

[巻頭言]

気象予測とコンピュータ

東北大学理学研究科 教授 岩崎 俊樹

今日では、コンピュータを用いた数値シミュレーションが様々な分野で利用されるようになりましたが、数値気象予測は、その草分けと言えるでしょう。ここで、コンピュータの利用という視点でその歩みを簡単に振り返ります。

第2次世界大戦後、フォン・ノイマンは、弾道計算のために開発された ENIAC を用いて気象予測実験を行うことを提案しました。1950年には気象学者のジュール・チャーニーらと協力し簡略化された順圧準地衡風系の渦度方程式の数値積分に成功しました。気象庁は、1959年に、日本の官公庁として初めて電子計算機 IBM704 を導入し、数千キロメートル四方を計算領域とする短期の数値予報業務を開始しています。もともと、当時の予報精度は、予報官が作成した予想天気図に遠く及ばず、ほとんど見向きもされなかったと言われていました。数値モデルの改善や解像度の向上により、1970年代に徐々に利用されるようになりました。

数値気象予測には観測データに基づく初期条件が必要です。観測データ量は予測すべき変数に比べて圧倒的に少なく、かつ地域的に著しく偏在しています。このため観測システムの整備が数値気象予測の大きな課題です。1970年代、計算領域を全球に広げ、予測時期間を短期予報から週間予報に延長することが世界的な目標となりました。そのためには全球観測を実施する必要があります。他方、大気のカオス的な性質(エドワード・ロレンツ、1963)のために誤差が成長するので、週間予報は不可能で全球観測は大いなる無駄だという意見もありました。議論の果てに、週間予報の有効性を調べるため、10年の準備期間の後、1979年に、衛星、船舶、ラジオゾンデなどによる壮大な1年間の全球大気の観測システム実験 (FGGE; First GARP (Global Atmospheric Research Program) Global Experiment) が実施されました。その結果、初期条件の精密化を図れば、予測可能期間は1週間より延長できることが実証され、世界各国の気象局は、中期予報(週間予報)を目指し、全球観測システムを整備し、全球数値予報モデルの性能向上に努めました。現在でも、観測データ数は数値モデルの自由度に比べて著しく少ない状況は変わりません。限られた観測データより大気の3次元構造を解析するために、予測データを第一推定値とする高度なデータ同化技術が開発されています。数値気象予測のシステムでは、時間積分のみならず、初期条件を得るためにも、膨大な計算を実施しています。

数値気象予測の開始当初は1初期時刻1回の予測計算が通例で、計算機に余裕がある限りモデルの高解像度化が図られました。しかし、1回限りの計算では、カオスの世界では、予測は確率密度関数で表すのが望ましい。このため、摂動を加えたたくさんの初期条件から数値積分を行ない、確率密度関数を直接求める、アンサンブル予報が実用化されました。現在の週間予報では、超高解像度予報1本のと、中解像度50本のアンサンブル予報を実行しています。アンサンブル予報から予測の信頼度の情報を提供しています。また、初期摂動は何でもよいわけではなく、データ同化システムで成長する誤差を抽出する必要があり、空間構造を決めることは重要な技術的課題となっています。

一般に、数値モデルの仕様は用いる計算機のアーキテクチャーに大きく依存します。数値気象予測の計算効率に関する第一の難点は、領域が球面であることでした。予測式は緯度経度座標で最もシンプルに記述できますが、東西方向の格子間隔は極付近で他地域に比べて短くなります。解像度の不均一は時間積分の効率を著しく低下させます。1970年代に、時間積分に球面調和関数展開を利用する、いわゆるスペクトル法が実用化され、実効的な解像度が全球一様となる波数切断を採用することで計算効率の向上が図られました。スペクトル法は数値計算誤差が小さく、物理量の保存性にも優れているため、ほとんどの全球モデルに採用され、球面の扱いは完了したかに見えました。しかし、スーパーコンピュータがベクトル化から超並列化に向かうと状況は変化しました。スペクトル法ではタイムステップごとにルジャンドル変換・逆変換を行います。高解像度化に伴い、ルジャンドル変換がFFTなどに較べて計算効率が悪くなることに加え、全球データの再配列に伴うメモリー間のデータ転送の問題が生じました。雲や放射、乱流の計算では鉛直一次元データを同じ処理装置に入力する必要がありますが、東西のFFTでは東西一次元データを、南北のルジャンドル変換では南北1次元データをそれぞれ同じ処理装置に入力する必要があります。数値モデルを高解像度化すると、すべての変数を同じメモリーに置くことは難しく、変換のたびにデータ転送が発生します。気象予測の場合、計算時間だけではなく転送時間も含めた経過時間を抑える必要があります。地球シミュレータではデータ転送時間の短縮を図るため、クロスバーケーブルと呼ばれる膨大な筐体間配線が装着されました。他方、将来を見越し、スペクトル法を見切り、正20面体格子や(2枚皮を張り合わせた野球ボールのような)Yin-Yang格子など、グローバルなデータ転送を必要としない全球モデルが開発されており、今でも、目が離せない研究分野となっています。

数値気象予測モデルの計算効率低下のもう一つの原因は、非断熱過程の扱いにあります。とりわけ、雲の有無に関連し、対流不安定、凝結過程、雲の放射過程等の計算にはたくさんの条件文が含まれ、高速化の大きな障害となっています。これらの条件文はベクトル化や並列化の障害となるばかりではなく、雲の有無とその種類によって計算量が増えるため、処理装置のロードバランスを著しく低下させます。非断熱加熱・冷却による温度差は大気運動の主たる駆動力であり、非断熱過程の計算精度は数値モデルの予測精度を実質的に大きく支配します。精密なモデルほど湿潤プロセスに計算時間を多く配分しています。また、非断熱過程のプログラムは流体計算などに比べて著しく冗長になり、並列化への対応なども相当の作業量となります。その結果、数値気象予測モデルは並列化効率が上がらず、計算科学の業界では厄介者扱いされる原因となっています。

東北大学のサイバーサイエンスセンターでは、ベクトル化機能を重視した機種選定を行っているため、これまで開発したソフトウェアが有効に活用され、この方面の利用者に多大な恩恵を与えています。また、今年度開始した計算ノードの占有利用は実行スケジュールの自己管理を可能とし、開発効率を大いに向上させました。特に、気象分野ではリアルタイムで定時起動ジョブを実行する場合がありますが、これまでは研究室のサーバーでしか実行できませんでしたが、ノードの占有利用によりセンターでも実行可能となり、マイコンピュータのイメージでスーパーコンピュータを利用することができるようになりました。関係者のご尽力に感謝致します。