

地球温暖化と気象災害との関連

わか づき やす たか
 若 月 泰 孝†

人為起源の温室効果ガスの増加に伴い地球温暖化が進行している。地球温暖化は全球気候モデルに温室効果ガス排出シナリオを与えた大規模数値シミュレーションで予測されているが、高解像度の地域スケールの気候変化予測は、全球気候予測のダウンスケーリングで推定されている。これらの予測研究によって、地球温暖化によって豪雨頻度が増加することが予測された。一方で、地域スケールでの降水量予測の不確実性が非常に大きいことが示された。猛暑頻度の増加などの高温リスク、積雪水量の減少と関連する水不足のリスクも合わせて指摘される。豪雨災害に対しては、降水予測の難しさがあるものの、防災上重要な2～3時間程度先の降水予測技術の開発などが精力的に進められている。

キーワード：地球温暖化，気象災害，豪雨

1. はじめに

人為起源の温室効果ガスの増加に伴い、地球放射に対する温室効果が増強し、地球温暖化が進行している¹⁾。温室効果ガスの増加の効果は、地球表層の大気・海洋循環・陸面・雪氷圏プロセスが定式化された全球気候モデル（GCM）を用いて予測されている。GCMに温室効果ガスの排出シナリオに基づく情報を与え、数値シミュレーションを実施することにより、大気や海洋などへの気候応答が予測される。数値シミュレーションは、スーパーコンピュータを用いて大規模に実施されるものの、計算量の制限の問題は大きく、100 km程度の格子間隔での計算に限定される。

地球温暖化による昇温は対流圏全体に現れ、20世紀末と比べて21世紀末には平均的に1～5℃程度昇温すると予測されているが、その予測には大きな不確実性がある¹⁾。大気の昇温に伴い、大気中の水蒸気量が増加する。仮に温度だけ上昇する状況を仮定すると大気が乾燥化することになるが、水面からの蒸発も活発になり、結果的に相対湿度（大気中の水蒸気の含有可能量に対する実際の水蒸気量の割合）が、平均的には現在気候と変わらない程度に維持されると見積もられている。この時、クラウドジウス・クラペイロンの飽和水蒸気圧の関係から、水蒸気量は大気下層に偏って増加することになり、1度の昇温につき約7%程度水蒸気量が増加する（CC効果）。積乱雲内の上昇気流は、水蒸気の凝結による潜熱の放出によって加速さ

れ、高度10 km程度の対流圏界面付近まで成長する。よって、大気下層での水蒸気量の増加は、発生する積乱雲内の上昇気流を強化する効果をもつ。積乱雲が多数発生すると、その凝結加熱の効果で大気上層の昇温が顕著になる。上層大気の昇温は、大気を安定化させ、積乱雲の発生を抑制させる効果がある。結果的に、発生する積乱雲はより強化されるが、弱い雨の発生頻度が減少すると同時に無降水時間も長くなる。すなわち、豪雨頻度と渇水頻度が増加するなど、降水がより極端化することが予想されている。これらは、地域によっても異なる。

2. 地球温暖化予測のダウンスケーリング

粗い解像度の気候変化予測計算では、地域スケールでどのような変化が起きるのかわかることはできない。そこで、GCMによる気候変化予測シミュレーションの結果を、特定の地域のみ切り出して、細かい解像度で見積もる。これを気候予測のダウンスケーリングと呼んでいる。ダウンスケーリングには、統計的関係性だけを使った手法もあるが、昨今多く使われるのは、GCM計算結果を側面境界条件として領域気候モデル（RCM）によるシミュレーションを実施する力学的ダウンスケーリングと呼ばれる手法である。RCMは、GCM同様に、地球表層の素過程を定式化した物理モデルで、例えば、日本域などに限定して数km解像度で計算する。この程度の解像度であれば、積乱雲などの発達した雲を表現できるし、都市の効果、山岳地形の効果なども表現できる。地球温暖化によって、特定地域で雨の降り方がどのように変化する

† 茨城大学 理学部：〒310-8512 茨城県水戸市文京 2-1-1
 E-mail：ywakazki@gmail.com

か、どのように昇温するかなどをある程度精緻に見積もることが可能になる。

この高解像度の予測は、あくまで GCM による予測の高解像度化である。GCM 予測は、世界中で計算されているが、予測に大きな不確実性がある。ダウンスケーリングの結果も、地域特有の特性を組み込むことはできるが、全球予測がもつ不確実性が解消されるわけではなく、そのまま引き継いでしまう。ゆえに、天気予報の降水確率などと同じように、気候変化の確率予測を出す研究が進められている^{2), 3)}。

図 1 は、ダウンスケーリング計算結果の一例で、関東平野部の月別の降水量と気温の変化予測を示している⁴⁾。不確実性が大きい中で、GCM の気候変化予測の特徴を、主成分分析を利用して抽出して、3つのパターンでダウンスケーリングした結果である。気温については、予測される昇温量がほぼ等間隔にならび、予測の幅を出しやすい。つまり、確率情報を創出しやすいといえる。今後、例えば X℃ 昇温する確率が Y% という情報が出されることが期待される。

一方、地域スケールの降水量の変化の予測は比較的难度い。例えば、2005 年頃に国内で実施された人・地球・自然共生プロジェクトでの地球温暖化予測では、梅雨期の降水について梅雨明けが遅れ、降水量が増加するという予測が多く出された。しかし、近年の予測研究では、梅雨明けが遅れるという予測は影を潜

めている。また、様々な GCM の予測をダウンスケーリングする比較実験⁵⁾では、将来の梅雨期の降水量の予測には大きなばらつきがみられた。これは、大規模循環場のわずかな予測の違いで、地域スケールの降水分布が大きく変わってしまうことによる。ゆえに、降水量の確率的予測は比較的難しく、予測の不確実性の幅は非常に大きくなる。図 1a は、昇温が大きいほど降水量が多いという傾向を示すものの、一定間隔ではなく不規則性があることを示している。豪雨災害と関連する極端降水の気候変化も重要な指標である。図 1b は、1 時間降水量と 24 時間降水量の上位 3 位値が、いずれも増強することを示すが、昇温量に対する規則性は不明確である。

地域スケールの降水量予測については、大きな不確実性があるが、短時間降水量の強雨化傾向そのものは、ほとんどの気候予測で共通する。地球温暖化によって下層大気の水蒸気量が顕著に増加し、積乱雲がより発達しやすくなり、結果強い雨の頻度が増加するという論理的な説明と整合する。図 2 は、強度別の降水頻度とその気候変化をイメージした図である。比較的短時間の降水量は、指数分布に近い形状となる。温暖化によって弱雨頻度が減少し、無降水時間はやや増加する。また、強強度の降水頻度ほど顕著に増加し、極端降水（低頻度強雨）においては頻度が数倍になることもある。極端降水での同じ累積確率値の降水強度は 10 ～ 30 % 程度増加し（横方向の→の比較）、それは短時間降水量では CC 効果による水蒸気量の変化比に近い値となる。日降水量などの長時間降水量の変化比は CC 効果のそれとは異なる。

この他、ダウンスケーリングによる日本域の気候変化予測結果がいくつか出されているが、比較的新しく包括的にまとめられたものとして、地球温暖化予測情報第 9 巻⁶⁾が挙げられる。この予測は、RCP 8.5 と呼ばれるシナリオに基づく予測のダウンスケーリング結果を用いて書かれている。この RCP 8.5 は、想定さ

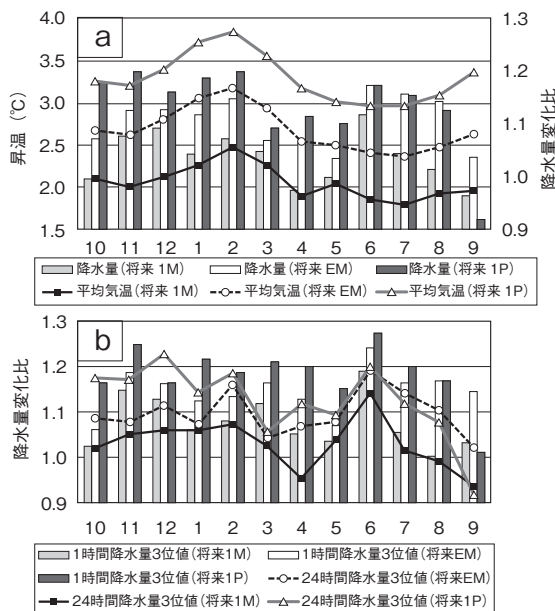


図 1 (a) RCM で計算された平均 2 m 気温の変化量（線グラフ）と降水量変化比（棒グラフ）の月別値。1P, 1M, EM は昇温の大きい場合、小さい場合、中程度の場合を表した省略記号。(b) 1 時間降水量と 24 時間降水量の 3 位値の変化比。IPCC SRES-A1B シナリオに基づく 6 km 実験解像度の結果で、関東平野部の平均。20 世紀末に対する 21 世紀末の変化の予測結果。若月ほかの報告⁴⁾より。

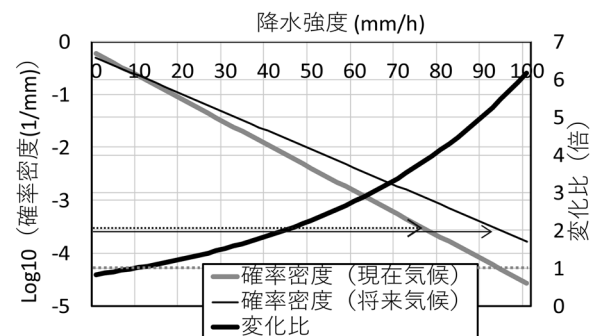


図 2 降水強度の確率密度（現在気候と将来気候）とその気候変化比（将来／現在）のイメージ図。

れているシナリオのうち最も温室効果ガスの排出が多いシナリオのため、予測される気温上昇幅が大きめであることに注意しなければならない。現在、文部科学省の受託研究「気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT)」で海洋研究開発機構を中心としたグループが、文部科学省の受託研究「統合的気候モデル高度化研究プログラム」で気象庁気象研究所を中心としたグループが、新しい日本域の気候変化予測プロダクトの作成に挑戦している。

3. 猛 暑

観測事実として、猛暑日（最高気温 35℃以上の日）などの頻度は年々増加している。降水量の気候変化の特徴と同様に、平均気温の上昇に伴い、極端高温の頻度は数倍に増加する。気象庁は、20 世紀末に比べ 21 世紀末では、猛暑日（日最高気温が 35℃以上の日）と熱帯夜（日最低気温が 25℃以上の日）の日数が全国平均でそれぞれ 20 日と 41 日程度増加すると予測した⁶⁾。国内の熱中症による死者数は年間で数百人規模である。地球温暖化と高齢化によって、その数が今後さらに増加すると予測される。

4. 積雪と水資源

地球温暖化による降水量の変化予測は大きな不確実性があるが、昇温による積雪水量の減少はそれに比べると確かなシグナルといえる。昇温によって、雪でもたらされていた降水が雨になるため積雪量が減少し、融雪速度も速まるため消雪日も数週間早まることが予測として報告されている。しかし、非常に寒い地域では、昇温しても氷点下であることに変わりなく、水蒸気量が増加することでかえって降雪量が増えることもある。また、ドカ雪として知られる豪雪が一時的に増加する地域があるなどの報告もある⁷⁾。しかし、日本国内全体の傾向として 21 世紀末に向けて積雪水量の減少傾向が顕著である。積雪水は重要な水資源である。例えば、現在は 4 月にある阿賀野川の河川水量のピーク時期が 21 世紀末には 3 月になり、流量も減るという予測がある⁸⁾。地球温暖化は強雨頻度を増加させるが、同時に、地域によっては、降水量の少ない年に水不足のリスクを考慮しなければならない。

5. 積乱雲と豪雨

降水特性は、様々な時空間スケールで多角的に論じる必要がある。強い雨は基本的に積乱雲によってもたらされる。1つの積乱雲の水平スケールは約 10 km で、数 km から十数 km の高さまで発達する。上昇気

流が生じて、水蒸気が凝結することで雲粒が生成され、水滴の併合成長などで雨粒に成長する。雨粒に成長すると、落下することができるようになり、同時に気象レーダなどで捉えられるようになる。この一連の進化の寿命は 20 ～ 60 分程度である。1 個の積乱雲でもたらされる雨は、時間雨量 20 ～ 200 mm/h 程度の強度の雨が数分から数十分降る。持続性や雨の強さは、積乱雲の構造に依存する。積乱雲内には、上昇気流のコアが存在しているが、一つの積乱雲内に上昇気流のコアが連続的に複数生成される場合は、これをマルチセル型積乱雲とよび、比較的長寿命で大型になる。

ほとんどの場合、短時間の雨では災害になるようなことはない。ただし、貯水能力の低い都市域では、内水氾濫などの水害になることがある。2008 年 8 月 5 日に東京の都市部で発生した積乱雲に伴う強雨によって、東京の雑司ヶ谷では下水道工事作業員が流されて亡くなった。同じく 2008 年 7 月 28 日に神戸の小規模な河川である都賀川で、短時間の豪雨で子供を含む 5 人が流されて亡くなった。通常は大きな被害を及ぼさない短い時間の強雨でも、集水機能のある構造物では注意する必要がある。

どの程度の雨であれば危険であるかは、場所や構造物によって異なるために、気象・気候学的立場からは一概には言えない。例えば、1 mm/h の雨でも危険かという、おそらくそのようなケースはほとんどないと想像できる。しかし、全く雨の降っていない状況から数十分で激しい雨の状況に変化することはしばしばあり、その変化の様子を事前予測することは極めて難しい。予測については第 6 章で述べる。重要な点としては、変化が激しく予測の難しい強雨に対しては、気象レーダなどの情報を常に監視して、危険性を回避するのに必要な時間との兼ね合いから、的確な判断基準をそれぞれで設定する必要があるということである。地球温暖化によって、強雨頻度は増加すると予測されている。気象レーダなどを活用した強雨監視の必要性に対する認識を、今後ますます高めなければならない。また、レーダで捉える強雨は積乱雲の進化の後半に現れる。それを考慮し、直上での強雨がない状況であっても、近傍に強雨域が散在する状況では、注意を要する。

平成 29 年 7 月九州北部豪雨、平成 27 年 9 月関東・東北豪雨、平成 26 年 8 月豪雨による広島市の土砂災害など、近年豪雨によって発生する災害の情報が頻繁に流されるようになってきた。これらは、単発の積乱雲によってもたらされているわけではない。積乱雲が断続的に発生することで、数時間から十数時間連続す

る強雨となり、しばしば土砂災害や河川の氾濫を生じる。積乱雲の連続発生による集団化には、複数のタイプがあるが、特に注意を要するのは、バックビルディングタイプと呼ばれるものである。広島豪雨や九州北部豪雨は、バックビルディングタイプの積乱雲群であった。積乱雲は主に進化の後半に下降気流を生成し、下降気流が地面にぶつかることで発散流が観測される。発散流は、周囲の環境風と風上側で収束を作り、新たな積乱雲が連鎖的に発生する。これがバックビルディングタイプの積乱雲群の生成メカニズムであり、一つの積乱雲がきっかけとなり連鎖的に集団化することから、積乱雲の自己組織化とも呼ばれる。バックビルディングタイプの積乱雲群の特徴として、帯状に強い雨の領域が分布し、それがしばしば停滞することである。この強雨域にかかっていない近傍の地域ではほとんど雨が降らないが、帯状の強雨域では、強い雨が降り続ける。広島豪雨では、広島市安佐南区に積乱雲が連続的に移動してきたことで200 mを超える降雨が観測され、複数の土砂災害が発生した。一方で、近隣の広島県呉市などではほとんど雨が降っていない。

このような積乱雲の集団化によっておこる豪雨は、20～200 km 程度のスケールで生じる。バックビルディングタイプの集団化は、梅雨期などを中心に、古くから頻繁に観測されている。近年では、北海道など線状降水帯があまり頻繁に観測されてこなかった地域で報告されており、地球温暖化による影響が含まれている可能性がある。

地球温暖化によって突風（竜巻やダウンバースト）の頻度が増加するという予測がある。竜巻やダウンバーストは発達した積乱雲によって引き起こされる。この予測については不確かな部分が多いが、積乱雲がより強化されることを考慮するとその可能性は十分ある。

6. 豪雨の予測

増加する豪雨とそれに伴う災害に対応するため、様々な対策が必要とされている。河川構造物や斜面構造物の増強などによるハード対策に加え、避難行動を促す情報伝達に重みを置いたソフト対策の強化が必要とされている。ソフト対策の一環として、予測情報の高精度化があげられる。

図3は、気象庁などの現業の降水予測の精度を、予測時間に対する変化として示した概念図である。現在の降水予測は、予測時間のレンジに応じて複数の手法を組み合わせで行われ、図3のようにレーダ画像から見積もられる移動ベクトルの時間外挿による予測

(B)と高解像度の雲解像大気モデル(CRM)シミュレーションによる予測(C)で成り立っている。CRMは、積乱雲の内部構造を含む雲や降水の物理過程を含んだ大気の物理モデルである。雲を表現するためには、1 km 程度以下の細かい解像度で計算しなければならない。

強雨をもたらす積乱雲は20～60分程度の寿命しかないので、強雨の時間変化は非常に激しい。それに対して、予測Bは降水分布形状の定常性を仮定しているため、降水の盛衰を表現できず、精度は予測時間とともに急激に低下する。一方、予測CのCRMシミュレーションは、積乱雲の盛衰なども物理的に表現可能である。CRMシミュレーションの初期値は、気象庁などが実施する気象観測から得られる大気環境情報を、前の時刻からの予測と最適条件で結合するデータ同化によって作成されている。昨今では、四次元変分法やアンサンブルカルマンフィルタなどの高度なデータ同化手法が用いられ、その予測精度は高くなっている。

しかし、予測Cにも2つの大きな問題がある。1つ目は、高度な手法では計算負荷が大きく、数十分先の直近予測(ナウキャスト)に間に合わないことである。降水時の大気の振る舞いは、その強いカオス性によって変化しやすいため、10分程度の間隔で降水予測を更新するのが望ましいが、現業ベースで運用するのは難しい。2つ目として、積乱雲の観測情報は主にレーダによって捉えられる雨の分布情報であり、雨は積乱雲の進化のステージの中盤以降に現れる。一方、積乱雲の内部構造の把握には、雨だけでなく加熱量や上昇気流などの観測も必要となるが、これは費用と技術の両面から容易ではない。計算負荷の小さい手法を用いて、降水分布情報だけでデータ同化を行うと、積乱雲の内部構造の力学的バランスが崩れてしまい、予測精度は向上しない。結果的に、現業での降水予測精度は、特に20分～3時間程度先の予測で、期待され

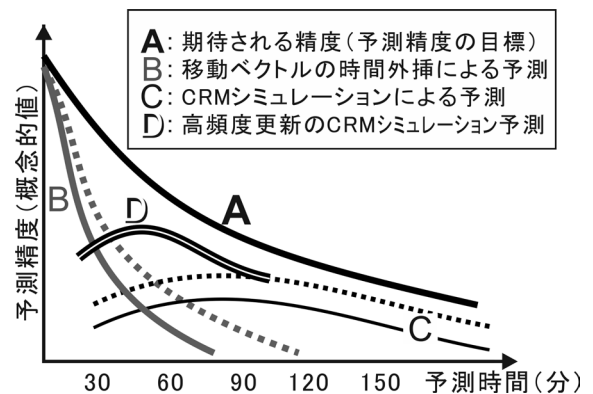


図3 降水予測精度と予報時間の概念的関係

る精度 A を十分に満たしていない。豪雨災害が起きそうな時に住民が速やかな避難行動に移せるかどうかという極めて重要な局面を左右する時間帯にもかかわらず、ここに「技術のギャップ領域」が生じている。

そこで、予測 B や予測 C の精度を図 3 の実線から点線の精度に上げるための技術開発が進められている。予測 B では、気象庁降水ナウキャストを発展させた高解像度降水ナウキャストが開発された⁹⁾。予測 B は基本的には降水の定常性に基づくが、時間変化のスキームが複数導入されている。また、予測 C では、3 時間毎に予測が出されていた 5 km 解像度の気象庁メソモデル (MSM) に加えて、1 時間毎に予測が出される 2 km 解像度の予測 (局地モデル; LFM) が出されるようになった。

さらに、20 分～3 時間先で比較的高い予測精度をカバーするために、高頻度で予測を更新する予測 D の手法も研究されている。防災科学技術研究所では、都市域などに雲や水蒸気量も計測可能な観測システムを配置し、高密度の観測データを CRM 予測の初期値作成に組み込む研究を進めている。また、情報通信研究機構 (NICT) や首都大学東京・大阪大学などの研究グループは 30 秒毎にスキャン可能なフェイズドアレイレーダを開発し、理化学研究所の研究グループはこれを降水予測に活用する研究を進めている¹⁰⁾。また、比較的容易に入手可能なレーダ情報でも CRM 予測への組み込み方を工夫することで、降水予測精度を向上させることができることが示された¹¹⁾。このように、豪雨予測は非常に難解であるものの、それを実現させる試みがなされ、徐々に成果が出されている。広島豪雨などのバックビルディング型の積乱雲群がどこでいつ発生するのか、それは長寿命か短命か、停滞性か移動性か、などを精度よく予測できるようにする努力が続いている。

参 考 文 献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2013), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by Stocker et al., 1535 pp, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., doi:10.1017/CBO9781107415324.
- 2) Wakazuki, Y., R. Rasmussen, 2015: Incremental dynamical downscaling for probabilistic analysis based on multiple GCM projections. *Geophysical Research Letters*, 42, 10,847–10,855, doi: 10.1002/2015GL066242
- 3) Ishizaki, N. N., K. Dairaku, G. Ueno, 2017: Regional probabilistic climate projection for Japan with a regression model using multi-model ensemble experiments. *Hydrological Research Letters*, 11, 44–50. doi:10.3178/hrl.11.44
- 4) 若月泰孝, 原政之, 藤田実季子, 馬場皐, 井上忠雄, 木村富士男, 小池俊雄, 2016: 気候差分ダウンスケーリング法による関東・中部山岳域の確率論的気候変化予測. 土木学会論文集 B1 (水工学), 72 (4), I_55–I_60
- 5) Kawase, H., A. Murata, R. Mizuta, H. Sasaki, M. Nosaka, and I. Takayabu, 2016: Enhancement of heavy daily snowfall in central Japan due to global warming as projected by large ensemble of regional climate simulations. *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-016-1781-3.
- 6) 気象庁, 2017: 地球温暖化予測情報第 9 巻 (IPCC の RCP8.5 シナリオを用いた非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測), 79pp, 気象庁
- 7) Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, F. Kimura, T. Yasunari, B. Ailikun, H. Ueda, T. Inoue (2009), Intermodel variability of future changes in the Baiu rainband estimated by the pseudo global warming downscaling method, *J. Geophys. Res.*, 114, D24110, doi:10.1029/2009JD011803.
- 8) Ma, X., H. Kawase, S. Adachi, M. Fujita, H. G. Takahashi, M. Hara, N. Ishizaki, T. Yoshikane, H. Hatsushika, Y. Wakazuki, and F. Kimura: 2013: Simulating river discharge in a snowy region of Japan using output from a regional climate model, *Advances in Geosciences*, 35, 55–60, doi:10.5194/adgeo-35-55-2013.
- 9) Kigawa, S., T. Hayashi, T. Nishimura, 2016: Advanced weather radar application technology at JMA. WMO/CI-MO/TECO-2016, Madrid, Spain, 27–29 September 2016
- 10) Maejima, Y., M. Kunii, T. Miyoshi, 2017: 30-second-Update 100-m-Mesh Data Assimilation Experiments: A Sudden Local Rain Case in Kobe on 11 September 2014. *SOLA*, 13, 174–180, doi:10.2151/sola.2017-032
- 11) 若月泰孝, 2015: 上流下層加湿による積雲対流の予測実験. 土木学会論文集 B1 (水工学), 71 (4), I_505–I_510