

# 第1章 概論

## 1.1 はじめに<sup>1</sup>

数値予報モデルは、気象庁の予報業務における技術基盤の中核であり、その予測精度は気象庁が発表する様々な気象情報の精度に直結する、要の技術である。このため、現業数値予報モデルとして、安定的に運用するとともに、そのプロダクトの精度検証を着実に進めるシステムを構築することが重要である。また現業の数値予報モデルの改良を効果的に進めていくためには、開発・研究用にも幅広く利用されるとともに、その最先端の成果を現業モデルに速やかに反映できるよう、数値予報モデルの維持や開発に関わる調整がされている必要がある。多くの開発者・研究者による将来の様々な拡張、特に物理過程を改良した場合の精度検証に耐え、かつ今後様々な変革が予想される次世代スーパーコンピュータのアーキテクチャに適したソフトウェアデザインが求められる。

これまで、防災情報・短期予報から週間天気予報までの時間空間スケールを対象とする主たる数値予報モデルとして気象庁で運用開発されてきたものが、気象庁全球モデル (Global Spectral Model: GSM) と気象庁非静力学メソモデル (JMA Non-Hydrostatic Model: JMA-NHM; 気象庁予報部 2003) である。GSM は 1988 年に、当時現業モデルであった北半球モデルを発展させる形で現業化され、その後の高解像度化や物理過程の改良を重ね、短期・週間天気予報、台風予報を支援する基盤モデルとして、台風進路予報や数日先の顕著現象の予測精度向上を支えてきた。また JMA-NHM は後述するように 2004 年に、当時の領域静力学メソモデルを置き換える形で現業化され、集中豪雨等のメソスケール現象の予測精度向上に寄与している。

このようにこれまでの数値予報モデルは、基礎的な研究開発を経て現業化され、その後の高解像度化、物理過程の高度化を遂げて、長く維持管理されることにより大きな成果を上げてきた。しかしながらここへ来て、将来のさらなる高解像度化・高度化にあたり、モデルの拡張に制約がある、今後の省電力型スーパーコンピュータへの対応に課題があるなど様々な問題も浮かび上がってきている。これらを解決し今後の数値予報モデルの発展につなげていくためにも、次世代の数値予報モデルの開発が望まれていた。

本報告でとりあげる asuca (Asuca is a System based on a Unified Concept for Atmosphere の略。再帰的略称を用いている。) は、こうした事情を背景に現在数値予報課で開発されている次世代数値予報モデルである。

数値予報モデルの方程式系やその離散化手法は力学コアと呼ばれ、モデルの基盤をなしている。asuca の力学

コアは、水平離散化として従来のスペクトル法 (GSM)、有限差分法 (JMA-NHM) に代わり、近年数値流体力学分野で広く用いられている有限体積法を採用し、また時間積分法にルンゲクッタ法を導入するなど、最新の計算手法を取り入れている。力学コアは数値予報モデルの、建造物でいういわば屋台骨であり、その新規開発は容易ではない。asuca は当面はメソ数値予報システム及び局地数値予報システムの後継モデルとして開発を進めるが、一方で力学コアの設計検討、開発にあたっては、様々な座標系で対応できるようにすることにより、領域モデルのみならず今後の全球モデルへの拡張も視野においている。

また、物理過程については、これまでの成果を継承することを考慮して、従来の数値予報モデルの物理過程をライブラリ化した「物理過程ライブラリ (原 2012)」の利用を前提としている。本次世代モデルの開発は力学過程の開発を中心としていることから、asuca とは広義には物理過程全体も含めた数値予報モデルを指すが、狭義には新規に開発した力学コアを指す。本報告の解説は主として狭義の意味での asuca を対象とするが、一部の章では広義の意味での asuca について取り上げる。

本節ではまず、asuca の力学コアの検討に当たって考慮した、全球・領域モデルの非静力学化、データ同化技術、および計算機技術の動向について示す。

### 全球・領域モデルの非静力学化

20 世紀においては、スーパーコンピュータの性能の限界から、日本のみならず各国の数値予報センターにおいても、全球モデル・領域モデルの予測対象は総観スケールの現象であった。総観スケールの現象に対しては静力学近似が成り立つためプリミティブ方程式系が用いられてきた。静力学近似が成り立つのは運動の水平スケールが鉛直スケールより十分大きいときであり、両者のスケールが近づいてくると近似が成り立たなくなる。防災上重要な豪雨をもたらすメソ対流系ではこの近似が成り立たないので、それらを精度よく予測して防災に資するためには静力学近似を用いない非静力学モデルが必要となる。気象庁ではスーパーコンピュータの更新のたびに、数値予報モデルの水平分解能を向上させてきており、2001 年から運用した第 7 世代の計算機において、水平格子間隔 10 km の領域静力学モデルによりメソモデル (MSM) の運用を開始したのに続き、2004 年 9 月に MSM に非静力学モデルを導入した。その後も、2006 年・2012 年とスーパーコンピュータを更新し、現在は第 9 世代の計算機において水平格子間隔 2 km の局地モデル (LFM) の運用に至っている。しかしながら、LFM をもってしても、豪雨等

<sup>1</sup> 石田 純一、室井 ちあし

の予測精度は十分ではなく、今後も計算機能力の向上に伴い、領域モデルの分解能の更なる向上が必要である。また、これまでのスーパーコンピュータの能力向上が続くと仮定すると、第11世代の計算機では全球モデルを10 km以下の水平格子間隔で運用する事も可能になると考えられるので、全球モデルの非静力学モデル化も今後の重要な課題となる。現時点では、全球モデルと領域モデルに求められる予測対象が異なる、即ちふさわしい方程式系が異なることからそれぞれ別の力学コアを使用している。しかしながら、全球モデルが非静力学化されると、力学コアの統一が可能となる。数値予報モデルは複雑化の一途をたどるが、力学コアを統一できれば、その分効率的な開発を行えるようになるだろうと期待される。

### データ同化技術

数値予報の精度向上のためには数値予報モデルの高度化だけでなく、データ同化手法の高度化も欠かせない。全球解析・メソ解析で用いられている4次元変分法においては、数値予報モデルから非線形モデル、接線形モデル及び随伴モデルを構築してデータ同化を行う。気象庁のメソ解析において4次元変分法が導入されたのは2002年3月である。これは、領域解析としては世界で初めてのことであり、前述の通り、4次元変分法の構築は数値予報モデルに基づいて行われる。2002年時点のメソ解析における4次元変分法の基となる数値予報モデルは当時のMSMで用いられていた領域静力学モデルであった。一方、当時既にJMA-NHMは領域静力学モデルを置き換えて現業化することを目標に開発を行う段階に達していた。そこで、2002年にはJMA-NHMに基づく4次元変分法(“JMA Nonhydrostatic model”-based Variational Data Assimilation: JNoVA; 気象庁予報部2010)の開発に着手し、2009年4月に現業化した。4次元変分法では数値予報モデルで表現される力学的バランスを考慮するために、予報計算で用いる予報モデルとデータ同化で用いる予報モデルとが整合していることが望ましい。現在、JNoVAはJMA-NHMを基にしているものの、モデルのバージョンが異なるために細部に違いがある状態で運用されている。数値予報モデルの改良をデータ同化システムに直接反映できるよう、今後は両者のフレームの統一的な開発が必要となる。

### 計算機技術

これまでのスーパーコンピュータの発展を振り返る。数値予報の精度がスーパーコンピュータの更新とともに向上していることは前述の通りだが、スーパーコンピュータのアーキテクチャは世代ごとに異なっている。1987年に導入した第5世代のスーパーコンピュータ(HITAC S-810)は単一のベクトルプロセッサによる計算機であったのに対し、第6世代(1996-2001年)のスーパーコンピュータ(HITACHI S-3800)は4ベクトルプ

ロセッサによる並列計算機(メモリは共有)であった。さらに第7世代(2001-2006年)では擬似ベクトルプロセッサによる並列計算機(分散メモリ)となった。第8世代(2006-2012年)にはスカラプロセッサによる並列計算機となり、メモリを共有する複数のプロセッサをノードとし、そのノードを複数持つ階層構造を成した計算機となった。現在の第9世代では階層構造はさらに複雑となっている。今後の計算機の動向として、B/F値<sup>2</sup>は下がる傾向にあり、より並列度が増していく傾向がある。一方で、GPGPU<sup>3</sup>のような新たな技術が開発される可能性がある。アーキテクチャが異なる計算機に数値予報モデルを移植することを考えると、動作させるだけであれば比較的容易であるが、そのままではなかなか計算効率が上がらないのが実状である。筆者の経験から、少しチューニングをするだけで計算効率が数割向上することもまれではなく、極端な場合には、性能が数倍向上することもある。このようなことから、計算効率を高めるために、コーディングレベルのチューニングとしてソースコードの全部あるいは主要部分を全面的に書き換えることや(数値計算を行う分野は幅広いが、全部書き換えることが当然視されている分野もある)、アルゴリズムレベルのチューニングとして計算手法そのものを見直すことがしばしば行われる。気象庁において、限られた開発時間でどこまで対応するかの判断は難しいが、数値予報モデルの力学コアは定式化・離散化において様々な手法があり、その選択次第で計算効率は大きく変わりうることから、今後の計算機の動向を念頭においた計算手法の開発が必要である。また、ソースコードをコンパクトなものにすることにより、コーディングレベルのチューニングの効率化を図ることも重要である。そして、アルゴリズムレベル・コーディングレベルの対応を円滑に進めるため、新たな技術動向について調査を行っていくことが重要だと考えている。

以上の事情を勘案すると、新しい力学コアの開発においては、単なる領域モデルの力学コアに留まらず、全球モデルへの拡張やデータ同化システムとの統合を最初から念頭におく必要がある。2007年に始まったasucaの開発は、このような事情を踏まえて、2009年に全球モデルへの拡張(asuca-Global)を念頭においた開発にも着手し、さらに2011年にはasucaベースの解析システム(asuca-Var)の開発に着手したところである。現時点では、まずはJMA-NHM及びJMA-NHMをベースとしたJNoVA 3D-Varで構成されている局地数値予

<sup>2</sup> メモリバンド幅と浮動小数点演算性能の比。この値が小さいとメモリを効率的に活用する技術が必要となる。

<sup>3</sup> General-Purpose computing on GPUsの略。GPUとはグラフィック表示の処理を行うプロセッサであるが、CPUより省電力かつ高速化を図っていることから、グラフィック表示のみならず、科学技術計算に用いるように進化しつつある。

報システムを asuca 及び asuca-Var に置き換えることを目標に開発を行っている段階であり、全ての目標が達成できている訳ではないが、開発における方向性と現時点での進捗を報告して、今後のさらなる開発の進展につなげたいと考えている。

本章では asuca, asuca-Var および asuca-Global の概略を述べる。第 1.2 節で気象庁における非静力学モデル・データ同化システムの開発の歴史について述べ、第 1.3 節で各国の非静力学モデル・データ同化システムの開発動向について報告する。上述の技術動向と併せて、他機関の開発動向をレビューし、取り入れるべき技術を取捨選択することが、信頼性の高い数値予報システムの構築に役立つと考えている。引き続き、第 1.4 節では asuca の開発理念を述べる。例えば、方程式系の予報変数の決め方や離散化には様々な手法があり、その選択には任意性がある。最終的な採否の判断においては何らかの基準が必要となる。ここでは、その判断基準としての開発理念を述べる。日々進歩している技術事項の取捨選択においては、直接的・最終的には数値予報システムで試験を行い、検証スコア等によりその採否が決定されるが、開発に着手するかどうかの判断、想定どおりに開発が進捗しない場合の方向性の判断においては開発理念を含む大局的な方向性に沿うべきである。

第 2 章は力学過程についての解説であり、第 1.4.2 項で述べた理念の具現化に係る詳細について報告する。数値予報モデルとしての asuca は JMA-NHM の後継であり、物理過程については物理過程ライブラリという形で JMA-NHM と同等のスキーム<sup>4</sup>を用いるが、力学コアの観点からは異なっている部分が多々ある。そこで、第 2 章では定式化(第 2.1 節)に始まり、離散化(第 2.2 節, 第 2.3 節)、移流スキーム(第 2.4 節)、側面・上部境界条件(第 2.5 節)と解説する。これは、データ同化で必要となる予報・非線形・接線形・随伴モデル(第 3.2 節を参照)の観点で分類すると予報モデルについての解説とも見做すことができる。その後 asuca で行ってきた実験結果を報告する。力学コアの構築では理想実験による評価が欠かせないことから、複数の理想実験を行ってきた。その結果を第 2.6 節に示す。また、力学コアの構築においては計算安定性の確保を念頭においており、高波数成分の制御が必要となる。物理過程を導入した実事例の実験で高波数成分をどのように制御できているか調査した結果を第 2.7 節で示す。

第 3 章では asuca に基づくデータ同化システム(asuca-Var)の報告を行う。第 1.4.3 項で述べた通り、データ同化システムの開発工程として、3D-Var の開発に始まり、力学のみの 4D-Var の開発、4D-Var への物理過程の組み込みという順序で取り組んでいる。現在は、上記のうち、3D-Var を局地解析に導入するための

<sup>4</sup> 物理過程ライブラリは JMA-NHM の移植の後に独自に開発を行っているため、そこで差異が生じることはありうる。

開発が進んでおり、さらに、力学のみの 4D-Var の導入に向けた検討と実装が行われ、力学過程の接線形・随伴モデルが概ね完成した段階である。そこで、まず第 3.1 節ではこれら全体を見渡すために asuca-Var の構成要素について述べた後、asuca-Var コアとして、変分法解析システムの最も基本的な部分について述べる。開発工程を考える場合、予報モデルから非線形・接線形・随伴モデルを導出する手順上、開発工程としては非線形モデルの開発が先行し、その後接線形・随伴モデルの開発を行うことになり、この点に注意が必要である。また、今後も予報モデルの開発を続けていくことからその改良に伴う接線形・随伴モデルの変更は適宜行っていく必要がある。第 3.2 節では今後の開発に資するため、接線形・随伴モデルの開発方針の策定にあたって検討したこと、及び実際の開発工程やその実際について述べる。

第 4 章では asuca における物理過程の取扱いについて報告する。冒頭で述べた通り、asuca の物理過程は物理過程ライブラリで取り扱う。力学過程・物理過程を含めた複数の過程による時間変化率の相互の取扱いには任意性があり、時間積分の手法が異なってくる。また、力学コアから見ると、物理過程ライブラリは、予報変数とは限らない物理量を入力とし、予報変数とは限らない物理量の時間変化率を出力として返す。そのため、予報変数からライブラリに与える物理量へ変換し、ライブラリから受け取った物理量の時間変化率を予報変数の時間変化率へ変換する。これらのうち、予報変数と物理量の変換そのものは検討の余地は少ないが、時間積分においては仮の時間積分を行い、そこで求めた仮の予報値で時間変化率を求める手法等もあり、どの物理過程をどのタイミングで計算するか計算安定性や精度に影響を及ぼす。第 4.1 節では、これらの扱いを中心に解説し、それに基づく物理過程の実装について第 4.2 節で述べる。また、物理過程を組み込んだモデルとしての評価も必要であるため理想実験を行っている。これは、物理過程を含むフルモデルとして実データで実験を行う前の評価として重要である一方、組み込みそのものにバグがないかチェックするためにも必要である。これらの実験結果について第 4.3 節で述べる。なお、第 4 章では物理過程そのものについては触れない。

第 5 章では短期的課題として取り組んでいる局地数値予報システムへの asuca の導入に向けた開発結果を報告する。本報告執筆時点ではまさに導入に向けた最終調整に入ったところであり、細かい問題点の修正や現業向けに必要な入出力の整備等を行っている段階である。ここまで、日々実験を通じて精度を確認しており、現時点での実験結果を報告する。また、asuca の現業化へ向けて開発してきた中で、LFM に内在していた積雲対流表現についての課題が明確になってきているので、そのことについて報告する。

第6章は全球モデルとしての asuca の利用について述べる。格子点法による全球モデルの開発は世界各国で行われている。領域モデルと大きく異なる点として全球を覆うための格子配置の手法に係る課題があげられる。Yin-Yang 格子、正 20 面体格子、立方体格子等、種々の手法が考案されているものの、現時点では決定打と言えるものはない状況である。現在は、Yin-Yang 格子による asuca の全球モデルとしての利用に向けた開発しているところであり、第6章ではその進捗について報告する。

第7章では大規模並列計算機向けの対応について説明する。並列計算機においては並列化手法が実効性能の鍵を握る。第7.1節では前述の GPU(GPGPU) 向け数値予報モデルの動向についてまとめた。また、新たなアーキテクチャへの適応事例として、スーパーコンピュータ「京」による実行があり、第7.2節で報告する。

最後に、付録 A でシステムデザインについてまとめた。ここで述べるシステムデザインとは、プログラム本体やその周辺ツール等のシステムにおける実装やその考え方等を意味する。第1.4節で述べる通り、計算機の趨勢に合わせた改良としてコーディングレベルの最適化が必要となり、そのために実装面で工夫した点を紹介する。また、実際に開発を行うために注意すべき事項は多い。それら全てを網羅するわけにはいかないものの、いくつか特筆すべき事項についてまとめている。

本報告は著者等がこれまでに検討を行ってきた開発理念及びそれに沿って開発を進めてきた asuca, asuca-Var, asuca-Global の現状についての集大成である。数値予報における予測が完全なものにならない以上、開発の手を緩めることなく精度向上を図っていく必要がある。本報告が現在及び将来の開発者にとって開発の助けになれば幸いである。

## 参考文献

- 原旅人, 2012: 物理過程ライブラリの開発. 数値予報課報告・別冊第 58 号, 気象庁予報部, 205–208.
- 気象庁予報部, 2003: 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 194pp.
- 気象庁予報部, 2010: 非静力学メソ 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 106pp.

## 1.2 気象庁における非静力学モデル・データ同化システムの開発<sup>1</sup>

### 1.2.1 非静力学モデルの開発の歴史

ここでは、asucaの開発に着手するまでの気象庁における非静力学モデルの開発の歴史について述べる。なお、2003年までの開発経緯については斉藤(2003)が詳しいので、そちらも併せてご覧いただきたい。また、“JMA-NHM”という名称は後述する数値予報課と気象研究所による統一的な開発になって以降の名称であるため、それ以前の名称については本節では単に“NHM”と呼ぶことにする<sup>2</sup>。

非静力学モデルはその開発の歴史から見て、対流等の現象解明を目的として、対流雲を陽に扱う雲解像非静力学モデルと、それより広い領域の予報を対象とするメソスケール非静力学モデルとに分けられる。前者の開発は詳細な雲物理過程等を含んでいるものの、マップファクターを含まない、地形を必ずしも扱えない等の制限がある状態から出発し、徐々に拡張していくというアプローチが想定される。後者のモデルは現業モデルの拡張としての意味合いがあり、マップファクターや地形を含んでいる状態のモデルから方程式系を非静力学化し、さらに詳細な物理過程を導入するといったアプローチが想定される。

気象庁におけるNHMの開発は1980年代から気象研究所において開始されており、前者のアプローチを取っている(Ikawa and Saito 1991)。気象研究所における開発当初は、非弾性対流モデルからスタートし、準圧縮方程式系、完全圧縮方程式系と徐々に方程式系の近似を排除していった。また、物理過程として乱流モデルと雲物理過程を組み込んでおり、その後、放射過程、地表面過程等を段階的に組み込んでいった。

一方、数値予報課では、後者のアプローチを取り、NHMとは異なる非静力学モデルの開発を行った。まず、郷田・栗原(1991)による開発では、当時の現業領域モデルでも用いられていたスペクトル法を採用しており、当初から、マップファクター、地形、コリオリ項を考慮していた。続いて、室井(1998)による開発では、郷田・栗原(1991)から7年の歳月の間に様々な機関で行われた非静力学モデルの成果を取り込むとともに、計算機の動向を踏まえた新たなモデルとして構築を行っている。

その後、NHMに数値予報課の開発成果を取り込む形で気象研究所/数値予報課統一非静力学モデルが1999年に完成し(Saito et al. 2001)、さらに、2001年からはJMA-NHMとしての開発が始まり、前述の通り2004年に現業化されるに至っている。(Saito et al. 2006)。

次に、2004年以降の開発について、力学過程を主と

して述べる。現業モデルとしての重要な課題は計算安定性向上のための開発と方程式系の高度化であった。計算安定性につながる開発としては、格子スケールの対流による強い上昇流をどのように制御するかが懸案事項となり、適応水蒸気拡散(Saito et al. 2006)の導入、さらに4次の線形拡散や非線形拡散のパラメータの調整、発散抑制フィルタのパラメータの調整を行った(斉藤ほか2008)。その後も、計算安定性向上のための開発は必要となり、上昇流が強いカラムで鉛直移流スキームを拡散性の強い風上1次差分スキームに切り替える手法の導入などが進められた。一方、方程式系の高度化としては鉛直ハイブリッド座標(石田2008)の開発が行われ、2007年に現業化された。

これまで述べてきた通り、JMA-NHMは長い開発の歴史を有し、その歴史において開発したオプションの多くを保持している。気象庁予報部(2003)の付録にはJMA-NHMのモデルパラメータ一覧が掲載されており、2003年の時点で既に多数のオプションがあったことが分かる。新規開発においては、これらのオプションに対する整合を取る必要がある。一方で、力学コアは前述の通り数値予報モデルのいわば屋台骨であり、それを変更した場合の影響は様々な範囲に及び、整合を取るための確認に多大な時間を要することとなる。そのため、JMA-NHMの力学コアの改良は困難を極めた。その例として、上記の開発と並行して、並列計算機向けのsemi-implicit法や鉛直4次差分スキーム等の開発が行われたものの、残念ながら現業化までには至らなかったという状況がある。

計算安定性と予測精度の両立と、高い計算効率の達成に対して課題となったのは、様々な人為的な数値拡散やフィルタの存在であった。これらのパラメータには任意性があるため、最適なパラメータを決定するためには複数の組み合わせについて、様々な事例に対する計算安定性を確認する必要がある、決して効率的な開発とは言えない。また、水平方向の数値拡散を計算するときには、並列計算機においてはデータ通信が必要となり計算効率を低下させる要因となっていた。さらに、開発効率の向上のためにコード・オプションの整理も必要であった。特に、第1.4節で述べる開発理念への対応のいくつかは大規模なコードの改良を伴うことから、既存のオプションとは整合が取れないことが懸念された。

asucaは、JMA-NHMの多くを引き継ぎつつ、気象庁における非静力学モデルの開発の歴史において判明した課題の修正を図っているところである。

<sup>1</sup> 石田 純一(第1.2.1項)、藤田 匡(第1.2.2項)

<sup>2</sup> JMA-NHM以前においても、時期により名称が異なる。詳細については斉藤(2003)をご覧いただきたい。

### 1.2.2 データ同化システムの開発

本項では、気象庁の現業領域データ同化システムであるメソ解析 (MA) と局地解析 (LA) システムのこれまでの開発について述べる。

気象庁では現在、JMA-NHM による現業数値予報モデルとして MSM、LFM を運用している。その予報初期値はそれぞれ 4 次元変分法 (4D-Var) による MA、3 次元変分法 (3D-Var) による LA で作成される (本田・澤田 2009; 永戸ほか 2012)。このうち MA では、現業領域解析として世界初の 4D-Var である静力学 4D-Var を 2002 年に導入して以来 (石川・小泉 2002)、高度なデータ同化手法である 4D-Var による運用を行っている。

4D-Var では、数値予報モデルによる時間発展そのものを拘束条件として解の最適化を行い、数値予報モデルのバランスに整合した予報初期値を作成する。その計算過程では、時間の前方積分による摂動の時間発展の評価<sup>3</sup>と、後方積分による摂動起源の探索を繰り返し実行する (4D-Var については、露木 (1997) などに詳しい)。このようなシステムの開発の過程では、通常接線形・随伴モデルを実装する。これらは、予報モデルのプログラムコードの各行にそれぞれ線形化<sup>4</sup>、さらに転置を適用して実装されるため、開発には膨大な作業を要する。また、適用が必要な内容は各数値予報モデルプログラムに固有のものであるため、新しいモデルへの移行に伴い、新たに開発し実装する必要もある。

静力学 4D-Var の接線形・随伴モデルは、当時の MSM で用いられていた静力学スペクトルモデルに基づいて実装された。その後、2004 年に MSM の予報モデルが JMA-NHM に更新され、予報モデルに整合した新たな 4D-Var への移行が必要となった。この必要性は早くから認識され、JMA-NHM が現業化される前の 2002 年より JMA-NHM に基づく変分法データ同化システム JNoVA (Honda et al. 2005; 本田・澤田 2010) の開発が始まった。その後、接線形・随伴コードの開発を経て、業務化に向けた性能向上のための様々な改良を施し、2009 年 4 月に MA に JNoVA を導入した。さらに、JNoVA 4D-Var の現業化後にも、観測データの利用拡充をはじめとする様々な改良、また予報モデル JMA-NHM の改良などを継続的に行った結果、MSM の予報精度は着実に向上している。

一方、これまでの予報モデル更新に伴う 4D-Var の開発・運用を通して、4D-Var の開発・維持管理に関する課題も明らかになってきた (本田 2010a)。予報モデル

<sup>3</sup> 第一推定値の修正による影響の伝播を評価する。具体的な実装では、接線形モデルによる摂動の時間発展により評価する手法、非線形モデルによる摂動を含んだ予報値と含まない予報値との差分により評価する手法、さらに、解像度を落としたり簡略化したりした線形または非線形モデルを用いて計算コストを抑えつつ評価する手法など様々な手法が用いられる (Courtier et al. (1994) など参照)。

<sup>4</sup> 非線形性が強く線形近似が著しく悪化する部分などを除外して部分的に線形化を行う場合もある。

JMA-NHM では、MSM としての運用の過程で様々な改良がなされてきたものの、これらは必ずしも JNoVA の接線形・随伴モデルに反映されておらず、両者の間の乖離が大きくなっている。JMA-NHM の改良を JNoVA に反映させるためには、その都度接線形・随伴モデルにこの改良を実装する必要があり、特に大規模な予報モデルの変更に追従し続けることは簡単ではない<sup>5</sup>。しかし、これはデータ同化システムの高度化にとって重要な課題である。4D-Var の運用にあたり、予報モデルと 4D-Var の接線形・随伴モデルの間の乖離を抑え、両者の整合性を保ちつつ運用する体制を整備することが求められている。

また、今後の予報モデルの高度化、高解像度化のため、物理過程の接線形・随伴モデルの開発が重要な課題となってくると考えられる (石川・藤田 2013)。物理過程では、大気の安定度や相転移などに応じた条件分岐や複雑な現象を近似する非線形な定式化がしばしば扱われる。このような場合、線形近似が成立する範囲が著しく制限され、非線形モデルを機械的に線形化して得られる接線形モデルでは予報精度が保てない恐れがある。また、高度で複雑な物理過程では計算コストがかかることも課題となる<sup>6</sup>。従って物理過程の振る舞いを適切に把握し、効率の良い線形モデルによって摂動の時間発展を適切に近似することがより重要になると考えられる。4D-Var の運用には、予報モデルの更新に対応した効率のよい開発スケジュールの設定や予報モデルの理解に基づいた実装の検討など、データ同化開発者と予報モデル開発者が緊密に連携し、接線形・随伴モデルの高度化を継続的に行う体制を作ることが重要である (詳細については第 3.2 節を参照のこと)。

このような状況の中で、JMA-NHM の後継として次世代非静力学モデル asuca の開発が進み、この新しいモデルに基づく変分法データ同化システム asuca-Var の構築を 2011 年に開始した。本開発においては、上述のようなこれまでの 4D-Var の運用経験を通して得られた知見を生かす取り組みを目指しているところである。詳細については第 3 章を参照いただきたい。

<sup>5</sup> JMA-NHM コードの広範囲にわたる変更のうち JNoVA で追従していないものとして、領域 2 次元分割による並列化の導入 (荒波・石田 2008) や、第 1.2 節に挙げた鉛直座標の z\*座標からハイブリッド座標への方程式系の高度化 (石田 2008) などが挙げられる。

<sup>6</sup> 本田 (2010b) は、JNoVA に雲物理過程を導入する検討を行い、雲物理過程を組み込んだ 4D-Var により、現業メソ解析で用いられている実観測データの同化に成功した。雲物理過程は非線形性が強く、検討に用いた接線形・随伴モデルでは、線形化を適用する部分の選別など、工夫を行っている。一方で、極小値探索の際の解の収束に悪化が見られたこと、計算時間が増大したことも報告している。

## 参考文献

- 荒波恒平, 石田純一, 2008: 並列化と高速化. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 58–65.
- Courtier, P., J.-N. Thépaut, and A. Hollingsworth, 1994: A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **120**, 1367–1387.
- 永戸久喜, 藤田匡, 原旅人, 2012: 局地モデルの本運用. 平成 24 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 72–86.
- 郷田治稔, 栗原和夫, 1991: 非静力学モデルの開発. 数値予報課報告・別冊第 37 号, 気象庁予報部, 67–82.
- 本田有機, 澤田謙, 2009: 非静力学メソ 4 次元変分法の現業化. 平成 21 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 65–71.
- 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.
- 本田有機, 澤田謙, 2010: 非静力学メソ 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 7–37.
- 本田有機, 2010a: 将来計画. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 4–5.
- 本田有機, 2010b: 雲物理を考慮した 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 84–87.
- Ikawa, M. and K. Saito, 1991: Description of a non-hydrostatic model developed at the Forecast Research Department of the MRI. *Tech. Rep. MRI*, **28**, 238pp.
- 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.
- 石川宜広, 小泉耕, 2002: メソ 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊第 48 号, 気象庁予報部, 37–59.
- 石川宜広, 藤田匡, 2013: 4 次元変分法の開発と物理過程の課題. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 152–187.
- 気象庁予報部, 2003: 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 194pp.
- 室井ちあし, 1998: 非静力モデルの開発. 数値予報課報告・別冊第 44 号, 気象庁予報部, 25–41.
- Saito, K., T. Kato, H. Eito, and C. Muroi, 2001: Documentation of the Meteorological Research Institute / Numerical Prediction Division Unified Non-hydrostatic Model. *Tech. Rep. MRI*, **42**, 133pp.
- 齊藤和雄, 2003: 概論. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 1–15.
- 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.
- 齊藤和雄, 石田純一, 荒波恒平, 中山寛, 2008: 計算安定性向上のための開発. 数値予報課報告・別冊第 54 号, 気象庁予報部, 52–57.
- 露木義, 1997: 変分法によるデータ同化. 数値予報課報告・別冊第 43 号, 気象庁予報部, 102–165.

### 1.3 各国の非静力学モデル・データ同化システムの開発動向<sup>1</sup>

#### 1.3.1 非静力学モデル

本項では世界各国における非静力学モデルの開発及びその運用に係る動向を述べる。第 1.2.1 項で述べたように、研究用の雲解像非静力学モデルは比較的長い歴史を有している。これは、計算機資源に応じて予報領域を設定でき、少ない計算機資源でも利用可能であるためであり、様々な機関で開発が行われてきた。これら全てを網羅することは難しいことから、ここでは、主に国家気象機関における開発状況について述べる。

近年では、現業及び研究の双方で利用可能である数値予報モデルを複数の機関が共同して開発する動きが広まっている（このように開発された数値予報モデルをコミュニティモデルと呼ぶ）。特に、欧州においてはその動きが活発であり、フランスを中心とする ALADIN(Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational)、ドイツを中心とする COSMO(Consortium for Small-scale Modelling)、北欧を中心とする HIRLAM(High Resolution Limited Area Model)、中欧を中心とする LACE(Limited Area modelling in Central Europe) など、いくつかのコンソーシアム<sup>2</sup> が形成されている。また、英国気象局(United Kingdom Met Office: UKMO) は明示的にはコンソーシアムとはしていないが、いくつかの気象機関と協力関係がある。これらの国際的な協力関係図を図 1.3.1 に示した。以下では、各国のモデル開発の動向を述べる。なお、欧州においては、コンソーシアムとしての開発が多いことから、コンソーシアムと関連付けて述べることにする。なお、本項で示したウェブサイトの URL は 2014 年 1 月末の時点で利用可能であることを確認している。

##### (1) 米国

米国では米国大気研究センター(National Center for Atmospheric Research: NCAR) が中心となる力学コアの開発と、米国環境予測センター(National Centers for Environmental Prediction: NCEP) による力学コアの開発が行われている。そして、この両者の力学コアを統合した枠組みとして WRF(Weather Research and Forecasting model<sup>3</sup>) というモデルがある。この枠組みにおいて、NCAR は第 5 世代メソスケールモデル(The Fifth-Generation NCAR / Penn State Mesoscale Model: MM5) の改良版として WRF-ARW(ARW は Advanced Research WRF の略) と呼ばれる力学コアを開発する一方、NCEP は WRF-NMM(NMM は Non-hydrostatic Mesoscale Model の略) と呼ばれる力学コ

アを開発している。WRF では数値予報モデルの物理過程のみならず力学コアについても複数の選択肢が利用できるようになっており、前述の WRF-ARW と WRF-NMM は全く異なる力学コアでありながら、いずれかを選択できるようになっている(ただし、物理過程は完全に独立に選択できる仕様ではない)。NCEP においては WRF-ARW, WRF-NMM のいずれの力学コアも現業モデルで利用されている。

WRF-ARW の力学コアの最新ドキュメント(Skamarock et al. 2008) は上記ウェブサイトから利用可能であり、asuca の開発において大いに参考にしている。例えば、WRF-ARW の力学コアと asuca の類似点として、Arakawa C 格子(Arakawa and Lamb 1977) を用いること、ドライモデルの場合に予報変数として  $\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho \theta$  (ただし、 $\rho$  は密度、 $u, v, w$  は風速の 3 成分、 $\theta$  は温位をそれぞれ表す) を用いること、時間積分法に 3 段階ルンゲクッタ法(Wicker and Skamarock 2002) を用いること<sup>4</sup>、音波や重力波は split-explicit 法(Klemp et al. 2007) で扱うこと、などがあげられる。もちろん、asuca の開発目標は WRF-ARW と同一の力学コアを作るのではなく、JMA-NHM の後継モデルを作ることであり、両者の力学コアは同一ではない。WRF-ARW の力学コアで asuca と異なる点として、移流スキームは 2 次精度から 6 次精度までを選択可能であること、移流により負の値が生じた際に Skamarock and Weisman (2009) による補正を行っていること、鉛直座標として気圧準拠の Laprise (1992) による hydrostatic-pressure coordinate を用いていること、水平にはマップファクターを用いて直交する座標系のみを用いていること、などがあげられる。

また、全球非静力学モデルの開発も研究ベースでは行われており、例えば、ボロノイ格子<sup>5</sup> を用いた MPAS(Model for Prediction Across Scales; Skamarock et al. 2012) の開発が行われている。これは WRF-ARW の方程式系の多くを引き継いだ上で、高度準拠の鉛直座標への変更や、全球モデル向けの新たな水平格子系などを採用している。また、直交座標でない格子系において Arakawa C 格子を利用するために Thuburn et al. (2009) の手法を採用するとのことである。

##### (2) 欧州中期予報センター (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: ECMWF)

ECMWF は全球モデルのみを運用するセンターであり、現時点では非静力学モデルは運用していない。しかしながら、将来の非静力学モデルの利用も念頭において開発が進められている。現在運用中のスペクトル

<sup>1</sup> 石田 純一 (第 1.3.1 項)、藤田 匡 (第 1.3.2 項)

<sup>2</sup> コンソーシアムとは上記のコミュニティモデルを開発するための組織を指す。

<sup>3</sup> <http://www.wrf-model.org/index.php>

<sup>4</sup> WRF-ARW はオプションとして 2 段階ルンゲクッタ法も利用可能である。

<sup>5</sup> 任意に配置された点に対して、隣接する 2 点を結ぶ直線の垂直 2 等分線により領域を分割することにより生成された格子。

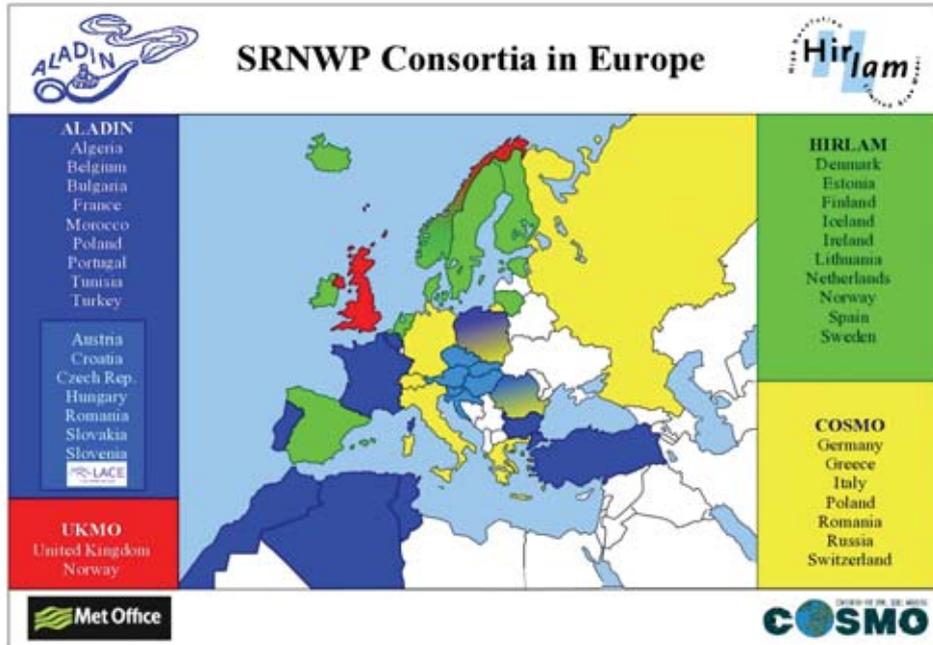


図 1.3.1 欧州における非静力学モデル開発の協力関係図 (2012 年現在)。http://www.eumetnet.eu/c-srnwp より引用。

モデルによる静力学モデルをそのまま非静力学化することを目標に、高速ルジャンドル変換の開発等が進められている (Wedi et al. 2013)。

### (3) 英国: UKMO

UKMO では、1990 年代には UKMO mesoscale model を用いていたが、その後、Unified Model として全球モデルと領域モデルの一本化を行った。UKMO で現在現業モデルとして用いられている力学コアは New Dynamics (Davies et al. 2005) と呼ばれるものであり、緯度経度座標を用いた格子モデルである。移流にはセミラグランジュ法を用いて、積分時間間隔を伸ばすとともに、音波に対しては semi-implicit 法を用いて安定化を図っている。Unified Model は UKMO だけでなく、ノルウェー気象局、オーストラリア気象局、韓国気象局、米国空軍などで用いられている<sup>6</sup>。

この後継となる力学コアが ENDGame (Even Newer Dynamics for General atmospheric modelling of the environment) である。これは New Dynamics を基としており、方程式系や上述のセミラグランジュ法、semi-implicit 法を維持しつつ、SLICE (Zerroukat et al. 2004) と呼ばれる保存性を高めたセミラグランジュ移流スキームの採用、semi-implicit 法で必要とされる連立方程式の離散化の変更、連立方程式を解く際の前処理の変更、といった改良を加えている<sup>7</sup>。2013 年 8 月上旬にリリースされた Unified Model のバージョン

ンから標準ジョブの力学コアが New Dynamics から ENDGame に切り替わり、現実化も間近な状況である (荒波、私信)。

当面の現業モデルとしては、上述の ENDGame が導入される段階であるが、UKMO ではさらに次のプロジェクトとして GungHo (Globally Uniform Next Generation Highly Optimised の略)<sup>8</sup> が開始されている。このプロジェクトは、現在 UKMO で運用中の緯度経度座標による格子モデルを高分解能化した場合に、極の問題が顕在化することから、様々な格子配置について比較を行った後に実際に採用するものを決定するためのものである。これは UKMO 単独のプロジェクトではなく、大学等の研究機関と共同で行っており、UKMO の力学部門と計算機部門から 5FTE<sup>9</sup>、バース大学、エクセター大学、インペリアルカレッジ、リーズ大学、マンチェスター大学、レディング大学から合計 5FTE、STFC (Science and Technology Facilities Council) から 2FTE の合計 12FTE による開発を行っている<sup>10</sup>。5 年間のプロジェクトとして、2011 年に開始され、最初の 2 年は調査を行い、次の 3 年は開発を行うとされている。このプロジェクトにおいて、力学コアにとつ

<sup>8</sup> <https://puma.nerc.ac.uk/trac/GungHo>

<sup>9</sup> Full-Time Equivalent の略。フルタイムの職員に換算して何人分の職員に相当するかを表すもの。例えば、開発に 5FTE とはフルタイムを週 5 日とした場合に、週に 25 人・日の開発が行われることを指す。この場合、開発に従事する職員が 5 名とは限らず、例えば、10 名の職員が週に 2.5 日ずつ開発に従事するといった場合も含む。

<sup>10</sup> [http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/9/i/PresentationMOSAC\\_16.10\\_Wood.pdf](http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/9/i/PresentationMOSAC_16.10_Wood.pdf)

<sup>6</sup> [http://srnwp.met.hu/AnnualMeetings/2013/download/monday/Mike\\_Bush.pdf](http://srnwp.met.hu/AnnualMeetings/2013/download/monday/Mike_Bush.pdf)

<sup>7</sup> [http://srnwp.met.hu/AnnualMeetings/2013/download/monday/posters/Mike\\_Bush.pdf](http://srnwp.met.hu/AnnualMeetings/2013/download/monday/posters/Mike_Bush.pdf)

て望ましい要件を検討し、その要件に基づいて様々な格子に対するレビュー (Staniforth and Thuburn 2012) を行っている。また、UKMO でこれまでに用いてきた直交座標である緯度経度座標から非直交座標への変更も念頭におくようになるため、Arakawa C 格子の非直交座標への適用について検討している。

#### (4) フランス: ALADIN

フランス気象局 (Météo France) では水平格子間隔 5~10km 向けの ALADIN と、さらに高分解能の 2~3km 向けの AROME (Applications of Research to Operations at MEsocale) の開発を行っている<sup>11</sup>。なお、ALADIN は予報モデルの名称でもあるが、欧州を中心としたコンソーシアム (1990 年設立) の名称としても用いられる場合がある。力学コアの開発は ECMWF と共同で行っている。このモデルは、移流にはセミラグランジュ法を、音波の安定化には semi-implicit 法を用いるスペクトルモデルである。

また、コンソーシアム全体として HIRLAM との連携を強化している。現時点でモデルやソースコードを共通化しているところであり、今後は管理体制の共通化も図っていく予定である<sup>12</sup>。近年の力学コアの開発課題として、鉛直有限要素法の導入に取り組んでいる。

#### (5) ドイツ: COSMO

COSMO はドイツ気象局 (Deutscher Wetterdienst: DWD) が中心となって開発しているモデルであるが、イタリア、スイスの気象機関も開発に積極的に参加している。DWD では JMA-NHM や MM5 と同様の力学コアを持つ LM (Lokal-Modell) を開発・運用していたが、2000 年代には新たな数値予報モデルとして COSMO の開発を開始しており、力学コアも改良が加えられている<sup>13</sup>。COSMO は DWD のみならず各国の気象機関で現業運用されている。COSMO は格子モデルであり、時間積分法には 3 段階ルンゲクッタ法を用い、音波に対しては split-explicit 法を用いるなど asuca や WRF-ARW の力学コアと近いものがある。

COSMO はコンソーシアムの名称でもあり、1998 年に設立されている。COSMO は領域モデルのコンソーシアムであるが、DWD は全球モデル (正 20 面体格子による静力学モデル) の運用も行っており、正 20 面体格子による全球非静力学モデル ICON (ICOsahedral Nonhydrostatic model) の開発をドイツ・マックスプランク研究所と共同して行ってきた。この開発が進み現業モデルとしての利用の目処がたってきたこと、及

び領域モデル版の運用が可能となったことから、DWD の全球モデルを ICON へ移行すると共に、これまでに COSMO が独自に開発・運用してきた領域モデルを ICON の領域モデル版に置き換えるための検討を行う方針が 2013 年にコンソーシアムとして決定された<sup>14</sup>。これによると、DWD では既に導入を予定しており、その他の機関でも 2020 年までに現業モデルとしての評価を行った後に順次移行していく計画である。ICON への移行後も COSMO コンソーシアムとしての活動は継続し、ICON の領域モデル版の運用に責任を持つことになる。

#### (6) カナダ

カナダ環境省 (Environmental Canada) のカナダ気象センター (Canadian Meteorological Center: CMC) における現業全球非静力学モデル GEM (Global Environmental Multiscale operational model) は緯度経度座標による格子モデルであり、移流にはセミラグランジュ法を、音波の安定化には semi-implicit 法を用いている<sup>15</sup>。現在、Yin-Yang 格子による全球非静力学モデルを開発中である (Qaddouri and Lee 2011)。これは、GEM が緯度経度座標を用いており、将来的に極の問題に直面すると考えられることから、その拡張を念頭においたものである。

#### (7) 北欧: HIRLAM

HIRLAM は北欧を中心としたコンソーシアムであり、欧州のコンソーシアムの中では設立がもっとも古く 1985 年である。近年は ALADIN との連携を深め、モデルやソースコードの共通化を図っている。なお、新たな力学コアの開発は行っていない。

#### (8) 中欧: LACE

LACE は中欧を中心としたコンソーシアムである。ALADIN の内部コンソーシアムのような側面もあり、LACE の参加機関は全て ALADIN の参加機関でもある。力学コアは ALADIN と共用化している。

力学コアの設計には様々な自由度があり、各機関・コンソーシアムの力学コアの違いとなって現れている。それぞれの力学コアの改良に際しては、開発・運用から得られた知見を踏まえて、改良すべき点と維持すべき点を見極めて方向性を選択していると考えられる。例えば、ECMWF はスペクトルモデルによるセミラグランジュ法と semi-implicit 法を維持するために高速ルジャンドル変換の開発を行っている。UKMO においては、高分解能化した際の緯度経度座標の極の問題を改善すべき点と考え、様々な格子を検討しつつ、これまでに運用してきた Arakawa C 格子に対する開発も行っている。いずれの機関もそれまで培ってきた実績から

<sup>11</sup> ドキュメントは

<http://www.cnrn.meteo.fr/arome/doc/arodoc.pdf> から入手可能。

<sup>12</sup> [http://srnwp.met.hu/AnnualMeetings/2013/download/monday/Piet\\_Termonia.pdf](http://srnwp.met.hu/AnnualMeetings/2013/download/monday/Piet_Termonia.pdf)

<sup>13</sup> 力学コアのドキュメントは

<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/cosmoDyncsNumcs.pdf> から利用可能。

<sup>14</sup> [http://srnwp.met.hu/AnnualMeetings/2013/download/monday/Michal\\_Ziemianski.pdf](http://srnwp.met.hu/AnnualMeetings/2013/download/monday/Michal_Ziemianski.pdf)

<sup>15</sup> <http://collaboration.cmc.ec.gc.ca/science/rpn/publications/pdf/GEM4.1.pdf>

かけ離れた開発は行わないようである。

また、全球静力学モデルから非静力学モデルへの拡張、あるいは将来の高分解能化で問題となりうる極の問題を回避するための改良が行われている。

asucaの開発においても、気象庁における利用をふまえてその改良すべき点・維持すべき点を精査し、その上で開発の方向性を定めていく必要がある。その際、各機関の動向について幅広く着目していく必要があるものの、asucaの力学コアとの類似点を考えると、WRF-ARWとCOSMOの動向への着目が特に重要であろう。また、asuca-GlobalはYin-Yang格子を採用していることから、カナダ気象センターの動向も着目すべきところである。

### 1.3.2 データ同化システム

引き続き、各国におけるデータ同化システムの開発への取り組みについて述べる。データ同化で使われる技術やその開発課題は、全球モデルと領域モデル、非静力学モデルと静力学モデルの初期値作成で共通する部分や、関連している部分も多いため、これらを含めた全般的な動向について記述する。なお、本項で示したウェブサイトのURLは2014年1月末の時点で利用可能であることを確認している。

#### (1) 米国

NCEPでは、全球解析GDAS (Global Data Assimilation System)をデータ同化システムGSI (Gridpoint Statistical Interpolation)の3D-Varで運用している。2012年に3D-Varの制御変数を拡張するとともに、EnKF (Ensemble Kalman Filter; 三好 (2006)などを参照)とのハイブリッドデータ同化を現業化した(Wang et al. 2013b)<sup>16</sup>。また、領域モデルとして水平格子間隔12 kmのNAM (North American Mesoscale Forecast System)を北米大陸を中心とする領域で運用している(Rogers et al. 2009)<sup>17</sup>。初期値作成はデータ同化システムNDAS (NAM Data Assimilation System)により、全球予報値を第一推定値とし、GSI 3D-Varによる解析と3時間予報を交互に繰り返す12時間解析サイクルで行われている<sup>18</sup>。また、全球EnKFのアンサンブル摂動を用いたハイブリッド化が計画されている<sup>19</sup>。さらに、北米域を対象とする水平格子間隔13

<sup>16</sup> さらに、接線形・随伴モデルを用いないデータ同化手法である4D-EnVar(Liu et al. 2008, 2009; Buehner et al. 2010a,b)への拡張の開発を研究機関、大学などと共同で進めている(Kleist 2013; Wang et al. 2013a)。これと並行して接線形・随伴モデルによる4D-Varの構築も進めているものの、計算コストが課題となっている(Rancic et al. 2012)。

<sup>17</sup> NAMの領域内のいくつかの狭領域でネスティングにより高解像度のモデルも実行している。

<sup>18</sup> NAM、NDASについては<http://www.emc.ncep.noaa.gov/NAM>に解説がある。

<sup>19</sup> 2013年12月時点で計画されている更新に関して[http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbp11/misc/MMB\\_NAM+HIRESW\\_NPSR2013.ppt](http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbp11/misc/MMB_NAM+HIRESW_NPSR2013.ppt)に解説がある。

kmの領域モデルRAPv1 (Rapid Refresh version 1)を毎時実行している<sup>20</sup>。RAPv1の初期値は水平格子間隔27 kmの3D-VarとRadar DFI (Radar Digital Filter Initialization; Weygandt et al. 2008; Benjamin et al. 2004, 2008)によるレーダー反射強度の同化により作成している。同時に、NOAAの地球システム研究所(Earth System Research Laboratory: ESRL)では、RAPv2 (RAP version 2)として、RAPv1に改良を加えたシステムを試験的に運用しつつ高度化を進めている。RAPv2では、2013年に全球EnKFのアンサンブル摂動を用いて3D-Varの制御変数拡張によるハイブリッド化を行った(Hu et al. 2013)。これは、2014年初めにNCEPに移植され、現業運用される予定である。さらに、開発中であるが、米国を覆う水平格子間隔3 kmのHRRR (High Resolution Rapid Refresh)をリアルタイムで毎時実行している<sup>21</sup>。HRRRでは、水平格子間隔12 kmの3D-VarとRadar DFIで初期値を作成している。

また、米国では研究機関においていくつか領域モデルの4D-Varが開発されている。Sun et al. (1991)は主にNCARにおける研究で、雲解像モデルに基づく4D-Varによる高解像度レーダーデータ同化システムVDRAS (Variational Doppler Radar Analysis System)を開発した(Sun and Crook 1997, 1998; Sun 2005; Sun and Zhang 2008; Sun et al. 2010)。また、コミュニティモデルWRFに基づく4D-Var (Huang et al. 2009; Zhang et al. 2013)がNCARにより開発され、WRFDA (WRF model's Community Variational/Ensemble Data Assimilation System)の一部として公開されている(Barker et al. 2012; Sun and Wang 2013)。WRFDAは、制御変数を拡張し、ハイブリッドデータ同化にも対応している(Wang et al. 2008a,b)。

#### (2) ECMWF

ECMWFでは、1997年より4D-Varによる全球解析を運用している(ECMWF 2013; Rabier et al. 2000; Mahfouf and Rabier 2000; Klinker et al. 2000)。運用開始後にも様々な改良がなされ、精度向上を図っている。この中で、物理過程の接線形・随伴モデルの高度化も行われており、接線形・随伴モデルの継続的な開発に成功している例として注目される(Janisková and Lopez 2012)。さらに、背景誤差の作成手法の高度化も進めており、2010年より、EDA (Ensemble of Data Assimilations: 解析システムの不確定性の起源に対応する摂動を加えた複数の4D-Var解析サイクルによるアンサンブル)から評価した背景誤差分散を使用することにより、流れへの依存性を考慮している(Bonavita

<sup>20</sup> RAPv1/v2については、<http://rapidrefresh.noaa.gov/>に解説がある。

<sup>21</sup> HRRRについては、<http://ruc.noaa.gov/hrrr/>に解説がある。

et al. 2011, 2012; Isaksen et al. 2010)<sup>22</sup>。EnKFをはじめ接線形・随伴モデルを必要としないアンサンブルデータ同化手法の検討も見られるものの (Hamrud and Bonavita 2012)、引き続き接線形・随伴モデルによる4D-Varに重点を置いており、さらなる高度化に向けた開発を進めている (Fisher et al. 2011; Fisher and Gürol 2013; Isaksen et al. 2013; Trémolet 2013)。

### (3) 英国

UKMOでは、全球解析 (Rawlins et al. 2007; Stiller and Ballard 2009; Stiller 2009)のほか、北大西洋から欧州域を対象とするNAE (North Atlantic and European regional model)で4D-Var (インナーループ水平格子間隔36 km)を運用している (Macpherson 2005; Lorenc 2006)。第1.3.1項で述べたように、UKMOでは全球モデルと領域モデルがUnified Modelとして一本化されている。これを生かして、NAEでは全球解析と概ね同様の接線形・随伴モデルを使用している。このほか、高解像度のモデルとして、英国を覆う領域を対象として水平格子間隔1.5 kmのUKVを2010年より運用している。UKVの初期値は3D-Var (水平格子間隔3 km)と降水強度の潜熱ナッジングによって作成される (Macpherson et al. 1996; Jones and Macpherson 1997; Dixon et al. 2009)。さらに、2012年のロンドンオリンピックに合わせて、数値予報モデルに基づいたナウキャストの試みとして、英国南部域を対象に、水平格子間隔1.5 kmのモデルを毎時実行するシステムを開発し、試験的なリアルタイム実行を行った (Nowcasting Demonstration Project: NDP; Ballard and Lean 2012; Ballard et al. 2012; Pierce et al. 2012)。このシステムの予報初期値作成には、水平格子間隔3 km、同化ウィンドウ1時間の4D-Varが用いられた<sup>23</sup>。4D-Varの計算実行時間は3~10分と、効率の良いシステムとなっている。現在、現業化に向け改良をさらに進めており (Hawkness-Smith et al. 2012)、毎時運用可能な高解像度4D-Varを実現した例として注目される。なお、全球解析では、制御変数拡張による4D-Varの全球アンサンブル予報システム<sup>24</sup>とのハイブリッド化を2011年に現業化した (Clayton et al. 2013)。また、NDPに見られるように接線形・随伴モデルに基づいた4D-Varの開発を進めている一方で、全球に関しては、接線形・随伴モデルを用いず、アンサンブル摂動の統計によって背景誤差の時間相関を評価する4D-EnVar (Liu et al. 2008,

<sup>22</sup> さらに、2013年6月時点の計画では2013年11月に背景誤差共分散についてもEDAによる流れへの依存性の導入が予定されている (Isaksen 2013)。

<sup>23</sup> 潜熱ナッジングによるレーダー降水強度の同化も併用している。

<sup>24</sup> MOGREPS (the Met Office Global and Regional Ensemble Prediction System; Bowler et al. 2008)の全球部分。ETKF (Ensemble Transform Kalman Filter; Bishop et al. 2001; Wang et al. 2004)によって初期摂動を作成している。

2009; Buehner et al. 2010a,b)の検討も同時に進めている (Flowerdew et al. 2013; Lorenc et al. 2013)。

### (4) フランス

Météo Franceでは全球モデルArpège (Action de Recherche Petit Echelle Grande Echelle)を運用しており、4D-Varにより初期値を作成している (Veersé and Thépaut 1998)。ECMWFと共同開発を行っており、全球モデル、変分法データ同化のコードの多くの部分をECMWFの全球モデル、同化システムIFS (Integrated Forecasting System)と共有している (Yessad 2013)。2008年より、全球4D-Varに、ECMWF同様EDAによる流れに依存する背景誤差分散を導入しており (Raynaud et al. 2011)、高度化に向けた開発を進めている (Raynaud et al. 2012)。また、領域数値予報のための拡張を行い、水平格子間隔2.5 kmの非静力学モデルAROMEをフランス域で運用しており<sup>25</sup>、3D-Varによる初期値作成を行っている (Seity et al. 2011; Brousseau et al. 2008)。6時間ごとの予報初期値は、3時間同化ウィンドウの3D-Varデータ同化サイクル2回で作成される<sup>26</sup>。また、気候学的背景誤差として、3D-VarによるAROMEのアンサンブルデータ同化により評価したものを用いている (Brousseau et al. 2011)。さらに、AROMEアンサンブル予報による流れへの依存性の検討 (Brousseau et al. 2012)、特に降水域など気象条件に応じた背景誤差特性に注目した背景誤差の検討 (Montmerle 2012)など、背景誤差の設計を高度化するための検討を重点的に進めている。

### (5) ドイツ

DWDでは、全球モデルGME (Global Model for Europe)の初期値作成を3D-Varで行っている (Anlauf et al. 2012, 2011; Majewski et al. 2012)。また、領域モデルとしてCOSMOモデルにより、欧州域を対象とする水平格子間隔7 kmのCOSMO-EU (COSMO Europe)と、ドイツ域を対象とする水平格子間隔2.8 kmのCOSMO-DE (COSMO Deutschland)を運用しており、これらのモデルの初期値作成はいずれもナッジングに基づいている (Schraff and Hess 2012; Baldauf et al. 2011; Schraff 1996, 1997)。COSMO-DEでは、潜熱ナッジングによって、レーダーによる降水強度も利用している (Klink and Stephan 2004; Stephan et al.

<sup>25</sup> Arpègeに基づく領域モデルALADIN (現在はフランス海外県、海外領土でのみ運用)と、静力学部分のコードの大部分を共有している。物理過程については、フランスの研究コミュニティ非静力学モデルであるMeso-NHの高解像度予報に適した物理過程を多く使用している (Yessad 2013)。  
<http://www.cnrm.meteo.fr/arome/>

<sup>26</sup> 1時間ウィンドウでの同化について、DFI (Digital Filter Initialization)、IAU (Incremental Analysis Updates; Bloom et al. 1996)など、同化サイクルでの解析値のバランスを確保する手法の併用も含めて試みているが、予報精度の低下が見られ今のところ採用されていない (Seity et al. 2011; Montmerle 2013)。

2008)。DWDでは、将来の方向性として LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter; Hunt et al. 2007) によるデータ同化システムの高度化を行う方針をとっている (Reich et al. 2011; Schraff 2012a,b, 2013)。全球解析については、LETKFの開発を進め 3D-Var とのハイブリッド手法を目指している。また、水平格子間隔 1~3 km 程度の高解像度アンサンブル予報を目標に、COSMO-DE に LETKF を適用した高解像度領域データ同化システムの開発も進めている。

## (6) カナダ

CMCでは、2005年より全球モデルの初期値作成を 4D-Var で行っている (Gauthier et al. 2007)。また、全球アンサンブル予報初期値作成のために、2005年より EnKF の運用も行っている (Houtekamer and Mitchell 2005)。領域モデルとしては、北米から北極域を覆う領域で水平格子間隔 10 km のモデルを運用しており、全球予報と共通のモデルを用いている (Fillion et al. 2010)。2012年より、領域モデルについても初期値作成は 4D-Var で実行している (Tanguay et al. 2012)。インナーモデルは水平格子間隔 100 km である。さらに、水平格子間隔 2.5 km の高解像度領域モデルを 5 つの狭領域で実行しているが<sup>27</sup>、初期値の作成においてデータ同化は行わず、領域モデルからダウンスケーリングする手法を採用している<sup>28</sup>。

CMCでは、全球データ同化システムとして運用している 4D-Var と EnKF、さらにこれらのハイブリッド手法の比較に積極的に取り組んでいる (Buehner et al. 2010a,b)。現在、接線形・随伴モデルを必要としない 4D-EnVar への移行を目指して、このデータ同化手法の精度調査を進めている (Buehner et al. 2013)。

## (7) 北欧

北欧を中心とする HIRLAM コンソーシアムでは、4D-Var を開発・運用している (Gustafsson et al. 2012, 2006; Huang et al. 2002)。力学の接線形・随伴モデルは HIRLAM 領域スペクトルモデルに基づいている<sup>29</sup>が、物理過程の接線形・随伴モデルについては、HIRLAM モデルの物理過程を線形化したもの (Yang 2002) のほか、Buizza (1993) (ECMWF) や Janisková et al. (1999) (Météo France) によるパッケージなども適用可能である。この開発成果はスウェーデン、フィンランド、アイルランドの領域解析で現業化されている (Gustafsson et al. 2012)。第 1.3.1 項で述べたように、HIRLAM は近年フランスを中心とするコンソーシアム ALADIN との連携を深め、コードを共通化したモデル、データ同化システム HARMONIE (HIRLAM ALADIN

Regional/Meso-scale Operational NWP in Europe) の構築を進めており、この中で HARMONIE4D-Var の開発にも取り組んでいる (Lindskog et al. 2011)。また、HIRLAM コンソーシアムは ETKF (Bishop et al. 2001) を HIRLAM モデルに適用するシステムを開発し (Bojarova et al. 2011)、これに基づいた 4D-EnVar の検討も行っている (Gustafsson and Bojarova 2013)。

全体的なデータ同化システムの開発動向としては、次のような点が挙げられる。

1. 4D-Var によるデータ同化の豊富な運用実績を持つセンターでは、接線形・随伴モデルの高度化に引き続き重点を置いて開発が進められている。
2. 変分法の背景誤差に、アンサンブル摂動による流れへの依存性を考慮するハイブリッド手法が、広く用いられている。制御変数拡張による実装法 (Lorenz 2003; Buehner 2005; Wang et al. 2008a) は、比較的低いコストで実現でき、多くの既存の変分法システムに導入されている。
3. 4D-EnVar が注目されている。これは、接線形・随伴コードの維持管理が不要なこと、大規模並列計算に対応しやすく高解像度化などにも有利であること、非線形モデルによる摂動の時間発展を用いることなどによる<sup>30</sup>。一方で、局所化の扱い (解析場のバランスへの影響、シグナルの移流への対応)、気候学的背景誤差を動的に扱うのが困難であること、モデルバイアスによる影響を受けやすいことなど、未解決の課題も残されている。

今後、気象庁においても、以上で述べたような世界的な動向に注目し、高い性能が期待される手法を取り入れつつ運用に最適なデータ同化システムを構築していくことが重要と考えられる。

## 参考文献

- Anlauf, H., D. Pingel, and A. Rhodin, 2011: Assimilation of GPS radio occultation data at DWD. *Atmos. Meas. Tech.*, **4**, 1105–1113.
- Anlauf, H., A. Rhodin, H. Frank, and A. Engel, 2012: The impact of satellite data on GME short-range forecasts – A case study. *DWD Internal Report*, DWD, 21 pp.
- Arakawa, A. and V. R. Lamb, 1977: Computational design of the basic dynamical processes of the

<sup>27</sup> このうち 1 つが現業運用、4 つは試験的な運用 (うち 1 つは季節を限定した運用) である。

<sup>28</sup> [http://weather.gc.ca/grib/grib2\\_HRDPS\\_HR\\_e.html](http://weather.gc.ca/grib/grib2_HRDPS_HR_e.html) に解説がある。

<sup>29</sup> HIRLAM では、格子点モデル、スペクトルモデル両方のモードが利用できる (Gustafsson and Huang 1996)。

<sup>30</sup> EnKF も同様の特徴を持ち広く研究が行われている。EnKF との比較では、4D-EnVar の手法的な観点からの特徴としては、背景誤差のハイブリッド化や解析値のバランスを考慮する拘束条件を組み込みやすいことなどが挙げられる。今後、現業運用の観点からの各手法の特徴も明らかになってくるものと思われる。

- UCLA general circulation model. *Methods in Computational Physics*, Academic Press, Vol. 17, 173–265.
- Baldauf, M., J. Förstner, S. Klink, T. Reinhardt, C. Schraff, A. Seifert, and K. Stephan, 2011: Kurze Beschreibung des Lokal-Modells Kürzestfrist COSMO-DE (LMK) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD (in German, Short description of the convection resolving model COSMO-DE and its databases on the data server of DWD). DWD, 81 pp.
- Ballard, S. and H. Lean, 2012: Nowcasting and high resolution forecast development. *MOSAC paper*, **17.14**, UK Met Office, Exeter, UK, 9 pp.
- Ballard, S., Z. Li, D. Simonin, H. Buttery, C. Charlton-Perez, N. Gaussiat, and L. Hawkness-Smith, 2012: Use of radar data in NWP-based nowcasting in the Met Office. *IAHS Publ.*, **351**, 336–341.
- Barker, D., X.-Y. Huang, Z. Liu, T. Auligné, X. Zhang, S. Rugg, R. Ajjaaji, A. Bourgeois, J. Bray, Y. Chen, M. Demirtas, Y.-R. Guo, T. Henderson, W. Huang, H.-C. Lin, J. Michalakes, S. Rizvi, and X. Zhang, 2012: The Weather Research and Forecasting Model’s Community Variational/Ensemble Data Assimilation System: WRFDA. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 831–843.
- Benjamin, S., S. S. Weygandt, J. M. Brown, T. Smirnova, D. Devenyi, K. Brundage, G. Grell, S. Peckham, W. R. Moninger, T. W. Schlatter, T. L. Smith, and G. Manikin, 2008: Implementation of the Radar-Enhanced RUC. *Preprints 13th Conf. Aviation, Range and Aerospace Meteorology, January 2008, New Orleans, LA, Amer. Meteor. Soc.*, 7 pp.
- Benjamin, S. G., D. Dévényi, S. S. Weygandt, K. J. Brundage, J. M. Brown, G. A. Grell, D. Kim, B. E. Schwartz, T. G. Smirnova, T. L. Smith, and G. S. Manikin, 2004: An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 495–518.
- Bishop, C. H., B. J. Etherton, and S. J. Majumdar, 2001: Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: Theoretical aspects. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 420–436.
- Bloom, S. C., L. L. Takacs, A. M. da Silva, and D. Ledvina, 1996: Data Assimilation Using Incremental Analysis Updates. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1256–1271.
- Bojarova, J., N. Gustafsson, Å. Johansson, and O. Vignes, 2011: The ETKF rescaling scheme in HIRLAM. *Tellus A*, **63**, 385–401.
- Bonavita, M., L. Isaksen, and E. Hólm, 2012: On the use of EDA background error variances in the ECMWF 4D-Var. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **138**, 1540–1559.
- Bonavita, M., L. Raynaud, and L. Isaksen, 2011: Estimating background-error variances with the ECMWF Ensemble of Data Assimilations system: some effects of ensemble size and day-to-day variability. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 423–434.
- Bowler, N. E., A. Arribas, K. R. Mylne, K. B. Robertson, and S. E. Beare, 2008: The MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 703–722.
- Brousseau, P., L. Berre, F. Bouttier, and G. Desroziers, 2011: Background-error covariances for a convective-scale data-assimilation system: AROME-France 3D-Var. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 409–422.
- Brousseau, P., L. Berre, F. Bouttier, and G. Desroziers, 2012: Flow-dependent background-error covariances for a convective-scale data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **138**, 310–322.
- Brousseau, P., F. Bouttier, G. Hello, Y. Seity, C. Fischer, L. Berre, T. Montmerle, L. Auger, and S. Malardel, 2008: A prototype convective-scale data assimilation system for operation: The AROME-RUC. *HIRLAM Tech. Rep.*, **68**, 23–30.
- Buehner, M., 2005: Ensemble-derived stationary and flow-dependent background-error covariances: evaluation in a quasi-operational NWP setting. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1013–1043.
- Buehner, M., P. L. Houtekamer, C. Charette, H. L. Mitchell, and B. He, 2010a: Intercomparison of Variational Data Assimilation and the Ensemble Kalman Filter for Global Deterministic NWP. Part I: Description and Single-Observation Experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1550–1566.
- Buehner, M., P. L. Houtekamer, C. Charette, H. L. Mitchell, and B. He, 2010b: Intercomparison of Variational Data Assimilation and the Ensemble Kalman Filter for Global Deterministic NWP. Part II: One-Month Experiments with Real Observations. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1567–1586.
- Buehner, M., J. Morneau, and C. Charette, 2013: Four-dimensional ensemble-variational data assimilation for global deterministic weather prediction. *Nonlin. Processes Geophys.*, **20**, 669–682.
- Buizza, R., 1993: Impact of simple vertical diffusion

- scheme and of the optimization time interval on optimal unstable structures. *ECMWF Tech. Memo.*, **192**, ECMWF, Reading, UK.
- Clayton, A. M., A. C. Lorenc, and D. M. Barker, 2013: Operational implementation of a hybrid ensemble/4D-Var global data assimilation system at the Met Office. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **139**, 1445–1461.
- Davies, T., M.J.P. Cullen, A.J. Malcolm, M.H. Mawson, A. Staniforth, A.A. White, and N. Wood, 2005: A new dynamical core for the Met Office’s global and regional modelling of the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 1759–1782.
- Dixon, M., Z. Li, H. Lean, N. Roberts, and S. Ballard, 2009: Impact of data assimilation on forecasting convection over the United Kingdom using a high-resolution version of the Met Office Unified Model. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1562–1584.
- ECMWF, 2013: Part II: Data Assimilation. *IFS Documentation Cy38r1*, ECMWF, Reading, UK, 176 pp.
- Fillion, L., M. Tanguay, E. Lapalme, B. Denis, M. Desgagne, V. Lee, N. Ek, Z. Liu, M. Lajoie, J.-F. Caron, and C. Pagé, 2010: The Canadian Regional Data Assimilation and Forecasting system. *Wea. Forecasting*, **25**, 1645–1669.
- Fisher, M. and S. Gürol, 2013: Time-parallel algorithms for 4D-Var. *presentation at 6th WMO Symposium on Data Assimilation. October 2013, University of Maryland, College Park, MD.*
- Fisher, M., Y. Trémolet, H. Auvinen, D. Tan, and P. Poli, 2011: Weak-Constraint and Long-Window 4D-Var. *ECMWF Tech. Memo.*, **655**, ECMWF, Reading, UK, 49 pp.
- Flowerdew, J., S. Pring, P. Jermey, A. Lorenc, N. Bowler, and A. Clayton, 2013: Initial Trials of 4D-Ensemble-Var. *poster at 6th WMO Symposium on Data Assimilation. October 2013, University of Maryland, College Park, MD.*
- Gauthier, P., M. Tanguay, S. Laroche, S. Pellerin, and J. Morneau, 2007: Extension of 3DVAR to 4DVAR: Implementation of 4DVAR at the Meteorological Service of Canada. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2339–2354.
- Gustafsson, N. and J. Bojarova, 2013: HIRLAM 4DEnsVar – discussion and first results. *presentation at Joint 23rd ALADIN Workshop and HIRLAM All Staff Meeting, April 2013, Reykjavik, Iceland.*
- Gustafsson, N. and X.-Y. Huang, 1996: Sensitivity experiments with the spectral HIRLAM and its adjoint. *Tellus A*, **48**, 501–517.
- Gustafsson, N., X.-Y. Huang, X. Yang, K. Mogensen, M. Lindskog, O. Vignes, T. Wilhelmsson, and S. Thorsteinsson, 2012: Four-dimensional variational data assimilation for a limited area model. *Tellus A*, **64**, 14985.
- Gustafsson, N., E. Källén, and S. Thorsteinsson, 2006: Sensitivity of forecast errors to initial and lateral boundary conditions. *Tellus A*, **50**, 167–185.
- Hamrud, M. and M. Bonavita, 2012: EnKF for global NWP: The experience at ECMWF. *presentation at the 5th EnKF Workshop. May 2012, Carey Meeting Center, Rensselaerville, NY.*
- Hawkness-Smith, L., N. Gaussiat, H. Buttery, C. Charlton-Perez, and S. Ballard, 2012: Variational assimilation of radar reflectivity data at the Met Office. *extended abstract for the Seventh European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology (ERAD2012), June 2012, Toulouse, France*, 6 pp.
- Houtekamer, P. L. and H. L. Mitchell, 2005: Ensemble Kalman filtering. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3269–3289.
- Hu, M., D. Dowell, S. Weygandt, S. Benjamin, J. Whitaker, and C. Alexander, 2013: Improving GSI 3DVAR-Ensemble Hybrid Data Assimilation System for Mesoscale Application with the Rapid Refresh. *poster at 6th WMO Symposium on Data Assimilation. October 2013, University of Maryland, College Park, MD.*
- Huang, X.-Y., X. Yang, N. Gustafsson, K. S. Mogensen, and M. Lindskog, 2002: Four-Dimensional Variational Data Assimilation for a Limited Area Model. *HIRLAM Technical Report*, **57**, 44 pp., URL <http://hirlam.org/>.
- Huang, X.-Y., Q. Xiao, D. M. Barker, X. Zhang, J. Michalakes, W. Huang, T. Henderson, J. Bray, Y. Chen, Z. Ma, J. Dudhia, Y. Guo, X. Zhang, D.-J. Won, H.-C. Lin, and Y. H. Kuo, 2009: Four-Dimensional Variational Data Assimilation for WRF: Formulation and Preliminary Results. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 299–314.
- Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, 2007: Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica*, **D230**, 112–126.
- Isaksen, L., 2013: The Operational Data Assimilation System. *presentation at ECMWF Training Course: Numerical Weather Prediction, Data Assimilation*

- and Use of Satellite Data. June 2013, ECMWF, Reading, UK.
- Isaksen, L., M. Bonavita, R. Buizza, M. Fisher, J. Haseler, M. Leutbecher, and L. Raynaud, 2010: Ensemble of Data Assimilations at ECMWF. *ECMWF Tech. Memo.*, **636**, ECMWF, Reading, UK, 48 pp.
- Isaksen, L., M. Bonavita, and E. Holm, 2013: The ECMWF Hybrid 4D-Var and Ensemble of Data Assimilations. *presentation at 6th WMO Symposium on Data Assimilation. October 2013, University of Maryland, College Park, MD.*
- Janisková, M. and P. Lopez, 2012: Linearized physics for data assimilation at ECMWF. *ECMWF Tech. Memo.*, **666**, ECMWF, Reading, UK, 26 pp.
- Janisková, M., J.-N. Thépaut, and J.-F. Geleyn, 1999: Simplified and regular physical parameterizations for incremental four-dimensional variational assimilation. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 26–45.
- Jones, C. D. and B. Macpherson, 1997: A latent heat nudging scheme for the assimilation of precipitation data into an operational mesoscale model. *Meteorological Applications*, **4**, 269–277.
- Kleist, D., 2013: Hybrid Variational-Ensemble Data Assimilation at NCEP. *presentation at Workshop on Probabilistic Approaches to Data Assimilation for Earth Systems. February 2013, Banff International Research Station, Banff, Alberta, Canada.*
- Klemp, J. B., W. C. Skamarock, and J. Dudhia, 2007: Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2897–2913.
- Klink, S. and K. Stephan, 2004: Assimilation of Radar Data in the LM at DWD. *COSMO Newsletter*, **4**, 143–150.
- Klinker, E., F. Rabier, G. Kelly, and J.-F. Mahfouf, 2000: The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. III: Experimental results and diagnostics with operational configuration. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1191–1215.
- Laprise, R., 1992: The Euler Equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 197–207.
- Lindskog, M., O. Vignes, N. Gustafsson, T. Aspelién, R. Randriamampianina, M. Hortal, U. Androe, P. Dahlgren, B. Chapnik, O. Rivière, C. Fischer, G. Bölöni, F. Meier, B. Strajnar, A. Bucanek, and V. Kovač, 2011: 4D-Var HARMONIE Developments. *HIRLAM Newsletter*, **58**, 2–7.
- Liu, C., Q. Xiao, and B. Wang, 2008: An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme. Part I: Technical formulation and preliminary test. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3363–3373.
- Liu, C., Q. Xiao, and B. Wang, 2009: An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme. Part II: Observing System Simulation Experiments with the Advanced Research WRF (ARW). *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1687–1704.
- Lorenc, A., 2006: Global and Regional Data Assimilation Progress and Plans. *MOSAC paper*, **11.7**, UK Met Office, Exeter, UK, 10 pp.
- Lorenc, A., N. Bowler, A. Clayton, D. Fairbairn, J. Flowerdew, and S. Pring, 2013: Diagnosis of implicit covariances in 4D-EnVar. *presentation at 6th WMO Symposium on Data Assimilation. October 2013, University of Maryland, College Park, MD.*
- Lorenc, A. C., 2003: The potential of the ensemble Kalman filter for NWP – a comparison with 4D-Var. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 3183–3203.
- Macpherson, B., 2005: Regional 4D-Var. *MOSAC paper*, **10.2**, UK Met Office, Exeter, UK, 10 pp.
- Macpherson, B., B. J. Wright, W. H. Hand, and A. J. Maycock, 1996: The impact of MOPS moisture data in the U.K. Meteorological Office mesoscale data assimilation scheme. *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 1746–1766.
- Mahfouf, J.-F. and F. Rabier, 2000: The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. II: Experimental results with improved physics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1171–1190.
- Majewski, D., H. Frank, D. Liermann, and B. Ritter, 2012: Kurze Beschreibung des Globalmodells GME (20 km / L60) und seiner Datenbanken auf dem Datenserver des DWD (in German; Short description of the global model GME and its databases on the data server of DWD). DWD, 80 pp.
- 三好建正, 2006: アンサンブル・カルマンフィルタへデータ同化との融合へ. 数値予報課報告・別冊第 52 号, 気象庁予報部, 80–99.
- Montmerle, T., 2012: Optimization of the Assimilation of Radar Data at the Convective Scale Using Specific Background Error Covariances in Precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 3495–3506.
- Montmerle, T., 2013: Forecast errors at convective scale. *presentation at 6th WMO Symposium on Data Assimilation. October 2013, University of Maryland, College Park, MD.*
- Pierce, C., A. Seed, S. Ballard, D. Simonin, and Z. Li,

- 2012: Nowcasting. *Doppler Radar Observations - Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*. eds. J. Bech and J. L. Chau, *InTech*, 97–142.
- Qaddouri, A. and V. Lee, 2011: The Canadian Global Environmental Multiscale model on the Yin-Yang grid system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 1913–1926.
- Rabier, F., H. Järvinen, E. Klinker, J.-F. Mahfouf, and A. Simmons, 2000: The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. I: Experimental results with simplified physics. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **126**, 1143–1170.
- Rancic, M., R. Todling, and D. Kleist, 2012: Development of a 4DVAR Version of GSI at NCEP. *presentation at 16th Symposium on IOAS-AOLS. January 2012, New Orleans, LA*.
- Rawlins, F., S. P. Ballard, K. J. Bovis, A. M. Clayton, D. Li, G. W. Inverarity, A. C. Lorenc, and T. J. Payne, 2007: The Met Office global four-dimensional variational data assimilation scheme. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **133**, 347–362.
- Raynaud, L., L. Berre, and G. Desroziers, 2011: An extended specification of flow-dependent background error variances in the Météo-France global 4D-Var system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 607–619.
- Raynaud, L., L. Berre, and G. Desroziers, 2012: Accounting for model error in the Météo-France ensemble data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **138**, 249–262.
- Reich, H., A. Rhodin, and C. Schraff, 2011: LETKF for the nonhydrostatic regional model COSMO-DE. *Consortium for Small-Scale Modelling (COSMO) News Letter*, **11**, 27–31.
- Rogers, E., G. DiMego, T. Black, M. Ek, B. Ferrier, G. Gayno, Z. Janjic, Y. Lin, M. Pyle, V. Wong, W.-S. Wu, and J. Carley, 2009: The NCEP North American Mesoscale Modeling System: Recent Changes and Future Plans. *presentation at 23rd Conference on Weather Analysis and Forecasting/19th Conference on Numerical Weather Prediction. June 2009, Omaha, NE*.
- Schraff, C., 1996: Data assimilation and mesoscale weather prediction: A study with a forecast model for the Alpine region. Publication No. 56, Swiss Meteorological Institute, Zürich, Switzerland.
- Schraff, C., 1997: Mesoscale data assimilation and prediction of low stratus in the Alpine region. *Meteor. Atmos. Phys.*, **64**, 21–50.
- Schraff, C., 2012a: Status of KENDA, plans on DA at DWD. *presentation at COSMO General Meeting, September 2012, Lugano, Switzerland*.
- Schraff, C., 2012b: Status Overview on PP KENDA: Km-scale ENsemble-based Data Assimilation. *presentation at COSMO General Meeting, September 2012, Lugano, Switzerland*.
- Schraff, C., 2013: Status Report PP KENDA. *presentation at COSMO General Meeting, September 2013, Sibiu, Romania*.
- Schraff, C. and R. Hess, 2012: A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO-Model, Part III: Data Assimilation. *Core documentation of the COSMO-model*, 99 pp., URL <http://www.cosmo-model.org/>.
- Seity, Y., P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, and V. Masson, 2011: The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 976–991.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G. Duda, X. Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. NCAR TECHNICAL NOTE, 113pp.
- Skamarock, W. C. and M. L. Weisman, 2009: The Impact of Positive-Definite Moisture Transport on NWP Precipitation Forecasts. *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 488–494.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, M. G. Duda, L. D. Fowler, S. H. Park, and T. D. Ringler, 2012: A Multiscale Nonhydrostatic Atmospheric Model Using Centroidal Voronoi Tessellations and C-Grid Staggering. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 3090–3105.
- Staniforth, A. and J. Thuburn, 2012: Horizontal grids for global weather and climate prediction models: a review. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **138**, 1–26.
- Stephan, K., S. Klink, and C. Schraff, 2008: Assimilation of radar-derived rain rates into the convective-scale model COSMO-DE at DWD. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **134**, 1315–1326.
- Stiller, O., 2009: Efficient moist physics schemes for data assimilation. II: Deep convection. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 721–738.
- Stiller, O. and S. P. Ballard, 2009: Efficient moist physics schemes for data assimilation. I: Large-scale clouds and condensation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 707–720.
- Sun, J., 2005: Initialization and numerical forecasting of a supercell storm observed during STEPS. *Mon.*

- Wea. Rev.*, **133**, 793–813.
- Sun, J., M. Chen, and Y. Wang, 2010: A frequent-updating analysis system based on radar, surface, and mesoscale model data for the Beijing 2008 forecast demonstration project. *Wea. Forecasting*, **25**, 1715–1735.
- Sun, J. and N. A. Crook, 1997: Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: model development and simulated data experiments. *J. Atmos. Sci.*, **54**, 1642–1661.
- Sun, J. and N. A. Crook, 1998: Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J. Atmos. Sci.*, **55**, 835–852.
- Sun, J., D. W. Flicker, and D. K. Lilly, 1991: Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated single-Doppler radar data. *J. Atmos. Sci.*, **48**, 876–890.
- Sun, J. and H. Wang, 2013: WRF-ARW Variational Storm-Scale Data Assimilation: Current Capabilities and Future Developments. *Advances in Meteorology*, **2013**, 13 pp.
- Sun, J. and Y. Zhang, 2008: Analysis and prediction of a squall line observed during IHOP using multiple WSR-88D observations. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 2364–2388.
- Tanguay, M., L. Fillion, E. Lapalme, and M. Lajoie, 2012: Four-Dimensional Variational Data Assimilation for the Canadian Regional Deterministic Prediction System. *Mon. Wea. Rev.*, **140**, 1517–1538.
- Thuburn, J., T.D. Ringler, W.C. Skamarock, and J.B. Klemp, 2009: Numerical representation of geostrophic modes on arbitrarily structured C-grids. *J. Comp. Phys.*, **228**, 8321–8335.
- Trémolet, Y., 2013: Towards a Longer Assimilation Window in the IFS 4D-Var. *presentation at 6th WMO Symposium on Data Assimilation. October 2013, University of Maryland, College Park, MD.*
- Veersé, F. and J.-N. Thépaut, 1998: Multiple-truncation incremental approach for four-dimensional variational data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **124**, 1889–1908.
- Wang, X., D. M. Barker, C. Snyder, and T. M. Hamill, 2008a: A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: Observing system simulation experiment. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 5116–5131.
- Wang, X., D. M. Barker, C. Snyder, and T. M. Hamill, 2008b: A Hybrid ETKF-3DVAR Data Assimilation Scheme for the WRF Model. Part II: Real Observation Experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 5132–5147.
- Wang, X., C. H. Bishop, and S. J. Julier, 2004: Which is better, an ensemble of positive-negative pairs or a centered spherical simplex ensemble? *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 1590–1605.
- Wang, X., T. Lei, J. Whitaker, and D. Kleist, 2013a: Recent development and research on GSI based hybrid ensemble-variational data assimilation system for GFS. *presentation at 17th Conf. on IOAS-AOLS. January 2013, Austin, TX.*
- Wang, X., D. Parrish, D. Kleist, and J. Whitaker, 2013b: GSI 3DVar-Based Ensemble-Variational Hybrid Data Assimilation for NCEP Global Forecast System: Single-Resolution Experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 4098–4117.
- Wedi, N. P., M. Hamrud, and G. Mozdzyński, 2013: A Fast Spherical Harmonics Transform for Global NWP and Climate Models. *Mon. Wea. Rev.*, **141**, 3450–3461.
- Weygandt, S. S., S. G. Benjamin, T. G. Smirnova, and J. M. Brown, 2008: Assimilation of radar reflectivity using a diabatic digital filter within the Rapid Update Cycle. *Preprints, 12th Conf. on IOAS-AOLS. January 2008, New Orleans, LA.*, 11 pp.
- Wicker, L. J. and W. C. Skamarock, 2002: Time-Splitting Methods for Elastic Models Using Forward Time Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2088–2097.
- Yang, X., 2002: Physical adjoint in HIRLAM 4DVAR. *HIRLAM Workshop on Variational Data Assimilation and Remote Sensing, January 2002, FMI, Helsinki, Finland.*, URL <http://hirlam.org/>.
- Yessad, K., 2013: Basics About ARPEGE/IFS, ALADIN and AROME in the Cycle 40 of ARPEGE/IFS. Météo France, 63 pp.
- Zerroukat, M., N. Wood, and A. Staniforth, 2004: SLICE-S: A Semi-Lagrangian Inherently Conserving and Efficient scheme for transport problems on the Sphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **130**, 2649–2664.
- Zhang, X., X.-Y. Huang, and N. Pan, 2013: Development of the Upgraded Tangent Linear and Adjoint of the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **30**, 1180–1188.

## 1.4 asuca の開発理念<sup>1</sup>

### 1.4.1 はじめに

第 1.1 節で述べた通り、asuca の開発においては、現業数値予報モデルとして必要な計算安定性と精度を確保しつつ、計算機能力の向上から将来考えられる全球モデルと領域モデルの力学コアの統合、また、データ同化手法の発展により必要性を増した予報・非線形・接線形・随伴モデルの統一的な開発を行うことを目指している。既に述べた通り、asuca の開発は 2007 年に開始された。そのきっかけとして、第 9 世代のスーパーコンピュータ導入の検討に際して、特に局地数値予報システムにおける JMA-NHM の計算効率が懸念されたことである。超並列計算においては、並列計算効率が低いといくらプロセッサ数を増やしても実行速度が頭打ちになる。現業数値予報においては定められた時間内に計算を終える必要があることから、低い並列計算効率は致命的である。特に並列計算効率を左右するのは力学コアであり、力学コアの改良には時間がかかることから早急な対応が必要であった。

一方、JMA-NHM は長年の改良が続けられており、当面の現業数値予報システムを支える数値予報モデルとしては十分な性能を有している。しかし、上に述べた目標を達成するためには抜本的な対策が必要であった。特に、開発効率をあげるためには現在及び将来の数値予報モデルとして必要な機能を残し、不要な機能は削除するなどの精査が重要である。現業数値予報システムの開発と並行して数値予報モデルを順次更新する必要性から、JMA-NHM の改良すべき点は改良し、引き継ぐべき点は引き継いでいくことを念頭に開発を進める必要があった。

このような目標を達成するための方法として、既存の JMA-NHM のコードを変更する方法と新たに一からコードを書き起こす方法の 2 種類が考えられる。前者であれば、変更しない部分（例えば、物理過程等）についてはそのまま利用できるメリットがある（ただし、その場合でもリファクタリング<sup>2</sup>が必要）一方で、既存のユーザーの利用に影響を与えないように注意する必要がある。後者の場合はメリット・デメリットは正反対となり、JMA-NHM から必要なものを移植する必要がある一方で、既存の利用形態に囚われずに開発することが可能となる。asuca の構築にあたっては、後述の通り、最適化を行うためにスキームの見直しやコーディングの見直しといった大幅な変更が必要となったために、後者の方法を選択し、コードを一から開発することとした。懸案となった物理過程の移植については物理過程ライブラリの成果もあり、順調に開発を進められている。

<sup>1</sup> 石田 純一、藤田 匡

<sup>2</sup> プログラムの動作を変えずにソースコードの中身を整理すること。

本節では、具体的に asuca, asuca-Var, asuca-Global の開発において念頭においている開発理念について述べる。第 1.4.2 項では、力学コアの改良における開発理念を、当面の目標である局地数値予報モデルとしての現業化のための計算精度と計算効率の両立だけでなく、将来的な領域モデルと全球モデルの力学コアの統合も含めて示す。第 1.4.3 項では asuca-Var の開発理念を示す。asuca-Var の当面の目標は JNoVA 3D-Var の置き換えであるが、4D-Var やアンサンブルデータ同化も念頭においており、これらを俯瞰したシステム構成を示す。第 1.4.4 項では、今後の計算機の発展を念頭においた最適化について述べる。計算効率を損なわないスキームを導入するといったアルゴリズムレベルの最適化から、コードの実装方法にいたるまでの基本的概念について述べる。第 1.4.5 項ではコードの整理についての開発理念を示す。第 1.4.6 項では開発管理の実例について述べる。開発工程管理の必要性は以前から認識しており、asuca の開発と並行して検討を行ってきた。ここでは、その現状と今後の見通しを述べる。

### 1.4.2 力学コアの改良-方程式系及び離散化手法の改良-

JMA-NHM と asuca の力学コアの諸元の違いを表 1.4.1 に示す。各諸元の違いの詳細については第 2 章で述べることにし、本項では、異なるスキームを用いた理由やその狙いについて述べる。asuca の力学コアにおいては、現業数値予報モデルとして必要な保存性の向上、計算安定性の向上、計算精度と計算効率の両立、人為的な数値拡散の排除を目標としており、各項目について以下で説明する。なお、それぞれの目標に向けたスキームの選択において計算効率についても検討を行っている。

#### (1) 保存性の向上

数値予報モデルの力学コアにおいて保存性への要請は強く、特に乾燥大気の質量保存は第一に確保すべきものと考えられる。全球モデルにおいては乾燥大気の総質量が保存されるべきことは自明であり、また、長期積分においてはわずかな誤差が積み重なる恐れがあるため、質量保存については細心の注意を払う必要がある。領域モデルにおいては領域が限られており側面境界を通じて質量の流入があるため<sup>3</sup>、全球モデルほどには厳密な保存性は実用上は求められないものの、質量の誤差は気圧場の誤差につながり予測に悪影響を与えるため、意図しない誤差は避ける必要がある。また、意図しない誤差はモデル開発における誤差の特定に悪影響を及ぼすことにも注意が必要である。

2000 年代より前の非静力学モデルにおいては、密

<sup>3</sup> 領域モデルの場合は側面境界値を与える、例えば全球モデルの同領域の質量と同じにすることにより質量を調整することが可能である。しかし、例え全球総質量が保存されていたとしても局所的には誤差があり得る。

表 1.4.1 asuca と JMA-NHM の力学コアの比較。違いがある部分を太字で示している。

	asuca	JMA-NHM
支配方程式	完全圧縮非静力学方程式系 (フラックス形式)	完全圧縮非静力学方程式系 (準フラックス形式)
予報変数	$\rho u, \rho v, \rho w, \rho \theta_m, \rho, \rho q_\alpha$	$\rho u, \rho v, \rho w, \theta, p, q_\alpha$
空間離散化	有限体積法	有限差分法
時間積分法	3 段階ルンゲクッタ法 (long) 3 段階ルンゲクッタ法 (short)	リーブフロッグ法にタイムフィルタを併用 (long) 前方・後方差分法 (short)
移流	3 次精度差分を基本とする	水平に 4 次精度差分、鉛直に 2 次精度差分
単調性の確保	Koren (1993) による流束制限関数	Kato (1998) による移流補正スキーム
座標系	一般座標 または、 マップファクター+鉛直ハイブリッド	マップファクター+鉛直ハイブリッド
音波の扱い	conservative split-explicit 法 (Klemp et al. 2007)	split-explicit 法 (室井ほか 1999)
重力波の扱い	conservative split-explicit 法 (Klemp et al. 2007)	split-explicit 法 (齊藤 2003)
水物質の落下	time-split スキーム	Box-Lagrangian スキーム (Kato 1995)
人為的数値拡散	なし	4 次の線形拡散と 非線形拡散 (Nakamura 1978) の併用

度の代わりに気圧もしくはエクスター関数を予報変数とすることが主流であった。しかし、この方法では密度が予報変数でないために、連続の式で陽に密度（質量）の流入として扱うことができず、質量保存が厳密には成り立たないという問題があった。そこで、2000 年代に入って、密度を予報変数として扱う方程式系の開発が行われてきた (Klemp et al. 2007; Ooyama 2001)。このような予報変数の取り方は国外においては WRF、COSMO 等で採用されており、また、国内では NICAM (Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model) が採用している。そこで、このような世界的な情勢をふまえ、asuca も密度を予報変数とする手法を採用することとした。また、その他の物理量においては連続の式と組み合わせることによりフラックス形式の方程式を導くことができる。これは、物理量の変化量を流出・流入を表すフラックスと生成・消滅項との組み合わせで表すものであり、後述の有限体積法と組み合わせることにより、保存則を成り立たせやすくなる手法である。

また、離散化の過程でも誤差が生じる。有限差分法においてよく行われる手法として、計算領域全体の質量の総和を求め、誤差をキャンセルする補正項を追加するというものがある。計算手法として必ずしも悪いものではないが、計算領域全体の総和を求めることは並列計算効率を考えると不利になる。そこで、asuca では、有限差分法ではなく有限体積法を採用することとした。フラックス形式で書いた方程式で流出・流入量を計算することを考える。有限体積法とは領域をセルに分割し、そのセルを囲む面におけるフラックスを

計算する手法であり、各面において計算されるフラックスは、面を共有する 2 つのセルにおいて、絶対値が等しい正負の値として計算される。そのため、2 つのセルの流入と流出は等しくなり保存則が厳密に成り立つことが保証される。一方、有限差分法では流入・流出と言う概念を導入することなく時間変化率を求めることができるため、有限体積法のように簡単に保存則は成り立たない。有限差分法においても、保存則が成り立つように計算をすることは可能であるが、そのためには複雑な方法を導入する際に細心の注意を払う必要がある。一方で、各面におけるフラックスを計算する有限体積法は原理的に保存が成り立つ手法である。

## (2) 計算安定性の向上

### 3 段階ルンゲクッタ法 (Wicker and Skamarock 2002) と奇数次差分スキームに基づく移流スキーム

空間一次元で定義される物理量  $\phi$  が風速  $c$  で移流するとした場合の一次元の移流方程式 (1.4.1) 式を考える。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + c \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (1.4.1)$$

移流スキームにおいて偶数次精度の差分スキームを用いると、切断誤差が分散性を生み、奇数次精度の差分スキームを用いると、切断誤差が拡散性を生む。分散性とは波数により位相速度が異なる性質であり、このために波形が保たれず高波数成分がノイズとなって生じやすくなる。そのため、偶数次精度の差分スキームでは計算安定性を損ねやすい。そこで、計算安定性の問題を避けるためには、奇数次精度の差分スキームを用いれば良い。しかし、JMA-NHM の場合は時間積分

法にリープフロッグ法を用いているために、3次精度や5次精度の奇数次差分スキームを用いるとクーラン数によらず不安定となることが知られている (Wicker and Skamarock 2002)。そのため、JMA-NHM では偶数次差分スキームと併用する形で、高周波成分を抑えるための数値拡散 (4次の線形拡散と Nakamura (1978) による非線形拡散) を導入している。しかし、計算安定性を確保するためにどの程度の強さの数値拡散を適用すれば十分であるかは自明ではなく、経験的な手法を取らざるをえない。また、様々な高周波を制御するためのフィルタも必要となる。そこで、asuca では計算安定性の向上を目指して奇数次差分スキームを元にした移流スキームを導入する (ただし、前述の奇数次精度の移流スキームが持つ拡散性への対応は後述) ことを前提に、JMA-NHM のリープフロッグ法に代えて、Wicker and Skamarock (2002) が提唱した3段階ルンゲクッタ法を採用することとした。このスキームは3段階の計算を行うにもかかわらず、精度が2次しかないが、プログラミングが容易であり必要となるメモリが少なくすむことや、計算安定性が高くリープフロッグ法よりも長い積分時間間隔を取れるといった利点がある。移流スキームには高周波成分を抑えることができる3次精度のスキームを基に、流束制限関数を適用した Koren (1993) によるスキームを用いている。

### 水物質の落下の扱い

また、水物質の落下は鉛直移流として取り扱う。しかし、水物質の落下速度は速く、特に地表付近で層の間隔が薄くなる場合には CFL 条件により積分時間間隔が制限される。そのため、水物質の落下には特別な扱いが必要となる。JMA-NHM では水物質の落下を CFL 条件の制約を受けないようにラグランジュ的に扱っているが、水物質の鉛直分布によってはノイズが生じることもある (Kato 1995)。また、大気鉛直流による移流と水物質の落下とを別々に扱っているという問題がある。例えば、対流雲中で上昇流の大きさと形成された雨等の水物質の落下速度がほとんど釣り合っているような場合は、水物質はほぼ同じ高度に止まると考えられるが、両者を別々に取り扱っているために、上下に分離することが起こりうる。そこで、asuca では大気鉛直流による移流と水物質の落下とを統一的に扱うこととした。さらに、両者を合わせた鉛直移流については、現在のところ他の物理量と同様に Koren (1993) のスキームを用いている。

### 単調性の確保

さて、これまでに奇数次精度の差分スキームにおいては高周波成分を抑えることができることを述べたが、元の物理量の分布が急に変化するところでは偽の極値を作り出してしまふことがありうる。このことにより、数値予報モデルにおいては、水物質の質量のように下限値がゼロである予報変数に対し、分布が急に変化し

ているような場所で差分計算の結果が負の値となるおそれがある。Godunov の定理によると、(1.4.1) 式に

$$\phi_i^{n+1} = \sum_k a_k \phi_{i+k}^n \quad (1.4.2)$$

の形をした (ここでは、タイムステップを上付き添字、格子点番号を下付き添字で表す) スキームを適用した場合に、2次以上の高次精度を持ついかなるスキームでも単調性を維持できないことが分かっている。ここで、1次精度のスキームを適用して単調性を確保すれば偽の極値が生じないようにできるが、奇数次差分に伴う拡散性があまりにも強く  $\phi$  を減衰させるため実用的ではない。

この問題は以前から認識されており、解決策として、全体としては高次差分スキームを適用し、単調性が満たされなくなるような急に変化する場においては単調性を満たすように、フラックスもしくは移流項の調整を行う方法が考案されてきた。JMA-NHM においては Kato (1998) による移流補正スキームにより対策が行われている。このスキームでは、任意の高次差分スキームにより計算した移流項を用いて仮の時間積分を行って、単調性が満たされているかどうかを調べ、単調性が満たされない格子点のみ単調性を満たすように移流項の大きさを調整する、というものである。これは任意の差分スキームと組み合わせられるという長所があるが、差分スキームの計算のために必要なりしろ領域の通信と、単調性を評価するために必要なりしろ領域の通信とを2回に分ける必要が生じ、計算コストの増大につながる。また、有限差分法に基づいているために、実用上は問題がないとされているものの厳密には保存性が成り立たない問題もある。

そこで、asuca では上述の流束制限関数を適用した Koren (1993) によるスキームを用いている。これは、3次精度の差分スキームを基にして、単調性が満たされない場においてのみ局所的にフラックスの調整を行う手法である。有限体積法に基づいてセル境界のフラックスを評価する際に、周辺の間隔を参照する (そのために必要なりしろ領域の通信が必要となる)。この方法では、フラックスの局所的な調整を含めた計算を場の滑らかさの関数とし、周辺の間隔を参照して場の滑らかさを計算してフラックスを求める。これにより、フラックスの計算と調整を同時に行うことができ、Kato (1998) による移流補正スキームと比べて必要なりしろ領域の通信回数を減らすことに加えて保存性も確保できる。

### 音波・重力波の安定化

音波は非常に高速であり、また鉛直方向にも伝播することから、一般に鉛直層間隔の方が水平格子間隔より小さい現業数値予報では音波による CFL 条件の制限は非常に厳しいものとなる。また、重力波についても音波ほど厳しくないものの、積分時間間隔の制限がある。そこで、音波・重力波に関する項を安定に時間

積分するために、asuca も JMA-NHM と同様に split-explicit 法を用いている。ただし、asuca の予報変数は JMA-NHM と異なり、密度であるため、完全に同じ手法は採れない。JMA-NHM では気圧方程式と鉛直方向の運動方程式から気圧についての鉛直 1 次元楕円型方程式を導出するが、asuca の場合は、鉛直方向の運動量保存の式、温位の方程式、連続の式から鉛直風についての鉛直 1 次元楕円型方程式を導出する。時間積分法としてショートタイムステップにおいても 3 段階ルンゲクッタ法を用いている。これは計算量は増加するが、計算安定性確保の観点から必要な措置である。

重力波についても asuca、JMA-NHM 共に split-explicit 法を用いる。JMA-NHM の場合は歴史的経緯もあり、音波の安定化と重力波の安定化とを別々に行うことがソースコードの可読性を損ねる原因となっている。asuca の場合は、重力波の安定化と音波の安定化を split-explicit 法により同時に行うことから、ソースコードの可読性を高めることができています。

### (3) 計算精度と計算効率の両立

時間積分法や移流項の精度と計算効率との両立について簡単に説明する。水平微分については水平方向に参照する範囲を広げることにより、高次精度差分スキームを構築することができる。また、ルンゲクッタ法については段階数を増やすことにより高精度化が可能となる。ここで、水平方向の参照範囲を広げることのしる領域の通信量が増えることを意味し、段階数の増加は 1 タイムステップあたりの計算量の増加につながる。しかし、既に見てきた通り、物理量の分布が急に変化するような場では移流計算の精度を 1 次精度にせざるを得ない制限があり、音波・重力波に関する項のように陰解法で扱う場合には 1 次の精度しかない場合もある。さらに、物理過程まで含めた数値予報モデルとして考えると、精度を損なう要因は様々なところに存在する。このような状況を鑑み、現時点では asuca の一部のスキームのみを高次精度にすることは考えていない。予報精度への影響を見つつ、トータルとしてバランス良く精度を向上させていくことが必要である。

### (4) 人為的な数値拡散の排除

(2) で計算安定性のための数値拡散について触れたが、数値拡散については更なる問題を含んでいる。Piotrowski et al. (2009) は、地表面が熱せられて成層不安定となっているような場に対して数値粘性のみを変更した比較実験を行ったところ、孤立した対流雲が点在するような結果と対流雲が線上に組織化された結果との違いが生じたこと、及び非等方的な粘性が実際とは異なるものの自然に見える構造を生み出すことから、粘性項、サブグリッドスケールの乱流スキーム、アドホックなフィルタ、及び数値スキームが内在する拡散性について注意する必要があることを述べている。また、対流のエントレインメント/デトレインメントを

陽には表現できない分解能においては、その役割を水平拡散が補っている可能性もありうる。

asuca の開発着手の時点では、これらの状況に対する明確な認識はなかったものの、数値拡散の強さを変更することによりメソ対流系の予想に違いが生じることが経験則として知られていた。これらのパラメータは予測精度を確保するためのいわゆるチューニングパラメータとして最終的に調整することも考えられるが、計算安定性の確保のために人為的な数値拡散を用いれば、そのために予測精度を犠牲にせざるを得ないジレンマに陥る可能性が、そうでない場合に比べて高い。asuca において人為的な数値拡散を排除した動機の一つはここにある。人為的な数値拡散を用いずとも安定に計算できる力学コアを導入した上で、予測精度に関係する点は物理過程の開発として対策を考えるというアプローチである。現時点では物理過程・力学過程を含めた数値予報モデルとしての取扱いは難しい課題であるが、今後も着実に解決を図っていきたいと考えている。

### 1.4.3 データ同化システム

asuca-Var は、従来の変分法による同化システムにとどまらず、アンサンブル予報技術との結合も視野に入れた統合的なデータ同化システムと予報モデルの一体となった構築を目指している（このような、asuca に基づくデータ同化システムを以下 asuca-DA と記す）。asuca-DA の概念図（図 1.4.1）に示すように、4D-Var の開発に必要となる接線形 (TL)・随伴 (AD) モデル<sup>4</sup> は、成長の大きい誤差パターンを求めることによりアンサンブル予報の初期摂動を生成する SV 法（特異ベクトル法）にも応用できる<sup>5</sup>。また、アンサンブル予報から評価される流れに依存した誤差を、従来の気候学的な背景誤差に加えて、3D-Var、4D-Var の背景誤差に組み込む技術として、制御変数の拡張による背景誤差のハイブリッド化が確立してきている（第 3.1.10 項 (2) で、asuca-Var におけるハイブリッド変分法データ同化の取り組みについて述べる）。さらに、アンサンブル摂動を時間発展も含めて利用し背景誤差の時間相関を評価することで、接線形・随伴モデルの開発を必要としない、変分法による同化技術として EnVar (Liu et al. 2008, 2009; Buehner et al. 2010a,b) が挙げられる。EnKF (Ensemble Kalman Filter; 三好 (2006) などを参照) は EnVar と同様アンサンブル摂動の時間発展を直接利用するほか、解析誤差を反映してアンサンブル摂動の更新も行うアンサンブルデータ同化手法である。アンサンブルシステムと決定論的データ同化シス

<sup>4</sup> 図 1.4.1 で NL は、TL/AD を構築する際、線形化の対象となる非線形モデルを示す。第 3.2 節で詳しく述べるように、もとの予報モデルに変更（簡略化・正則化）を加えたものを NL として用いることがある。

<sup>5</sup> 現在、JNoVA の TL/AD に基づくメソ特異ベクトル法によるメソアンサンブル予報の開発が進められている（小野 2010）。



る一方で、GPGPUのような新たな技術が開発される可能性がある。そのため、今後の計算機の構成等を見ると、プロセッサの演算性能の向上に通信速度の向上が追いつかないと考えられることから、通信の効率化が重要となる。また、ディスク入出力も演算性能の向上には追いつかず、効率化が重要となる。これらの動向に追随していくためにはアルゴリズムレベル・コーディングレベルでの最適化が必要となる。ここでは、asucaにおいて行った対策について概略を述べる。

### (1) アルゴリズムレベルの最適化

アルゴリズムレベルの最適化とは支配方程式や離散化手法の見直しのことを指す。これは根本的な対策であるため、効果は大きいものの、開発には大いに時間を要する。力学コア改良の概要については第 1.4.2 項で述べているため、ここでは実行効率を高めるために必要な事項とその適用方法について述べる。

JMA-NHM と asuca の並列計算においては、予報領域を水平方向 2次元に分割し、分割した領域をそれぞれメモリを共有しないプロセスが計算を担当し、隣接プロセスが担当する格子の参照のための 1 対 1 通信を基本としている。

まず、通信の効率化のために極力避けなければならないのは 1 対 1 通信以外の通信（1 対全通信や全対全通信）を必要とするようなアルゴリズムである。JMA-NHM では全対全通信を必要とするようなスキームは限られているが、質量保存のための処理で全領域での総和計算を行うような場合は問題となる。これを回避するための対応は既に述べた通りである。また、音波と重力波の安定化に split-explicit 法を用いていることは既に述べた。これらの安定化の別の手法に semi-implicit 法があるものの、大規模な連立方程式を解く必要があり、1 対 1 通信以外の通信を用いずに連立方程式を解くことは困難である。このような並列計算に不向きと考えられる手法は、開発初期の設計段階から利用しないようにしている。

次に、隣接プロセス間の通信もなるべく減らすべきである。移流項の計算等においては全てのプロセスが隣接プロセスとの通信を行うために、ある程度並列に通信を行うことができる可能性があるが、ネットワークポロジ<sup>6</sup>にも依存するため、並列通信を行うことでどの程度の効率が出るかは未知である。これが、移流の計算に複数回の隣接プロセス間の通信を行う移流補正スキームを用いずに 1 回の隣接プロセス間の通信で移流計算を行える Koren (1993) を用いた主要な理由である。また、数値拡散も隣接通信を行う必要があることから、これらを用いないことは将来考えられる計算機への対策も兼ねていることになる。

<sup>6</sup> ネットワークの接続形態のこと。ここでは、スーパーコンピュータ内の複数のプロセッサがどのように接続されているかを意味する。

物理過程については、当面の現業モデルの解像度では鉛直 1 次元で十分であることから、鉛直 1 次元の実装としている。今後、鉛直 1 次元でない物理過程の導入を考える場合は検討が必要となるだろう。

また、一般座標における重力の扱いに注意が必要である。一般座標を用いているために鉛直座標も自由に取ることができる。しかし、現時点では鉛直軸は重力加速度と平行としているために重力加速度項は鉛直方向の運動量保存の式にしか存在せず、それを前提に split-explicit 法を組み立てており、プロセス間通信は必要としない。ただし、今後、さらに高解像度化して急峻な地形を取り扱う際に、地形に沿う座標と鉛直座標がより非直交となるような場合は、検討が必要になってくる可能性がある。

データ同化についても計算効率を意識した様々なアルゴリズムの最適化を行っている。第 3.1.9 項で詳しく述べるように、背景誤差計算で水平方向にリカーンブフィルタを実行する際、必要となる隣接プロセス間通信の通信量を最小限に抑える対策を行っている。また、観測演算子についても各観測に関する計算の独立性を高めることにより並列計算を可能としている。極小値探索では、門脇 (2009) の実装による並列化を導入した。これによって、探索空間でのベクトル内積計算への寄与は、予報モデル asuca の並列化構造に合わせて各プロセスに割り当てられた領域ごとに並列に評価される。

### (2) コーディングレベルの最適化

コーディングレベルの最適化としては JMA-NHM と比較して 3 次元変数の添字の用い方の違いが大きい。数値予報モデルの場合は、比較的 horizontal 方向に処理の依存性は少なく、鉛直方向には処理の依存性があることが多い（例えば、物理過程はその例である）。また、horizontal 方向の格子数と鉛直方向の層数を比べると領域分割を行う前の予報領域全体では一般に horizontal 方向の格子数の方が多い。JMA-NHM では 3 次元変数は  $X(i, j, k)$  のように用いて、第 1, 2 添字を horizontal 方向の格子インデックスに、第 3 添字を鉛直方向の層のインデックスに割り当てていた。これは、例えばベクトル計算機を考えた場合にはもっとも内側のループでベクトル演算が適用されるために、格子数が多い horizontal 方向を表す添字を内側にし、数が少ない鉛直方向を表す添字を外側にすることが一番効率が高いためである。一方、昨今のスカラ計算機ではなるべく外側で並列化を適用することが望ましい。これは、並列化を行う場合にスレッドを生成するための時間が必要となり、この時間をなるべく少なくするためである。しかし、鉛直方向に依存性がある場合、鉛直方向を表す添字が外側にあると並列化を適用できない。また、物理過程のように鉛直 1 次元で複雑な計算を行う場合に、鉛直方向のループが一番内側にあると、変数がキャッシュに載りやすく、効率

的になると考えられる。以上の理由から、asucaにおいては、3次元変数を $X(k,i,j)$ のようにしている。

なお、水平方向にも鉛直方向にも依存性がない計算（例えば雲物理過程）において鉛直方向のループを最内側とするとループ長が短いために計算効率を損ねる懸念がある。昔ながらのベクトル計算機こそ近年では少数派となっているが、SIMD<sup>7</sup>命令によるベクトル演算が行われている<sup>8</sup>。これに対しては、予報領域全体の格子数ではなく領域分割したそれぞれの領域での格子数を考慮する必要がある。例えば、現在の現業局地数値予報モデルの格子数は水平方向を先に書く伝統的記法に従えば $1581 \times 1301 \times 60$ であり、これを現在のスーパーコンピュータの800プロセスで計算する場合、各プロセスが担当する水平方向の格子数はおよそ $(1581 \times 1301) \div 800 \approx 2570$ 格子となる。ここで、のりしろ領域の通信量を最適化するためにほぼ正方形の領域を設定するとすれば、水平方向の一辺の格子数は約50格子となり、鉛直方向の層数と逆転すら起こりうる。今後の鉛直・水平分解能の増強と計算機アーキテクチャの動向に左右される部分があるが、鉛直方向のループを最内側にするることによる不利はあまり生じないだろうと推測している。また、水平方向には依存性がなく鉛直方向には依存性があるような計算（例えば境界層過程）においては、最内側ループでの最適化ができない。これは計算機効率の観点からは不利な点であるが、前述の通り変数がキャッシュに載ることによる有利さも考えられる。また、例えば、積雲対流スキームで成層が不安定なカラムだけ演算を行い、安定なカラムでは演算しないというような場合、ベクトル計算機やSIMD命令によるベクトル演算では、マスク処理が行われることがある。マスク処理とは、ループの中に条件分岐がある場合に、条件が真の場合と偽の場合との両方の演算を行い、結果を格納する際に条件分岐に従う方法である。この場合、本来は演算をしないカラムにおいても演算だけ行って結果を捨てることとなり、見掛け上の計算効率が上がっても実際の計算時間が短縮されないこともありうる。コーディングが複雑になることにより開発効率が下がるという別のデメリットも考慮すると、asucaで採用した鉛直方向の添字とループを最内側にすることは、全体としてはそれほど不利にはならないと考えている。

データ同化の観点では、現在現業で同化している観測データの観測演算子において、観測相当量の診断は、観測点を囲む格子点（局所的な観測の場合）または観測点を囲む鉛直カラム（可降水量のような鉛直積算値、輝度温度のような放射伝達計算などの場合）を参照して行われ、また、各観測に関する計算は独立に処理さ

れる（詳細については第3.1.9項を参照のこと）。従って、観測演算子は鉛直カラム単位のデータ参照を基本としているため、第1添字を鉛直方向にとる配置において参照メモリ域は自然に局所的になり、スカラー計算機で想定される大規模並列計算に適応しやすい実装となっている。

#### 1.4.5 コードの整理

##### (1) オプションの整理

JMA-NHMは1999年より気象庁数値予報課及び気象研究所の統一モデルとして構築されている。その源流は1980年代より気象研究所で開発されてきたモデルであり、非常に長い歴史を有しているが故に、多数のオプションを備えている。これは非常に多くの開発者が関わり、その時々で最適なスキームを追求するべく様々な試行錯誤が行われたことの積み重ねである。これらの中には現時点でも有効なものもあれば、その使命を終えたものもある。JMA-NHMは現業利用のみならず研究でも利用されているが、特に力学コアの多くのオプションについては現時点で最良と考えられる設定が現業及び研究で用いられていると考えられる。新規に開発を行う度に、それらのオプションに対して動作保証をする必要があるため、オプションの数が増えるほど、その組み合わせは爆発的に増大し、動作確認に非常に大きな手間を要する事態となる。特に、asuca、asuca-Varでは、予報モデルとデータ同化システムの一体化した開発を目指していることから、多数の使用されないオプションが存在する状況で、接線形・随伴モデルも合わせて動作の保証を維持していくことは困難である。同化システムが予報モデルに追従している部分と未対応の部分が混在する状況となると、予報モデルと同化システムの乖離も発生しやすくなり、その後の開発効率への影響も大きい。このため、その使命を終えたスキームは順次削除することが必要となる。

また、第1.4.6項でも述べるが、バージョン管理システムの利用といった新たな開発環境を活用することも必要である。オプションを持つことの動機に、長期間にわたって開発が必要となる課題に対して、開発開始時点と完了時点とで本体のソースコードがあまりにも異なるために、開発成果を取り込めないことを避ける、使命を終えたと考えていたスキームが後に必要性が見直されて必要となる場合に備える、といったことが挙げられる。しかし、このような事態への対策として、開発管理支援ツールの活用が有効であり、このような動機に対してオプションを持つことの利点は薄れている。オプションを増やすことは、上記への対策という利点よりも開発コストの増加という損失の方が大きいであろう。

意識的にコードの整理を行わなければ、開発が進んでいくにつれて、オプションが増える方向に進むことはやむを得ない面がある。不要なオプションの整理や

<sup>7</sup> Single Instruction Multiple Data の略。1つの命令を複数のデータに適用すること。

<sup>8</sup> 現在のスーパーコンピュータ SR16000M1でもSIMD命令は利用可能である。

ソースコードの整理は一見すると短期的には利益を生み出さないように見える。しかしながら、複雑なソースコードを放置しておく、いずれは全体の開発の停滞をもたらすこととなる。常に、最新の知見を取り入れて大胆にスクラップアンドビルトを行い、永続的に開発が可能な状態に保つ必要があると考えている。

## (2) データ同化システムへの拡張の実装

asuca-Var は、開発が先行して行われている予報モデル asuca のシステムに基づき、asuca と共通の処理を行う部分を共有しつつ、変分法データ同化に固有の機能を拡充する形で開発を進めている（詳細については第 3.1.2 項を参照のこと）。システムの拡張にあたっては、今後のさらなる開発の効率性を意識して整理された設計を検討しつつ、コードの実装に様々な工夫がなされている。各ソースファイルは機能に応じて解析コア、観測演算子それぞれに対応するディレクトリに配置され、予報モデルのものと合わせて管理される。また、コーディング上も、各サブルーチンは機能別に分類されてモジュールの階層構造内に配置され、各部分の独立性を高めて、維持管理、機能拡張がしやすい設計となっている。例えば観測演算子では、観測要素ごとにインターフェイスが整備され、関連する処理のサブルーチン群は、そのモジュール階層の下に置かれる。このようにして、ある観測要素に関する開発では、当該部分に閉じた作業が可能となる。また、予報方程式での時間変化率の評価部分をサブルーチン化しており、データ同化、予報モデルいずれにおいても、必要に応じてこのサブルーチンを時間推進演算子として柔軟に呼び出せる仕様としている。

接線形・随伴コードの実装についても予報モデル、物理過程ライブラリのルーチンを含めて仕様が統一されている（詳細については第 3.2 節を参照のこと）。具体的には、同一ソースファイル内に、通常非線形コードが記述されたサブルーチンに加えて、線形化の対象となる非線形コード<sup>9</sup>・接線形コード・随伴コードが記述されたサブルーチンを新たに実装する。この新たなサブルーチンでは、非線形・接線形・随伴計算を実行の際にスイッチで切り分ける形の実装にしている。このようにして、予報モデルの更新に合わせて接線形・随伴コードの更新も行い、できる限り同期を保つことを意識するための設計としている。

### 1.4.6 開発管理の強化

開発管理の重要性については室井 (2013) にも説明がある。asuca においてもそこで述べられている要件の一部は開発の比較的当初から取り入れており、また途中からも適宜取り込むことにより開発管理の改善を図っている。重複する事項も多いが、asuca のこれまでの

取り組み及び今後の管理の方向性について述べる。

## (1) ドキュメントの作成

開発にあたっては、定式化・離散化をきちんと行った上でドキュメントを作成し、その後コードに反映させていくことが必要である。特に力学コアについては定式化・離散化さえ済んでいれば、コード作成はほとんど時間を要さない。しかし、例えば計算安定性のチェックにおいては多数の実験を行う必要がある、問題が発見されればそこから見直しを行う必要がある。見直しに際しては、ドキュメントとコードを比較して差異が無いかを確認し、差異が無ければ、定式化もしくは離散化の誤りと考えてドキュメントを見直していくことになる。コードのみを頼りに元の定式化・離散化に遡ることはおよそ不可能であるため、ドキュメントにないスキームは事実上開発が不可能となる。ドキュメントを作成する作業は自らの考えをチェックするきっかけであると同時に、他者にチェックをしてもらうことを通じて、ドキュメント自体とコードの両方の完成度をより高めることにつながることも期待される。

刊行物として asuca のドキュメントを作成するのは本報告が初めてであるが、大部分については開発者のドキュメントに記載されている内容を大いに利用した。

## (2) バージョン管理ツールの利用

開発当初は開発者が限られていたこともあり、特別なバージョン管理ツールは用いていなかったが、2008 年 6 月より Subversion<sup>10</sup> というツールの利用を開始した。Subversion の利用において、開発の本流として開発が完了した成果のみを取り込むトランクと、そこから分岐して各開発者が自由にコードの変更を行えるブランチと分けるようにした。そして、当初は後述のチケットに応じた開発用のブランチを作成し、開発が完了するとトランクに取り込む（マージする）手法としていた。その後、2010 年 12 月に後述のレビューを行うこととし、それが済んだコードを管理者がトランクにマージする方式に改善している。asuca に限らず、バージョン管理ツールを用いた開発管理手法は概ね確立しており、今後もこの取り組みを継続していく計画である。

## (3) プロジェクト管理ツールの利用

プロジェクト管理ツールの重要性についても室井 (2013) で既に触れられているので多くは述べない。asuca では 2009 年 1 月より Trac<sup>11</sup> というツールを用いたプロジェクト管理を開始した。当時は各種ある開発プロジェクトにおいて、それぞれの開発者が考える必要性に応じて個別のツールが利用されていた<sup>12</sup>。その後、2012 年度に「数値予報モデル開発管理情報共

<sup>10</sup> <http://subversion.apache.org/>

<sup>11</sup> <http://trac.edgewall.org/>

<sup>12</sup> 例えば、数値予報課プログラム班は「影舞 (<http://www.daifukuya.com/kagemai/>)」の利用を 2005 年に始めている。

<sup>9</sup> 第 3.2 節に詳しく述べるように、線形近似による精度低下が著しい場合など、線形化を適用する前に非線形コードに変更が必要となることがある。

有装置」を用いて全庁的に統一されたプロジェクト管理手法の導入が行われることとなり、そこで利用される Redmine<sup>13</sup> というツールへの移行を 2013 年に行っている。

いずれの管理システムにおいても、開発すべき事項をチケットという個票として記録し、関連する事項はチケットに記録として残していく。チケットに関連付けたブランチを作成してそれぞれの開発作業を行う方法を採用している。

なお、現状のツールの利用は現在の開発規模や開発フェイズに依存している。チケットの粒度をどの程度にするかに定まった基準が無く、当面は必要に応じて臨機応変に対応せざるを得ないと考えている。いずれは開発工程の管理度合いに応じた粒度の設定（例えば、仮に 1ヶ月に 1度ミーティング等により進捗確認をすれば、1ヶ月に完了することが想定される事項を 1つのチケットにするなど）にするといった対応の検討が必要と考えている。

#### (4) レビュー

より良い開発を行っていくためにはコードのレビューは欠かせない。また、レビューにおいては様々な観点からのチェックが必要である。具体的には、開発した項目が科学的・物理的に正しいかの観点、既存の機能を損なわないかの観点、加えてコーディングが規約に沿っているかの観点からのチェック等が考えられる。asuca 開発以前の JMA-NHM においても、レビューとまではいかないものの、コードを最終的に更新する前には主に電子メールによる開発概要の報告とチェックを行っていた。しかしながら、手法が定まっていなかったことや有志による対応にならざるを得なかった面もあった。このような事情を考慮して、JMA-NHM は 2010 年 8 月に、asuca は 2010 年 12 月にそれぞれレビューシステムを取り入れて、レビューを行わないコードはトランクにマージされないこととしている。また、以前のデータ同化システム JNoVA の開発ではレビューシステムが取り入れられていなかったが、asuca-Var の開発では、予報モデル asuca と一体化したプロジェクト・バージョン管理のもと、同一のレビューシステムの枠組みの中で開発を進めている。特に接線形・随伴モデルは予報モデルの線形近似に基づいており、予報モデルと密接に関連している。予報モデル開発と連携できるこのような管理体制は、データ同化システムの継続的な高度化のためにも重要である（詳細については第 3.2 節を参照のこと）。

将来的には、英国気象局で行われているようなサイエンスレビューとシステムレビュー（原・高谷 2013）を行いたいと考えている。現時点では、開発者が限られていることもあり、深いレベルでのサイエンスレビューができていないのが実状である（レビュアーには開発

者と同程度もしくはそれ以上のスキルが必要）が、いずれはこの点を強化し、信頼性の高い開発を行える体制としたい。また、上に述べたドキュメントの作成はレビューにおいて力を発揮することから両者一体で対応を進めたい。

#### (5) データ同化システムの開発工程

先行して開発が進んでいる予報モデル asuca のシステムを効率的に拡張して変分法データ同化の機能を実装するため、asuca-Var の開発にあたって、その工程の検討を行った。現在、次のような流れで asuca-Var の開発に取り組んでいる。

##### 1. 3D-Var の開発

まず 3D-Var の整備を行う。これには変分法解析システムの最も基本的な部分である解析コアの最適化機能、観測演算子での要素変換・内挿機能の開発が必要である。これらの機能は後に 4D-Var、さらにアンサンブルとのハイブリッド手法など解析システムを拡張した際も、基本的な部分として共通して利用される部分である。

現業システムとの関連では、局地解析 (LA) で 3D-Var によるデータ同化を行っている。予報モデル asuca は、最初の現業化として LFM への導入を計画しており、asuca-Var によるデータ同化についても、予報モデルに対応した初期値作成を行うシステムとして、LA への導入を目指す。

##### 2. 力学のみの 4D-Var の開発

3D-Var の整備の後に、4D-Var の構築が課題となる。現業システムとしては、メソ解析 (MA) の更新に向けた開発となる。物理過程を含む最終的な 4D-Var 構築の前に、まず力学のみの 4D-Var の構築を目標とする。

また、この過程で、接線形モデルによる摂動の時間発展を実行する仕組みの整備も行う。非線形モデルによる摂動の時間発展と接線形モデルによる摂動の時間発展の比較を行うことで、接線形モデルによる近似が十分な精度を持っているか評価することが可能となる。これによって、後の 3. で物理過程を組み込むときに、精度向上への寄与を確認しつつ進めることができる。このように、力学の 4D-Var の開発は、物理過程を組み込む際の土台となる。

工程としては、力学の接線形・随伴コードの開発と、1. の 3D-Var 開発を並行して進める。その後、解析コアの拡張を行い、時間発展を含む力学 4D-Var の探索を実行できるようにする。

##### 3. 4D-Var への物理過程の組み込み

力学 4D-Var と、摂動時間発展の評価の機能を利用して、精度を確認しつつ物理過程の接線形・随

<sup>13</sup> <http://www.redmine.org/>

伴モデルを開発し、4D-Var に組み込むことにより高度化を図る。各物理過程は物理過程ライブラリを参照して独立に選択し予報モデルに組み込むことができるため、この開発は各物理過程で並行して行うことができる。

新たな物理過程を接線形モデルに組み込むと、非線形モデルによる摂動の時間発展をより高い精度で近似できるようになると期待される。ただし、強い非線形性への対処、計算コストなど、各過程の性質に応じて特有の課題が出てくると想定されるので、開発にあたっては、接線形モデルによる摂動の時間発展の妥当性を物理的な観点から注意深く検討する必要がある（石川・藤田 (2013) などを参照）。

将来の予報モデル、物理過程の高度化に伴い、これに対応した接線形・随伴コードの更新も継続的に行っていく必要がある。高性能の接線形・随伴モデルの効率的な開発には、当該過程の理解が必須であり、予報モデル開発と連携し知見を活かしつつデータ同化開発を進めることが重要である。このような体制に向けた取り組みとして、前述のように、予報モデル開発者による接線形・随伴モデルのレビューなども取り入れつつ、開発を進めているところである。

## 参考文献

- Buehner, M., P. L. Houtekamer, C. Charette, H. L. Mitchell, and B. He, 2010a: Intercomparison of Variational Data Assimilation and the Ensemble Kalman Filter for Global Deterministic NWP. Part I: Description and Single-Observation Experiments. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1550–1566.
- Buehner, M., P. L. Houtekamer, C. Charette, H. L. Mitchell, and B. He, 2010b: Intercomparison of Variational Data Assimilation and the Ensemble Kalman Filter for Global Deterministic NWP. Part II: One-Month Experiments with Real Observations. *Mon. Wea. Rev.*, **138**, 1567–1586.
- 原旅人, 高谷祐平, 2013: 海外数値予報センターの開発管理の例. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 195–199.
- 石川宜広, 藤田匡, 2013: 4 次元変分法の開発と物理過程の課題. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 152–187.
- 門脇隆志, 2009: 4 次元変分法の改良. 数値予報課報告・別冊第 55 号, 気象庁予報部, 6–10.
- Kato, T., 1995: A Box-Lagrangian Rain-Drop Scheme. *J. Meteor. Soc. Japan*, **73**, 241–245.
- Kato, T., 1998: Numerical simulation of the band-shaped torrential rain observed over southern Kyushu, Japan on 1 August 1993. *J. Meteor. Soc. Japan*, **76**, 97–128.
- Klemp, J. B., W. C. Skamarock, and J. Dudhia, 2007: Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations. *Mon. Wea. Rev.*, **135**, 2897–2913.
- Koren, B., 1993: A Robust Upwind Discretization Method For Advection, Diffusion And Source Terms. *CWI Technical Report NM-R 9308*, 1 – 22, URL <http://oai.cwi.nl/oai/asset/5293/05293D.pdf>.
- Liu, C., Q. Xiao, and B. Wang, 2008: An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme. Part I: Technical formulation and preliminary test. *Mon. Wea. Rev.*, **136**, 3363–3373.
- Liu, C., Q. Xiao, and B. Wang, 2009: An ensemble-based four-dimensional variational data assimilation scheme. Part II: Observing System Simulation Experiments with the Advanced Research WRF (ARW). *Mon. Wea. Rev.*, **137**, 1687–1704.
- 三好建正, 2006: アンサンブル・カルマンフィルタ～データ同化との融合～. 数値予報課報告・別冊第 52 号, 気象庁予報部, 80–99.
- 室井ちあし, 齊藤和雄, 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.
- 室井ちあし, 2013: 開発管理の必要性. 数値予報課報告・別冊第 59 号, 気象庁予報部, 192–194.
- Nakamura, H., 1978: Dynamical effects of mountains on the general circulation of the atmosphere: 1. Development of finite-difference schemes suitable for incorporating mountains. *J. Meteor. Soc. Japan*, **56**, 317–339.
- 小野耕介, 2010: メソ特異ベクトル法. 数値予報課報告・別冊第 56 号, 気象庁予報部, 93–104.
- Ooyama, K., 2001: A Dynamic and Thermodynamic Foundation for Modeling the Moist Atmosphere with Parameterized Microphysics. *J. Atmos. Sci.*, **58**, 2073–2102.
- Piotrowski, Z. P., P. K. Smolarkiewicz, S. P. Malinowski, and A. A. Wyszogrodzki, 2009: On numerical realizability of thermal convection. *J. Comput. Phys.*, **228**, 6268–6290.
- 齊藤和雄, 2003: 支配方程式. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 気象庁予報部, 16–25.
- Wicker, L. J. and W. C. Skamarock, 2002: Time-Splitting Methods for Elastic Models Using Forward Time Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 2088–2097.