

401:4011 (数値予報; 激しい気象現象;
危機管理; 延長予報)

2. 天気予報の将来

B. ゴールディング*

1. 数値(天気)予報の成功

数値予報は20世紀において科学が取めた大きな成功の1つである。数値予報の成功は、ロスビーが簡略化した順圧方程式を用いることで1950年代に始まったが(Platzman *et al.* 1979)、現在では極めて優れた全球大気大循環モデルを(半世紀前には想像だにできなかったであろう)地球シミュレータのような高速コンピュータで走らせている。そして現在、3日先の数値予報の精度は、(少なくとも海面気圧の分布で比較した場合)1960年代の1日先の予報の精度を上回るまでに向上した。この成功の背景には、ロスビー数が小さな大気(水平運動には地球自転の効果、鉛直運動には重力が支配的にはたらく大気)の力学に関する理論が発展してきたことがある。傾圧的に不安定な大気場においては擾乱が急激(指数関数的)に発達するので、数値予報にも限界があるのではないかと、1955年に英

国気象局の局長が懸念したこともあった(Sutton 1954)。大気循環は確かにカオス的であるが、幸いなことに、その影響は通常は1週間よりも長い時間スケールで顕在化するために、それより短い期間であれば有用な予報が可能である。

このような成功にも拘わらず、解決したとは言い難い重要な課題が未だに残されている。英国気象局は最も重要な予報変数は降水と考え、前線に伴う降水を予報できるモデル開発への取組みを1965年に始めた(Bushby and Timpson 1967)。多くの成果が挙げられたとは言え、降水の予報は未だに難しい問題である。その理由は、最も解像度の高いモデルをもってしても降水現象をきちんと表現するには不十分なためであり、また、降水現象には小さなロスビー数で有効な大気力学が適用できないためでもある。さらに、背の低い雲や霧など大気境界層内で起きる現象も、予報が難しい問題として残されている。

* 英国気象局気象研究開発部。

© 2009 日本気象学会

2. 天気予報の意義

数値予報精度の向上について議論する前に、「なぜ社会は予報精度の向上に投資しようとするのか」、「社会からの要請がどのように我々の科学に方向性を与えるのか」という問題を考えてみよう。天気予報というものは、それによって人々や組織が利益を享受したり、リスクを軽減したりするための行動を執ることができて初めて意味のあるものとなる。天気予報の最高の価値は、そうした行動によって我々の暮らしを守れることにある。

将来的には、社会は暮らしを守ることにより関心を向けるようになるであろう。例えば、いかなる形態の旅行も天候の影響を受け続けるであろうし、社会が豊かになれば気象災害による被害規模も拡大するであろう。また、水や天然エネルギー資源への社会の依存も増大していくであろうし、都市化の進行や汚染物質の排出は大気環境を変え続け、それは地域的にも全球的にも気候を変えていくことに繋がるであろう。こうした問題を抱える社会は、数時間先、明日、明後日、さらには1年以上も先の天気予報の改善を望み続けることであろう。

しかし、もし天気予報が人々の行動や生活に結びつかないものならば、社会を満足させることは不可能であろう。実際、大気現象自体が危険である場合は比較的稀である。むしろ、洪水・地滑り・建物の倒壊・倒木・路面スリップなど、大気現象は他の自然・人工環境への影響を経て社会に危険をもたらす。つまり社会が必要とするのは、大気現象によって生じ得るリスクを回避し、チャンスを活かすために必要な情報なのである。将来の天気予報では、天気そのものよりは、快適な暮らし・旅行・安全・ビジネスに対して天気が及ぼす影響がより注目されていくであろう。

3. 解像度の高い予報

今日の天気予報が社会からの要望に十分に答えきれていない要因の1つは、数値予報モデルの解像度が未だ粗いことである。数値予報を実施している世界の主要機関では、それぞれの地域における予報を10~15 kmの水平格子間隔で行なうことができる。これまでの研究から、数値モデルではその格子間隔の5倍以下の小さな現象を表現するのが難しいことが分ってきた。よって、水平格子間隔10~15 kmの数値モデルで表現できるのは水平規模が60 km以上の現象ということになる。このような解像度のモデルでは、都市別の

天気や、道路・鉄道路線沿いの天気分布、湾と岬での天気の違いまでは表現することができない。このような問題を解消すべく、各予報機関では格子間隔を1~5 kmにまで狭めた数値モデルへの移行を急いでいる(WMO 2006)。例えば、ドイツの予報機関は2.8 km、英国気象局は4 km、日本の気象庁は5 kmの格子間隔で、現業予報を既に開始しているか、その試行段階に入っているだけでなく、予報モデルのさらなる高解像度化に取り組もうとしている機関すらある。これらの数値モデルでは水平規模が20 kmかそれ以下の大気現象を解像できるようになるだろう。しかし、社会が求めているのは、特定の海水浴場や競技場、あるいは自分の会社から最寄り地下鉄の駅までの間という、もっと狭い領域の天候情報である。天気予報において、数値モデルのさらなる改善や情報提供の仕方の工夫を通じて、このような社会のニーズに応えることが今後の我々に与えられた挑戦である。

このような高解像度の数値モデルは現時点では主に診断的に利用されている。即ち、より大きな領域を扱う低解像度の数値モデルから得られる総観規模の大気の情報、高解像度モデルの側面境界条件として与えられる。その総観規模の大気運動と局所的な地形強制との相互作用こそが、より詳細な情報を予報に付加できるのである。地形強制は、地形の高度、海岸線の形状、地面粗度や土壌水分、積雪や海面水温の分布などから生じる。場合によっては、このような局地的な表現するには、新たなデータや、沿岸の海流や潮汐の効果を考慮して海面水温の変化を計算する大気海洋結合モデルの開発が必要となるであろう。地表面に対する大気応答は主に大気境界層内で起こり、それに関しては膨大な研究の蓄積がある。しかし、その多くは必ずしも定量的評価が十分でなく、定常状態を仮定した経験モデルに基づくものである。近年、自動車で走りながら、道路に沿って山から谷、森やその合間、山の北斜面から南斜面といった様々な場所で気温を測定する試みがなされた。その結果は、夜間の冷却に対する様々な要因(斜面流出、谷地形による循環の分断、局所的な風の妨げや日陰、斜面の向きなど)の影響が、どれほど考慮されて来なかったかを示すものであった。

4. 激しい大気現象の予報

災害をもたらすような激しい大気現象について、その正確な位置や強さ、その影響の規模や程度を早期に

警告することで、気象学は社会の利益に大きく貢献することができる。暴風をもたらす低気圧の予報は、近年では数値予報モデルを用いて、中緯度では極めて良く、熱帯でもある程度までできるようになった。それでもなお、低気圧の経路と強度を早い時期から正確に把握し、誤った避難勧告を出す危険性をなくすことは難しい。

雷雨など激しい対流に伴うより小規模な災害に関しては、今日の数値予報では広い領域に対する危険性を大まかに指摘する程度に留まっている(Golding 1998)。このような現象を予測する簡便な方法として、対象とする現象をレーダーで捉え、その動きを追跡する「ナウキャスト」手法が発展した。しかし、既に起こっている現象の約2~3時間先の予報にはナウキャストは有効であるが、これから発生する段階にある現象の予報にはさほど有効ではない。非線型で複雑な雷雨の発生を正確に予報する手段としては数値予報以外に考えられない。その予報に求められるのは、少なくとも2 km以下、できるなら50 mという非常に細かいモデル格子間隔と、数値モデリングと観測データの同化技術における大きな進歩である。

これまでの研究から、十分な観測データがあれば、数値モデルにおいて激しい対流のライフサイクルを再現でき、現象の発生も予報できることが確認されている。米国の研究では、激しい対流の発生期には水蒸気の収束線が重要なことが示されており(Weckwerth and Parsons 2006)、このことは境界層内での水蒸気や風の細かな観測網が必要であることを意味している。ドップラーレーダーは観測データを得るのに最も期待される情報源である。数値予報を行なうことは有用であることが示されてきたものの、こうした対流性の擾乱の発生力学に関する知見は十分とは言えない。温帯低気圧とは異なり、加速度が大きいこれらの擾乱ではロスビー数のオーダーが1以上と大きく、現象の理解、数値モデルの評価、予報の初期条件に対する束縛条件などのための理論体系が未だ十分に確立されていないのである。新しい数値モデルに理論的裏付けを与えるためのより基礎的な研究が必要である。

過去を振り返ってみて、気象学者からもっと注目されるべきであった「激しい」大気現象は大気中の化学物質である。戦時中を除けば、イギリスで最も人命を奪ったできごとは、(最新の見積りで)12,000人もの死者を出した1952年11月のロンドンのスモッグであろう(Bell *et al.* 2004)。このような出来事は煤煙の減

少によってもう再び起きないであろうが、夏季の高気圧圏内でのオゾン量の増加は同程度の被害を引き起こす危険性を孕んでいる。オゾンは自動車の排気ガスに含まれる窒素酸化物や硫黄酸化物、揮発性有機物が複雑に反応して生成される。オゾン濃度を予報するには、生成に関連する化学物質とそれらの相互作用過程を数値モデルにきちんと組み入れ、それらの物質の観測データを予報モデルに同化する必要がある。

5. 危機管理について

自然現象に起因するものであれ、人為的なものであれ、人間生活に対する脅威への対応を決める際には、脅威そのものに対する分析の他に、危機軽減への対策に必要なコストとそれによって得られるメリットの分析が求められる。危機のレベルは、それが起こる確率とそれが起きた時の影響の大きさに依存する(より一般的な言い方では損失の期待値)。激しい大気現象に関する決定論的な数値予報の有用性には限界がある。それは、(例え過去に類似した状況を経験していたとしても)その激しい現象がどの程度の確からしさで起こるかについての情報を与えられないからである。これに対して、アンサンブル予報は確率の情報を含むため、より完全な予報をもたらしてくれる可能性を持っている。予報に不確実性をもたらす得る要因としては、不十分な初期状態の情報、数値モデル内のパラメータの不確実性、数値モデルそのものの不完全性などが挙げられる(Beven 2006)。決定論的な予報と同様、アンサンブル予報も誤差の影響を受ける。また、その結果は確率分布としてしか表現されない。それでもなお、確率分布の情報の有効性がわかれば、アンサンブル予報は危機管理に際して有用な情報を与えてくれることになる。

危機の分析には、それに及ぼす影響の度合に関する情報も必要である。アンサンブル予報の場合、個々の予報メンバーから見積もられた影響の情報が必要である。場合によっては、大気モデルの予報結果を、海洋や河川など他の環境システムを表す数値モデルへの入力データとしたり、そこで得られた出力をさらに社会・経済モデルへの入力として用いたりする。このような方法を、高潮・波浪、河川流量、有害気体の拡散などへの危機管理に用いることがイギリスで検討されている。

大気予報モデルをその他の数値モデルと組み合わせる手法の実践例として、2006年に英国気象局はロンド

ンを襲う高潮被害に対する有用性を確かめた。まず、大気モデルのアンサンブル予報から求められた風と気圧の分布を入力データとして高潮モデルを走らせ、テムズ川河口における高潮の高さのアンサンブル予報値を求めた。さらに、この値を1次元の流体モデルに与え、高潮が上流にある「テムズ・バリア(ロンドンを高潮被害から守るための可動堰)」へと伝播する様子をシミュレーションした。こうしてテムズ・バリア付近での水位が求まると、その情報から堤防に関する幾つかのシナリオ(水位が堤防を越えるか、あるいは堤防が決壊するかなど)の確率が、堤防への水の負荷の関数として導かれる。このケースでは3つのシナリオが導かれた。最も可能性が高いシナリオは、決壊しないものの水位が堤防を越えるというもので、より可能性の低い残りの2つはどこかで堤防の決壊が起きるといったものであった。最後に、これらのシナリオとそれに伴う水の侵入分布を様々な浸水モデルに与え、氾濫における水位と水流速度の時間変化を影響評価に用いる情報として求めた。このテストにおける影響評価は、専門家によって標準的なアルゴリズムを用いて行われた。プロセスが複雑であるが故に不確実性の様々な要因を統合することはできなかったが、アンサンブル予報を用いながら複数のモデルを組み合わせるという方針を確立することができた。

6. より先の予報へ

社会が天気予報からどれだけの利益を享受できるか(例えば、外出の計画、災害の軽減など)は、その予報がどれだけ前に与えられるかに依存する。予報が出されるタイミング早ければ早いほど、その情報を受けて有効な行動を準備するための時間を長くとることができるが、その一方で通常は予報の不確実性も増大する。しかし、偏りのない確率分布が与えられれば、場合によってはこの不確実性にも対処することができる。THORPEX(観測システム研究・予測可能性実験計画)の目標の1つは、実用的な天気予報の期間を2週間より先まで拡張することにある。この計画の1つの焦点となるのは、複数の数値モデルに基づくアンサンブル予報TIGGE[†](THORPEX Interactive Grand Global Ensemble)である。

それより先、1ヶ月・季節の数値予報に対する関心も高まってきている。これらの予報では個々の大気現

象を対象とするのではなく、平年値に比べて統計的にどのような傾向が見られるか(例えば、平年よりも温暖か、多雨か、あるいはハリケーンの発生数は多いのか等)を対象とする。幾つかの地域についてはこのような予報の有用性が既に示されており、その多くは特定の海域の海面水温偏差に伴うものである。よって、1ヶ月・季節予報には、海洋循環や陸面過程を扱う数値モデルを大気モデルに結合して用いる必要がある。これらの結果を観測と比べてどれだけ相関が良いかを調べることは可能であるが、季節スケールの循環変動をもたらすメカニズムに関しての理解は未だ十分ではない。

これまでの観測から(例えば、Pohl and Matthews 2007)、マッデン・ジュリアン振動、エル・ニーニョ=南方振動、北大西洋振動などの変動現象が確認されてきたが、それらの発生・発達・衰退のメカニズムについては十分な説明がなされていない。それ故、これらの現象の数値モデルにおける再現の難しさの原因が、必要な大気力学過程が十分に考慮されていないためなのか、海洋との相互作用の扱いが不十分のためなのか、あるいは別の理由によるのかはわからない。しかし、そこが明らかにならないと、変動の正確な予報に必要なそれらの位相や振幅を初期場に適切に与えることができないのである。

7. 気候とその予測

気候予測に関しては私よりも的確にコメントができる方がいるはずだが、予報に関する将来の傾向という一般的な観点からならば幾つかコメントすることはできる。数値モデルの気候変動問題への適用は大きな成功を収めてきたが、その対象は放射強制力の変化に対する気候平均状態の変化という限られた問題のみである。初期の研究は全て決定論的手法であったが、最近ではアンサンブル予報の手法が適用されている(Murphy *et al.* 2004)。但し、通常のアンサンブル予報のように初期値に対する不確実性の問題としてではなく、数値モデルのパラメータの不確実性の問題として扱われてきている。各数値モデルでは現在気候を再現できるようそれぞれ異なる組合せでパラメータが設定されているが、それらを将来の気候の応答をシミュレーションするために用いるのである。この方法は、気候変動に対する数値モデルの不確実性を評価するのに有効である。

気候の自然変動、そしてそれが気候系への強制の変

[†] <http://tigge.ecmwf.int/> を参照。

化からどのような影響を受けるかについては、現在のところ余り研究がなされていない。実際、数年スケールの変動については季節スケールの変動よりもよくわかっていない。例えば、大西洋のハリケーンの発生は1950年代と現在では活発であり、その間では比較的不活発であったが、そのような変動のメカニズムについては未だ十分な説明がなされていないのである。

8. まとめ

計算機性能の急速な向上によって数値予報は現実的なものとなったが、その成功は中緯度の大気を支配する力学の厳密な解析を応用することでなされてきた。将来的には計算機性能は引続き向上するであろうし、良い天気予報に向けての社会からの投資を引き続き期待できるであろう。しかしながら、激しい大気現象の予報を成功させるためには小さなスケールの対流や境界層内の循環の理論的理解を新たにすることが必要であろう。また、より良い季節予報を出すためには、大気・海洋・陸面結合変動についての新たな理解が必要である。同時に、大気現象がいつ、どこで、どのように影響を及ぼすかという情報を社会は求めてくるであろう。これらは新しい世代の研究者にとって大きな挑戦課題である。しかし、その挑戦からもたらされる社会的利益や個人的満足度としての見返りは、ここ数十年努力を重ねてきた世代が得てきたものと同様、非常に大きなものとなるであろう。

訳：柳瀬 亘(東京大学気候システム研究センター)

参考文献

Bell, M. L., D. L. Davis and T. A. Fletcher, 2004 : A retrospective assessment of mortality from the Lon-

- don smog episode of 1952 : The role of influenza and pollution. *Environ. Health Perspect.*, **112**, 6-8.
- Beven, K. J., 2006 : A manifesto for the equifinality thesis. *J. Hydrol.*, **320**, 18-36
- Bushby, F. H. and M. S. Timpson, 1967 : A 10-level atmospheric model and frontal rain. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **93**, 1-17.
- Golding, B. W., 1998 : Nimrod : A system for generating automated very short range forecasts. *Meteor. Appl.*, **5**, 1-16.
- Murphy, J. M., D. M. H. Sexton, D. N. Barnett, G. S. Jones, M. J. Webb, M. Collins and D. A. Stainforth, 2004 : Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations. *Nature*, **430**, 768-772.
- Platzman, G. W., 1979 : The ENIAC computations of 1950—Gateway to numerical weather prediction. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **60**, 302-312.
- Pohl, B. and A. J. Matthews, 2007 : Observed changes in the lifetime and amplitude of the Madden-Julian oscillation associated with interannual ENSO sea surface temperature anomalies. *J. Climate*, **20**, 2659-2674.
- Sutton, O. G., 1954 : Presidential address to the Royal Meteorological Society : The Development of Meteorology as an exact science. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **80**, 328-338.
- WMO, 2006 : Report of the twenty-second session of the CAS/JSC WGNE. WMO CAS/JSC WGNE Rep., (22), 57 pp.
- Weckwerth, T. M. and D. B. Parsons, 2006 : Review of convection initiation and motivation for IHOP_2002. *Mon. Wea. Rev.*, **134**, 5-22.