

6. High-impact weather[†]: 今後の研究の展望

木本昌秀*

1. はじめに

天気3月号のまとめ(第19期日本学術会議大気・水圏科学研究連絡会気象学専門委員会, 2006)を読むまでもなく, 気象学界にはこれまでも増して温暖化や異常気象の変化の実態, 予測について社会や周辺研究分野からの要請が高まってきている。

自然の不思議を探求しようとする気象学会諸氏の動機に比べ, 当然ながら社会からの要請は, もっと定量的で「使える」情報を, というものである。しかし, 頻繁に起こる異常気象(頻度の少ない現象を呼ぶ異常気象の定義からすると不可思議なことであるが)がいかに起こったかの解説すらままならぬ場合が多いことを考えると, この要請に応えるのはなかなかきびしいことである。できれば, 部屋に籠ってマイフェイバリットイジョウキショウについてあだこうだと考察を馳せていたいのであるが, それではプロの沽券にかかわる。困難な要請に応え, その中で自然の不思議に対する知見を高めてゆくにはどうしたらよいだろうか?

2. 集中豪雨の短期予測

集中豪雨は被害が大きい。早期警戒のために予測精度の向上が切望される。数時間先までの短時間予測は, レーダ網の整備もあって現況の把握が的確に行えるようになった。運動学的な外挿はいまや力学的な数値予測へとスムーズに引き継がれ, 近頃では, お出かけ前の心の準備はいつも万端である。

しかし, それでも突発的な集中豪雨が人命を奪う被害は後を絶たない。人命にかかわるような強雨イベントの予測精度向上への願いは切実である。

時間雨量100 mmを超えるような短時間降水イベントの予測には, そのメカニズムが表現できる雲解像モデルの使用が前提となる。気象庁や気象研究所では, このようなモデルでの予測研究が精力的に行われ, 心強い限りである。計算機能力が進歩してきたため, 大学などの研究コミュニティでも雲解像モデルを用いたシミュレーションが盛んになってきた。個別ケースの再現実験やメカニズム解明のための数値実験, そしてそれらのためのモデル開発は今後も盛んに行われるはずなので, あまり多くを語る必要はない。

集中豪雨の短期予測, すなわち, 人命被害を伴うような強烈なイベントに対し, 数日前からウォーニングを発することができるだろうか? これはチャレンジである。

台風の進路予測は精度を高めてきているが, まだ地域的な豪雨ポテンシャルの有効情報を提供するまでにはいたっていないと思われる。初期値に種があるかないかのメソスケール現象の予測になる。広域初期水蒸気場の観測精度向上とともに, モデル物理の不確定も考慮したメソアンサンブル予報システムの構築を目指す必要がある。

また, 気象モデルが出力する降水ポテンシャルを洪水や土砂崩れポテンシャルといった防災現場で即使えるような情報に変換して提供することに腐心しなくては本来の予測価値が減ずるであろう。

気象学者は気温や降水量といった変数と戯れておれば生活していけるが, 社会はより実用的な変数として

[†] High-impact weather—顕著現象と言ってもよい—は, THORPEX(観測システム研究・予測可能性実験計画; 余田, 2005)で使われていて気に入ったので使った。ここでは, 社会的経済的に影響の大きい現象, ほどの意味で用いている。

* 東京大学気候システム研究センター。

© 2007 日本気象学会

その情報をほしがっている。どこで堤防が切れそうなのか、誰をいつ避難させればよいのか、土木や水文など周辺の専門家と膝付き合わせれば気象情報の実用情報への変換の可能性を追求してゆく必要がある。これはもちろん短期、長期、温暖化全般にわたって言えることである。

3. 2週間～1か月先の high-impact weather

一般には異常天候の予測と言ったほうがわかりやすいかもしれないが、平均気温や降水量の傾向、その変動ということだけでなく、そのような天候の中で生じる集中豪雨、異常渇水などの顕著現象のポテンシャルが理解、予測しうるかという問題提起のつもりである。

2週間より先は大気運動のカオス性によって原理的に予測不可能。以上、これでは話が終わってしまう。データ処理が早くなったせいもあってか、近年でははるか中東などから日本へ押し寄せるロスビー波束が認識され、また、運のよい場合には予測も成功している。2005年12月の大雪は北極振動の急激な符号の転換と関係していた。熱帯の対流活動と関係していたという報告もある（前田修平、渡部雅浩、私信）。しかし、多くの異常気象イベントに関係するブロッキング現象の発現予測はいまだに困難である。

このあたりは、個々の傾圧不安定波に基づく理論的なカオスの壁を越える時間スケールの大規模大気現象がある、そして、それらは予測可能なほどのシグナルを持つ、さらに、そのような大規模場はその中で起こる顕著気象の発現ポテンシャルを制御している、という一連の命題への科学的挑戦であると理解できる。どのようにそれらが可能なのか、力学的メカニズム探求という意味でも興味深いと思うがいかがか？

波束伝搬や碎波をサポートする基本場や広域対流活動の正確な把握のため、衛星を駆使した観測の充実も肝要と思うが、同時に高解像度数値モデルを駆使したアプローチが重要と考えている。ブロッキング時のような大規模気塊の切離、拡散に抗する維持といったプロセスの精確な表現には思った以上の空間解像度が必要だと感じている。

蛇足ながら、近年の超高解像度全球シミュレーションを眺めていると、やたらと長い前線が目障る。メソ α 、メソ β といった大気現象の階層構造がまだ的確に表現できていないということだと思う。解像度は計算機に合わせて高くすればすむという話でないこと

は、聴衆の中の同胞のみなさんはよくご存知のことと思う。

また、ロスビー波束の遠隔伝搬を見つけ出すことは楽しいことではあるが、波源メカニズムの同定やその予測可能性の定量的な把握がこのあたりの研究進展の鍵であると考えられる。1か月アンサンブル予報の大量データは十分に流通し、解析されているだろうか？異常天候の解説者ははたしてどこまで予測可能であったかにまで責任をもっているだろうか？

High-impact（降水）現象の予測可能性という意味では、全球モデルに雲解像モデルをネストするなどしたメソアンサンブル予報システムに挑戦する試みが出てきてもよいと思っている。

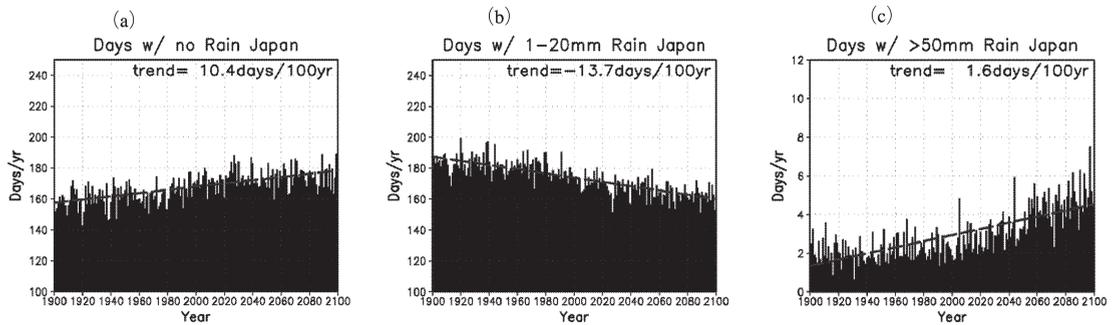
4. もっと先。温暖化時の顕著現象？

顕著現象の、どころか、普通の平均天候の長期予報すら今は大変困難な状況である。当たってもほめられず、はずれたときだけぼろくそにいわれながらも、長期再解析の遂行や力学予報をいち早く実現した気象庁の長期予報関係者には学会に勝手に成り代わって激励と御礼を申し上げる。

エルニーニョ、インド洋ダイポールや北極振動など長期予報、短期気候変動に関わる現象解明は順調に進んでおり、今後も大いに期待できる。この辺は話すと長くなるので、研究コミュニティがいよいよ本格的に予測を強く意識した研究へとステップアップするときがやってきたことのみ指摘しておきたい。大気海洋結合モデルによるデータ同化、予測の実現は、現業機関にお任せでは果たせないのではないか？

さて、温暖化である。地球シミュレータの登場により温暖化予測研究は新しいステージへ突入した。シミュレータを用いた高解像度モデルにより、東アジアや日本の天候変化について語るができるようになり、豪雨頻度の増加など極端現象の変化についても言及されるようになった。2007年に刊行される IPCC の第4次報告書に紹介されるだろう。これは大きな成果である。

しかし、これらの変化の記述はまだ定性的なもので、社会一般の定量的な温暖化対策に直接資するものではない。研究コミュニティでは、今回の成果を実質的なものにするため、以下のような項目を掲げて、間髪入れずに次のステージへ突入する必要があると感じている。



第1図 東京大学気候システム研究センター，国立環境研究所，海洋開発研究機構地球環境フロンティア研究センターの合同チームが地球シミュレータ上で開発した大気海洋結合気候モデル（MIROC）によって計算された20～21世紀日本付近の年間無降水日数（降水量1 mm/dayの日；a），弱雨日数（降水量1～20 mm/day；b），強雨日数（50 mm/day以上；c）の年間日数の時系列。（Kimoto *et al.*, 2005より）

(1) 30年先のもっと定量的な予測

高解像度モデルによる初期値問題の要素を加味した定量気候予測。顕著現象（台風，豪雨，渇水など）のポテンシャルを定量的な形で与え，適応策の具体化に資する。

(2) 炭素循環を陽に扱う地球システムモデルによる過去再現，300年先の予測

(3) 不確定性の低減

雲・エアロゾル過程のプロセス解明，物理アンサンブルなどによる。

(4) 全球雲解像温暖化実験

本来 (3)（または (1)）の一部であるが，日本が世界に先駆けて実現できる革新的な課題のため，別項目。雲のパラメタリゼーションの不確かさによるといわれる温暖化予測幅の大きさを決定的に縮めることができるかどうか？

(5) 日本モデル開発体制の確立

温暖化予測ほどの事業では相当程度のコーディネーションが必要。

これらの中で (1)，(3) や (4) が今回の話題にも密接に関係している。

しかし，問題は，「計算したらそうだった」でよいのか，ということである。今回の温暖化プロジェクトの成果の1つ，梅雨期の日本では豪雨が増える，是水蒸気量の一般的な増加と熱帯～中高緯度循環の変化により，かなり信頼度は高いと考えているが，より一般的にいわれている温暖化時の極端現象の増加について，シミュレーションしたらそうなる以上の理解はあるだろうか？

温暖化したら異常天候は増加する。これは自然のゆ

らぎに温暖化の長期傾向が重なるので，現在の頻度分布を基準にすると30年に1回以下の頻度の異常気象が増えることになる。頻度分布がシフトするという意味では，気温については確かに言える。気温の時間空間変動は比較的滑らかで，平均上昇量が自然のゆらぎに比べて認知できるレベルの大きさを持つことによる。漸増する平均値まわりの変動度も大きくなるかどうかは，気温についてははっきりせず，地域差もある。

降水量については，全球を平均したとき相対湿度の変化が小さい（Held and Soden, 2000）ことから気温上昇とともに水蒸気量が増加するので，全球平均の降水量は増加する¹⁾。これはほぼ間違いない。極端な強雨や渇水については地域差が非常に大きい，全球を平均すると，水蒸気量増加のせいで強雨頻度は増加するだろうと考えられている²⁾。降雨については変動度も増加する地域が多い。

降水は気温のように滑らかでなく，降る時と場所が著しく局在化している変数である。降雨の占める相対面積が大きく変化しないと仮定できるなら，平均量が増加すると，降る時，場所で増加せざるを得ず，降雨強度は増加することになる。

筆者はこのように説明をすることが多いが，実は，降雨強度や頻度の増加（あるいは減少）については，

¹⁾ より正確には，Allen and Ingram (2002) が議論したように，また，会場で松野先生からコメントがあったように，温室効果にバランスするための潜熱放出増加と説明すべきだろう。

²⁾ Emori and Brown (2005) はモデルによる強雨頻度の変化を水蒸気増加による効果と力学場の変化に分けているが，前者が卓越する。

次のIPCC報告書に向けた研究で, Emori and Brown (2005) のように熱力学的要因と力学要因に分けるような考察もあるものの, 気象学的原理的理解はまだ十分であるとは言えない. 計算したらそうなったでは, 気象のプロの活券に関わるというものだ. 上述した高解像度シミュレーションの問題といい, 台風発生数の変化といい(高解像モデルはまだ台風発生のメカニズムを明らかにしていない), 雲形成物理の問題といい, 温暖化問題には自然の不思議解明への例題が満載されている.

5. 実験的気象予測研究のススメ

しばらく前から筆者の脳裏をたびたびよぎる不安がある—気象庁の予測解析システムの進捗は著しい. もはや大学の研究室では手の出ないレベルに近づいている. いまはまだ, GCM だの雲モデルだのを用いたちよつとした数値実験でお茶を濁してられるが, その元になる再解析データなどはもっぱら現業機関の労によるもので, 研究コミュニティはその作成にさしたる貢献をしていない. このままでは, 高度化した現業部門と, 学生の個人努力や web 取得できるデータに依存する研究コミュニティの間に分化が進み, 後戻りできなくなるのではないか? 高度化する気象技術を支えられる人材を大学は提供できなくなるのではないか?

筆者は観測もできないし, モデル業界周辺に限った偏見であれば幸いであるが, そればかりではなさそう. いろいろと要因はあろうが, その一つはやはり研究の道具立てが大型化複雑化していることだろう. 紙と鉛筆の時代は昔, いまは大量データと数値モデルが不可欠. 小回りのきく軽いモデルも楽しいが, 重量級でなくてはアタックできぬ問題も多い.

ならば, 研究コミュニティが現業機関の使うプロの道具, データやシステムにもアクセスできるようにすればよい. 去りゆく団塊世代のみなさんに, お前たちが気象学発展の芽をつぶした, と言われないうちにも, もっと実践的な材料で研究できる環境を整える活動をすべきと考えた. さしあたり, 気象庁の生データや σ 面初期値, アンサンブル予報メンバーデータなど, 研究には有用だが一般配布にはなじまないデータを研究コミュニティが利用できるように, そしてそれらを用いて自然の不思議解明だけでなく, 予測可能性

や現業システムの進展にも役立つ研究成果を出せるように, とりあえずは大学の気象部門が合同してデータの受け口, 実験的気象予測研究コンソーシアムを構成してはどうかと考えている(余田, 2005に, より詳しい紹介あり). 極端現象のポテンシャル予測解明には, モデル依存性の少ないアンサンブルカルマンフィルタなどの開発も, 研究コミュニティの貢献できる分野だと考えている. データ同化システムが使えれば, リモートセンシングの専門家もうれしいだろう.

気象庁, 気象学会理事会にも好意的に対応していただいているので, 近々会員の方々にも参加要請ができると思う. 青臭い話だが, 自分たちのためにやることなので, 一極重点化ではなく, ほしいデータをほしい人が整備して責任を持つ, 分散体制を想定している. 多数のご協力をお願いしたい.

6. おわりに

High-impact weather, あるいは顕著現象, の予測やメカニズム解明は社会的な要請が大きいでだけでなく, 気象学的科学的にも十分に興味深い課題である. そのためには, 多少の体制整備のような実務も必要だが, 何より新しい課題に挑戦できる喜びを, 次代を担う若者たちに感じてほしい.

参 考 文 献

- Allen, M. and W. Ingram, 2002: Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle, *Nature*, **419**, 224–232.
- Emori, S. and S. J. Brown, 2005: Dynamic and thermodynamic changes in mean and extreme precipitation under changed climate, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L17706, doi:10.1029/2005GL023272.
- Held, I. M. and B. J. Soden, 2000: Water vapor feedback and global warming, *Annu. Rev. Energy Environ.*, **25**, 441–475.
- Kimoto, M., N. Yasutomi, C. Yokoyama and S. Emori, 2005: Projected changes in precipitation characteristics near Japan under the global warming, *SOLA*, **1**, 85–88, doi:10.2151/sola.2005–023.
- 余田成男, 2005: THORPEX (観測システム研究・予測可能性実験計画), 日本気象学会2005年度秋季大会シンポジウム「大規模観測プロジェクトは気象学に何をもちたらすか」要旨集, 27–32.