤差を見積もる手法があり、アンサンブル予報と呼ばれる。アンサンブル予報では、予測の誤差(信頼度)に関する定量的な情報を得ることが出来るほか、多数例予報の平均(アンサンブル平均)は単独予報よりも統計的に精度が向上することが知られている。予測の信頼度情報は、防災・減災のための実用的な対策やリスク管理に大変重要である。気象庁は2008年から台風進路予報にアンサンブル予報を導入しているが、全球モデルに基づくものであるため格子間隔が60kmと粗く、台風強度の予報は十分ではない(齊藤ほか, 2013)。

気象研究所では、2008年の北京オリンピックの際に行われた世界天気研究計画(WWRP)の領域アンサンブル予報の国際比較プロジェクトへの参加(Saito et al., 2010a)などを通じて、メソスケールアンサンブル予報

に関するノウハウを蓄積してきている。また平成19～22年度には、京都大学や東南アジア研究者などと科学技術振興調整費研究「東南アジア気象災害軽減交際共同研究」を実施し、東南アジアの様々な気象災害の予報実験や同化実験、アンサンブル実験を行っている(Saito et al., 2011)。図3のaとbに示すのは、サイクロナルギスのアンサンブル予報実験による中心気圧の72時間予報で、aの全球アンサンブル予報(気象庁週間アンサンブル予報)では、Nargisの最盛期に相当するFT=24-48の期間においても中心気圧は998hPaに留まっている。bの10kmNHMによるアンサンブル予報では、RSMC New Delhiの解析(962hPa)と比べまだ弱めであるものの、970hPaまでの発達を予測出来ている。cに示すのは、10kmNHMによるアンサンブル予報実験の出力(海上風速と海面気圧)をプリンストン大学海洋モデル(POM)の入力に用いて高潮のシミュレーションを行った結果によるミャンマー南部のイラワディ川河口付近のモデル格子点(16.10N,95.07E)における潮位の時間変化の確率分布図で、潮位変化の最大値は約4mに達している。全球アンサンブル予報値を

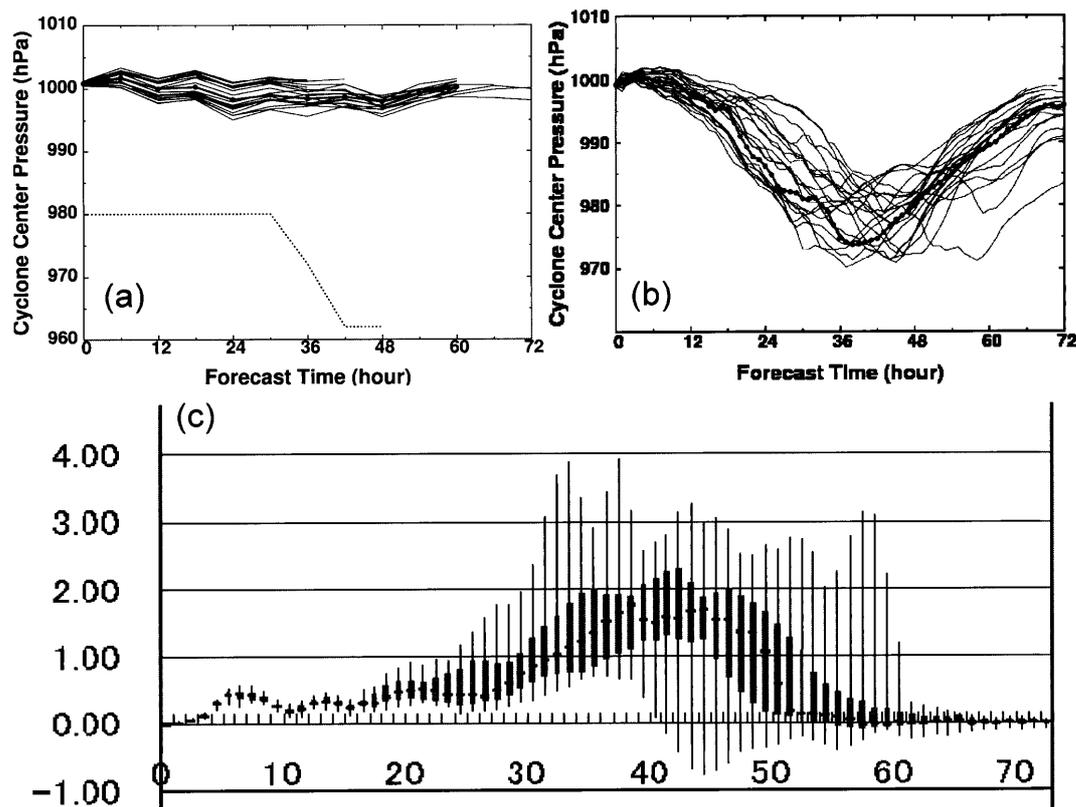


図3 a)2008年4月30日12UTCを初期値とする気象庁週間アンサンブル予報によるサイクロンナルギスの中心気圧の時間変化。コントロールランを太線で示す。点線はRSMC New Dehliの解析によるベストトラック。b)同じく10 km NHM メソアンサンブル予報による結果。c)10km NHM アンサンブル予報の海面気圧と風を入力としたPOMによる高潮計算による潮位変化の時間発展の図。黒点は中央値、各時刻の箱は積算頻度25%~75%の予測幅を示す。Saito et al. (2010b)より。

用いた高潮シミュレーションでは、サイクロンの発達
が不十分なため同じ場所での最大潮位は0.7 mに留
まった。なお、10 kmNHM 予報によるアンサンブル平
均をPOMの入力に用いた場合、ベストトラックと比
較した中心位置や対全球解析のRMSEなどがコント
ロール予報よりも良いにもかかわらず、予想された高
潮の潮位は1.5 mに留まった。このことは、高潮のよ
うな顕著現象が引き起こす気象災害を予見するという
視点では、アンサンブル平均よりも各メンバーが示す
個別のシナリオの方が、より重要な情報を持っている
ことを示唆している。

局地的大雨や竜巻などの顕著現象の場合、時間的
空間的スケールが小さく、また不安定な大気状態で発
生する現象で僅かな初期値や計算条件の違いで結果が
大きく変わるため、リードタイムを確保した決定論的
予報は将来においても難しいと考えられ、雲解像モ
デルを用いたアンサンブル予報が不可欠と思われる。
平成23年新潟・福島豪雨や2011年の台風第12号の
ケースを対象とする水平解像度2 kmの雲解像モデルによる

アンサンブル予報が、それぞれ齊藤ほか(2013b)、折
口ほか(2013)で行われている。小林ほか(2013)は、折
口ほか(2013)によるアンサンブル降水予報を入力とし
た流域流出・氾濫モデルによる中小河川(兵庫県佐用
川)流域における洪水の予測実験を行い、降水量を多
く予報したメンバーに基づく水位予測を考慮すること
により、早めの避難勧告が出来る可能性があることを
報告している。

4.3 アンサンブルカルマンフィルタ

アンサンブル予報で得られる予測誤差情報をデー
タ同化に用いる手法として、アンサンブルカルマンフ
ィルタがあり、新しい同化手法として注目されている。
カルマンフィルタは、線形モデル、ガウス分布の誤差
統計という仮定の下で、第一推定値の予報を観測で修
正する

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}^b + K(\mathbf{y} - H\mathbf{x}^b) \quad (11)$$

場合の重み K (カルマンゲイン)を、解析誤差の分散を
最小にするように求めるものである。アンサンブルカ

ルマンフィルタは、カルマンフィルタで必要となる予報誤差共分散(変分法の背景誤差共分散 B に相当する)をアンサンブル予報の摂動から得るもので、三好(2005)などに詳しい解説がある。

Seko et al.(2011)は、2008年7月の神戸都賀川増水事故のケースを対象に、アンサンブルカルマンフィルタの一種である局所アンサンブル変換カルマンフィルタ(LETKF)を用いて水平解像度 20 km の NHM による GPS 可降水量の同化実験を行い、表現の良かったメンバーを 1.6 km 解像度のモデルでダウンスケールすることにより、観測された東西に延びるライン状の強い降水帯によく似た降水域が再現されることを示した。さらに、LETKF 双方向ネストシステムを開発(Seko et al., 2013)して、2012年5月のつくば竜巻のケースを対象に水平解像度 1.875 km の LETKF の実験を行い、水平解像度 350 m の NHM でダウンスケールすることにより、竜巻に対応する大きな鉛直渦度(0.1 s^{-1})が観測と同様に3か所で発生したことも報告している(Seko et al., 2012)。

5. 次世代スパコン「京」を用いた取り組み

平成23年度から次世代スパコン「京」の計算資源を活用する研究プロジェクトとして、文部科学省「HPCI 戦略プログラム」が始まっている。分野3「防災・減災に資する地球変動予測」における課題の一つ「超高精度メソスケール気象予測の実証」では、気象研究所と海洋研究開発機構が中心となって、以下の3つのサブ課題を設定し、集中豪雨や局地的大雨、竜巻などの災害につながるメソスケール顕著現象の高精度予測を目指している。

1) 領域雲解像 4 次元データ同化技術の開発(サブ課題 責任者：露木義(気象研究所))

4次元データ同化技術を雲解像モデルに適用して高密度の観測データを取り込み、積乱雲をモデルで直接予測することを通じてメソスケール顕著現象の力学的直前予測の可能性を示すことを目標としている。海洋研究開発機構と気象研究所が4次元変分法やLETKF同化システムの京コンピュータへの移植を実行中であり、防災科学技術研究所や京都大学防災研究所なども、京コンピュータの利用を念頭に、雲解像モデル CReSS (Tsuboki and Sakakibara, 2007)に基づくデータ同化システムの開発を進めている。また、統計数理研究所では、NHMに基づく粒子フィルタの開発を進めている。

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(サブ課題責任者：瀬古弘(気象研究所/海洋研究開発機構))

アンサンブル予測手法を雲解像モデルに適用した領域気象解析予報システムを開発し、雲解像モデルで予報誤差を見積もりながら観測データを取りこむ未来の数値予報システムのプロトタイプを京コンピュータに構築し、メソスケール顕著現象に対する定量的確率予測の可能性を示すことを目指している。インクリメンタル法を用いたNHM-LETKFの京コンピュータへの移植が気象庁予報部数値予報課の協力も得て海洋研究開発機構、気象研究所などにより行われている(Kuroda et al., 2012)。Duc et al.(2012)は、NHM-LETKFに変数間局所化などの改良を加えて平成23年7月新潟・福島豪雨の初期値解析を行い、京コンピュータによる高解像度実験で強い降水の集中が良く予測されることを報告している。また東北大学では、NHM-LETKFによるメソスケール解析場と水平格子間隔 10 m のビル解像モデルをネストするシステムの開発が行われている(Chen et al. 2012)。

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(サブ課題責任者：木村富士男(海洋研究開発機構))

4.2では、初期値の誤差について述べたが、予報モデルそのものにも誤差が含まれている。物理法則を離散化し時間積分する上での計算スキーム上の誤差とともに、気象モデルでは大気中の物理過程をパラメタライズすることによる予測の不確定が大きな問題となる。雲解像モデルに用いられている雲の物理過程としては、バルク法が広く用いられているが、実際の雲内には、様々な粒径の水物質が様々な形態で存在している。これらをモデルで表現しようとする手法をビン法雲物理過程と呼ぶ。また現在の雲解像モデルは大気境界層内の乱流を、クロージャ仮定を用いて乱流統計量でパラメタライズしているが、解像度が1kmより高くなると、従来の境界層スキームでは必ずしも適切に扱えないことが指摘されている。ラージェディシミュレーション(LES)では、ある程度大きな乱流渦を解像して境界層の構造を再現できる。このサブ課題では、海洋研究開発機構、気象研究所、東京大学大気海洋研究所、京都大学防災研究所などが参加して、従来の計算資源では困難だったこ

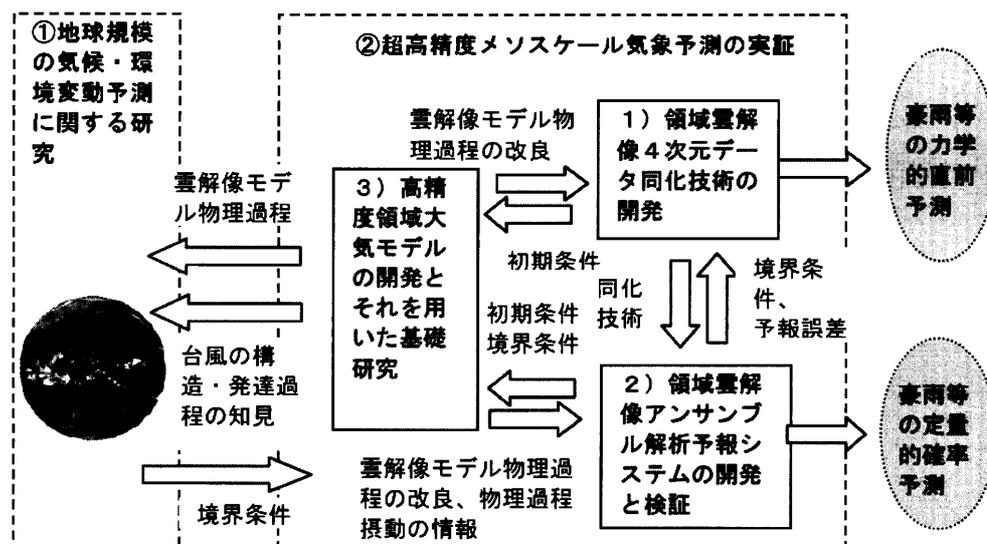


図4 HPCI 戦略プログラム分野3「防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究」の研究開発課題と②「超高精度メソスケール気象予測の実証」の3つのサブ課題の関係。

これらのモデルを用いた超高解像度シミュレーションを京コンピュータで多数行う。これにより、各種物理過程のパラメタ化に伴う誤差を評価して、雲解像モデルの改良やモデル不確定性の評価につなげることを目指している。また名古屋大学水循環研究センターや気象研究所では、台風や竜巻等の超高解像度シミュレーションを通じてこれらの現象のメカニズムを詳しく調べる研究を開始している。

「超高精度メソスケール気象予測の実証」はもう一つの課題「地球規模の気候・環境変動予測」とともにHPCI 戦略プログラム分野3の研究開発課題「防災・減災に資する気象・気候・環境予測研究」（課題責任者：時岡達志(海洋研究開発機構)）を構成している。「超高精度メソスケール気象予測の実証」の3つのサブ課題の関係を図4に示す。進行中の研究成果の一部は、戦略プログラム分野3の成果報告書にも記されている(斉藤ほか, 2012)。

6. おわりに

数値モデルによる災害につながる顕著気象現象の予測について、予測の精度を左右する要素、気象庁の現業メソ数値予報、研究の到達点や進行中の取り組みなどについて、著者の関わっているものを中心に概観した。紙数の制約もありここでは詳しく述べないが、シミュレーションの評価やデータ同化研究の進展のためには観測的研究との連携も重要であり、顕著現象の観測に関する様々なプロジェクト研究も進行している。

京コンピュータの登場など従来得られなかった大きな計算資源が利用可能になりつつあり、雲解像モデルやデータ同化技術の進歩とアンサンブル予報、新しい観測手段が、顕著現象予測の質を大きく変えつつある。現業天気予報がこの10年間ほどで大きく向上したように、メソスケール気象災害の予測やシミュレーションも新しいステージに入ろうとしている。

謝辞

地球シミュレータセンターの高橋桂子博士には、本稿を執筆する機会を与えて頂きました。気象研究所露木義部長からは、原稿についての有益なコメントを頂きました。本稿で紹介した研究成果に関わった気象研究所、気象庁予報部数値予報課、海洋研究開発機構をはじめとする多くの機関の方々に感謝します。科研費研究やHPCI 戦略プログラムは文部科学省の助成によるものである。

参考文献

- 1) Chen, G. M. Sawada, W. Sha, T. Iwasaki, H. Iwai, H. Seko, and K. Saito, 2012: Super-high-resolution modelling based on down-scaling simulation system (DS3): Configuration and verification. *Proceeding, Second International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models*, 31-32.
- 2) Duc, L., K. Saito, and T. Fujita, 2012: Data assimilation experiments with LETKF: the case of Niigata - Fukushima heavy rainfall event. *Proceeding, Second International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models*, 56-57.
- 3) Hara, T., 2007: Implementation of improved Mellor-Yamada Level 3 scheme and partial condensation scheme to JMANHM

- and their performance. *CAS/JSC WGNE Res. Act. Atmos. Ocea. Model.*, **37**, 4.7-4.8.
- 4) Honda, Y., Y. and Sawada, K., 2008: A new 4D-Var for meso-scale analysis at the Japan Meteorological Agency. *CAS/JSC WGNE Res. Act. Atmos. Ocea. Model.*, **38**, 1.7-1.8.
 - 5) 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.
 - 6) 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*. (submitted).
 - 7) 小林健一郎・大塚成徳・寶馨・折口征二・斉藤和雄, 2013: 高解像度アンサンブル予測降雨を入力とするアンサンブル洪水予測. *水工学論文集*, **57**, L1597-L1602.
 - 8) Koizumi, K., Ishikawa, Y. and Tsuyuki, T., 2005: Assimilation of precipitation data to JMA mesoscale model with a four-dimensional variational method and its impact on precipitation forecasts. *SOLA*, **1**, 45-48.
 - 9) Kuroda, T., T. Fujita, H. Seko and K. Saito, 2012: Construction of Mesoscale LETKF Data Assimilation Experiment System. *CAS/JSC WGNE Res. Act. Atmos. Ocea. Model.*, **42**, 1.15-1.16.
 - 10) 三好建正, 2005: アンサンブルアルマンフィルタ。データ同化とアンサンブル予報の接点。天気, **52**, 93-104.
 - 11) 折口征二・斉藤和雄・小林健一郎, 2013: 台風第12号のメソアンサンブル予報実験, 気象庁技術報告, **134**, 73-83.
 - 12) 斉藤和雄, 1999: 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.
 - 13) 斉藤和雄・露木義・瀬古弘・木村富士男・青梨和正・清水慎吾・上野玄太, 中野慎也・川畑拓矢・荒木健太郎・黒田徹・陳桂興・折口征二・LeDuc・小林健一郎・山敷庸亮・大塚成徳・竹見哲也・野田彰・原政之・伊藤純至・橋本明弘・中村晃三・佐々木秀孝・沢田雅洋・坪木和久・益子渉, 2012: 超高精度メソスケール気象予測の実証。「HPCI戦略プログラム」分野3防災・減災に資する地球変動予測平成23年度成果報告書, 38-105.
 - 14) 斉藤和雄・川畑拓矢・国井勝, 2013a: 台風強度予報と再現実験, 気象研究ノート, **227**, 37-70.
 - 15) 斉藤和雄・折口征二・LeDuc・小林健一郎, 2013b: 新潟福島豪雨のメソアンサンブル予報実験, 気象庁技術報告, **134**, 59-73.
 - 16) 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.
 - 17) 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.
 - 18) 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.
 - 19) Saito, K., T. Kuroda, M. Kunii and N. Kohno, 2010b: Numerical simulations of Myanmar cyclone Nargis and the associated storm surge. Part 2: Ensemble prediction. *J. Meteor. Soc. Japan*. **88**, 547-570.
 - 20) 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.
 - 21) Saito, K., T. Kuroda, S. Hayashi, H. Seko, M. Kunii, Y. Shoji, M. Ueno, T. Kawabata, S. Yoden, S. Otuka, N.J. Trilaksono, T.Y. Koh, S. Koseki, L. Duc, X.K. 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.
 - 22) 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**, doi:10.3402/tellusa.v64i0.11594.
 - 23) Saito, K., 2012: The Japan Meteorological Agency nonhydrostatic model and its application to operation and research. *In-Tech, Atmospheric Model Applications*, 85-110. doi: 10.5772/35368.
 - 24) Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, and S. Iga, 2008: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations, *J. Comp. Phys.*, **227**, 3486-3514.
 - 25) Seko, H., T. Miyoshi, Y. Shoji and K. Saito, 2011: A data assimilation experiment of PWV using the LETKF system -Intense rainfall event on 28 July 2008-. *Tellus*, **63A**, 402-414.
 - 26) Seko, H., T. Tsuyuki, K. Saito, T. Iwasaki and T. Miyoshi, 2012: Data assimilation experiments using a nested LETKF system. *Proceeding, 2nd International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models*. 83-84.
 - 27) 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*, **2**, 489-505.
 - 28) Takahashi, K., X. Peng, R. Onishi, M. Ohdaira, K. Goto, H. Fuchigami and T. Sugimura, 2007: Multiscale simulator for the geoenvironment: MSSG and simulations. *Use of High Performance Computing in Meteorology, World Scientific*, 36-54.
 - 29) Tsuboki, K., and A. Sakakibara, 2007: Numerical prediction of high-impact weather systems. *Text book for Seventeenth IHP training course in 2007. HyARC, Nagoya University*, 273 pp.
 - 30) 露木義, 1997: 変分法によるデータ同化, 数値予報課報告別冊, 気象庁予報部, **43**, 102-165.