

気候変動予測データベースd4PDFと冬期道路管理への応用可能性について

雪氷チーム

1. はじめに

気候変動や地球温暖化に伴う影響は、近年ますます顕在化しつつある。例えば、2021年夏季に北海道全域で記録的な高温となったこと¹⁾は記憶に新しい。同じように、温暖化に伴って北海道における年間降雪量も減少するトレンドが発現している²⁾。一方で、現在の積雪寒冷地の中でも、短時間降雪量が温暖化によってむしろ増加する地域があることを示唆した研究もある³⁾。したがって、暴風雪に伴う交通障害や人命への影響は対処しなければならない問題として残り続けることが予想される。また、暴風雪災害に対応するために、令和3年10月に閣議決定された「気候変動適応計画」⁴⁾では、積雪寒冷地における気候変動の影響について、急速に発達する低気圧に伴う吹雪や視程障害等の変動傾向に関する調査を行うことが明記されている。このように、今後雪氷災害の激甚化や発生形態の変化が懸念される中では、例えば吹雪対策施設の設計値の検討に際して、従来使用されてきた過去の観測データに統計的に評価した将来予測値を加えるといった、新たな暴風雪災害対策への転換が求められる。本稿では、将来予測値を評価する上で有用となる気候変動予測データベースd4PDF^{5,6)}と、d4PDFを用いた冬期の道路雪氷災害の評価への応用可能性について解説する。

2. d4PDFとは

2. 1 数値気象モデルとアンサンブル予報

d4PDFは文部科学省の気候変動リスク情報創成プログラムにおいて創られ、正式名称は地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース（英語名：database for Policy Decision making for Future climate change）である。d4PDFについて説明する前に、気象予測値を計算する数値気象モデルと、気象予測におけるアンサンブルについて説明する。

我々が日常で目にする天気予報に見られるような各地域の気圧、気温、風速などの気象予測値は、数値気

象モデルで計算される。数値気象モデルでは大気の状態、および海洋や陸域の地形を細かな格子に区切って再現する。数値気象モデルの計算を始める際には、各気象要素や海洋および陸域の最初の状態を、格子点値として与える。このような格子点値を初期条件と呼ぶ。一方、数値気象モデルでは、各気象要素や海洋や陸域における境界の状態を設定する必要がある。これを境界条件と呼ぶ。境界条件は二つに分類できる。一つは地表面や海面、鉛直最上面における条件であり、例えば海面水温や地上気温、日射量などが挙げられる。もう一つは、数値気象モデルが定められた水平領域のみを計算する場合に生じる、計算領域の境界である。この場合は、各気象要素にも境界条件を設定する必要がある。続いて、大気の状態に関する物理方程式に基づいて、各格子点値に対して時間変化量を求めることで将来の気象予測値を計算する。ここでの物理方程式とは、運動方程式や熱力学の方程式、および輸送方程式などの基本方程式である。

しかし、これらの物理方程式で計算された予測値には誤差が内在する。数値気象モデルにおいて誤差が生じる要因は、主に二つ挙げられる。一つは、大気の状態を格子に分割して扱うことで誤差が発生するためである。これは、例えば実際の各地域における気温分布は、当然ながら時間、空間的に連続的に分布しているが、計算で用いる格子点上の数値として扱う際には離散的な値となることに起因する。また、格子の間隔を限りなく小さくすることで誤差は減らせるかもしれないが、計算量が増大することになり、計算機の性能による制約が発生する。もう一つの誤差発生要因は、気象の物理方程式そのものが、時間を進めるにつれて誤差を大きく発展させやすい性質を持つことである。前述の理由により発生した誤差がたとえ小さな値でも、予測を進めるにつれて大きなずれとなり、予測が外れる要因となるのである。なお、物理方程式も格子点値を算出する際の計算負荷の軽減のために近似化処理を施している場合があり、これも誤差要因となり得る。

上記の誤差を低減するために、アンサンブル予報では極わずかな値のずれ（摂動と呼ぶ）を与えて複数の

わずかに異なる初期値を作り、数値気象モデルの計算を行う。複数の予測データをあたかも合奏のように扱うことから、このような予報をアンサンブル予報と呼ぶ。アンサンブル予報の利点は、現在の大気の状態に内在する将来の大気の状態を確率論的に扱うことが可能となる点にある。例を図-1に示す。時間が進むにつれて台風の進路の分布が広がっていること、また、実際のこの台風の進路も各アンサンブルメンバ（アンサンブル予報に含まれる、一連の複数の予報データの集合）の予報の範囲内に収まっていたことが分かる。

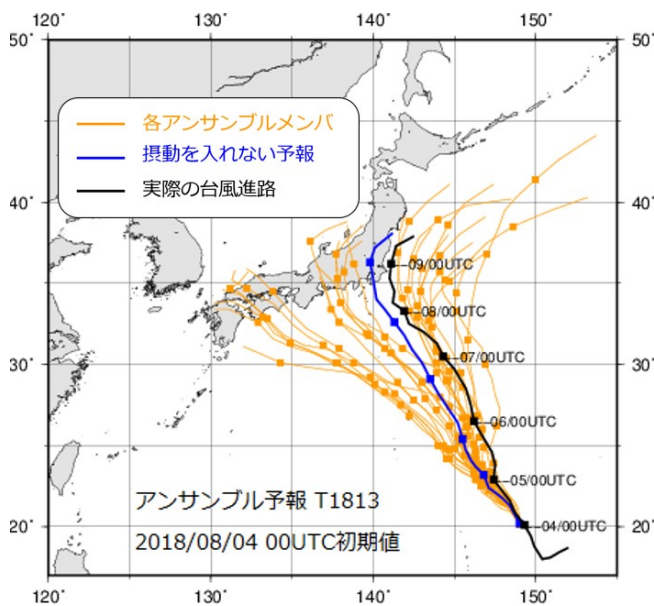


図-1 アンサンブル予報の例
気象庁ウェブサイト⁷⁾の図を改変

2. 2 d4PDFの概要

前節で示したような、数日～数週間程度の近未来の気象予測とは異なり、地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベースであるd4PDFは、半世紀以上過去に遡って気候データを集積し、遠い未来の気候を予測したデータベースである。

d4PDFには、全球実験（水平解像度60km）と、日本周辺域領域実験（水平解像度20km）が含まれる。まずは、全球実験について説明する。全球実験には、過去の気候を再現した過去実験、過去の気候から温暖化による気温上昇を除去した非温暖化実験、将来の気候を予測した1.5度上昇実験、2度上昇実験、4度上昇実験が含まれる。本稿では、非温暖化実験と1.5度上昇実験の説明は割愛し、過去実験、2度上昇実験、および4度上昇実験について説明する。

過去実験は、1951年から2010年までの60年分の気候を再現した実験である。数値気象モデルには気象研究所全球大気モデルMRI-AGCM3.2を用いて、文字通り地球全域に対して演算を行った。過去の観測データをもとにして作成された、海面水温の全球の数値データを、入力値として与えている。また、海水分布や、温室効果ガス濃度およびエアロゾルの分布など、気象の物理方程式において外部変数となる物理量も、同様に観測データをもとにした全球の数値分布を与えている。入力値のうち、海面水温データに対して100パターンの変動を与えている。この条件のもとで演算を行うと、海面水温やその他の外部強制因子に整合性が取れるように、気温、気圧などの気象要素の全球分布値が、気候再現値として得られる。アンサンブルメンバ数を考慮すると、60年×100メンバで、合計6000年分の気候再現値が得られることになる。

次に、2度上昇実験および4度上昇実験について説明する。d4PDFの将来気候予測では、将来気候シナリオとして、RCP8.5シナリオを採用した。RCP8.5シナリオとは、世界気象機関（WMO）や国連環境計画（UNEP）によって設立された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）において、温暖化対策を一切行わなかった場合の将来気候を想定したシナリオである。2度上昇実験、4度上昇実験は、産業革命（1850年）以前から地球全体の平均気温がそれぞれ2度および4度上昇した世界をシミュレーションしたものである。なお、これらの平均気温上昇幅は、RCP8.5シナリオにおいて、2040年および2090年に、それぞれ相当している。d4PDFでは、将来気候における海面水温分布や外部強制因子の分布の予測値を入力値として、全球モデルにて演算することで、将来気候の予測を行っている。d4PDFの将来気候予測における海面水温分布には、世界気候研究計画（WCRP）の気候予測モデルの比較プロジェクトである、第5次結合モデル相互比較計画（CMIP5）に貢献した、全球大気海洋結合モデルのうち、6モデルの結果を用いている。これら6モデルに対して、2度上昇実験では9種類の摂動を、4度上昇実験では15種類の摂動を、それぞれ与えている。すなわち、2度上昇実験は、 $6 \times 9 = 54$ メンバのアンサンブルデータとして扱われる。同様に4度上昇実験も、 $6 \times 15 = 90$ メンバのアンサンブルメンバとして扱われる。計算期間は、それぞれ、2度上昇実験では2031年から2090年、4度上昇実験では2051年から2110年であり、60年ずつである。ただし、計算期間内における温度上昇幅は一定に2度上昇もしくは4度上昇として、与

えられている。

更に、全球実験における出力値に対して高解像度化計算（力学的ダウンスケーリング）を施すことで、日本周辺域領域実験を行った。力学的ダウンスケーリング計算には、同じく気象研究所の領域気象モデルNHRCMを使用した。なお、計算資源節約のために、領域実験における過去実験のアンサンブルメンバは、全球実験の半数の50としている。

以上が、d4PDFの実験設定の概要である。各実験における計算期間、アンサンブルメンバ数をまとめて表-1に示す。なお、より詳細な説明は参考文献^{5,6,9)}を参考にされたい。

表-1 d4PDF各実験のまとめ

	計算期間	アンサンブルメンバ数
過去実験	1951年～2010年	100 (領域実験では50)
2度上昇実験	2031年～2090年	54
4度上昇実験	2051年～2110年	90

3. d4PDFの応用例

d4PDFは過去の極端現象に対する要因分析や将来変化の予測や影響評価といった気象学・気候学的研究のみならず、各省庁、自治体、産業界の現場での気候変動適応策策定に寄与することを想定している⁹⁾。既に河川分野¹⁰⁻¹³⁾や農業分野^{14,15)}における研究に適用実績がある。特に河川分野では設計外力の設定にd4PDFを用いた実績もある¹⁶⁾。

d4PDFを用いたアウトプットの例として、Sugawara et al. (2020)¹⁴⁾における結果を図-2に示す。この図は帯広において、夏期（7月頃から8月頃）に日最高気温が28度を超えた日数を示したものである。ただし、d4PDFの各実験にはアメダス観測データを用いてバイアス補正を施している。黒の点線は1984年から2018年までの帯広のアメダス観測データにおける平均値を示している。過去実験の頻度分布の平均が、黒の点線に近い位置にあり、d4PDF過去実験で実際の帯広の気候を再現できていたことが分かる。一方、2度上昇実験の頻度分布図と黒点線を比較すると、過去の観測平均は日数が極端に低い現象として現れたことが分かる。

また、領域実験を更に高解像度化する取り組みも行

われており、北海道周辺域に対してダウンスケーリング計算を施し、5km解像度まで高解像度化した、先駆的な研究例¹⁷⁾もある。したがって、d4PDFは今後さらに詳細な将来変化を評価できるポテンシャルを有していると言える。

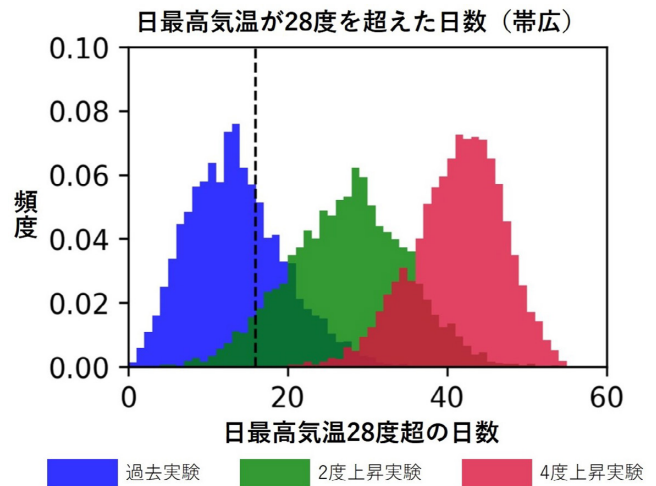


図-2 d4PDFを用いたアウトプットの例

帯広において日最高気温が28度を超えた日数の頻度分布図。青、緑、赤の頻度分布図はそれぞれ過去実験、2度上昇実験、4度上昇実験を示す。Sugawara et al. (2020)¹⁴⁾におけるFigure 6(a)を改変した。

4. 冬期道路管理へのd4PDFの応用可能性

気候変動に伴う年間累計降雪量の減少に伴って、諸外国において冬期道路管理に要する行政支出が減少する可能性を示した例^{18,19)}は存在する。しかし、これらの研究例では極端現象による被害までは考慮していない。一方で、d4PDFを用いて気候変動に伴う降雪量の将来変化傾向を評価した研究例^{20,21)}は既に存在するものの、冬期道路管理において問題となる、吹雪や吹きだまりに着目した例はほとんど存在しない。吹雪や吹きだまりは空間スケールが比較的小さい現象であるため、ダウンスケーリングを施し空間解像度を高めることで、局地的な吹雪や吹きだまりをd4PDFで再現することが可能になると考えられる。また、d4PDFの利点は大量のアンサンブルメンバを有している点である。このため、例えば再現確率降雪量の議論をする上で、d4PDFは非常に強力なツールとなる。雪氷チームでは、冬期道路管理へのd4PDFの応用可能性に関する研究を進めているところである。

(文責：菅原 邦泰)

参考文献

- 1) 札幌管区気象台：2021年6～8月 北海道地方 夏の天候、2021.
- 2) 札幌管区気象台：石狩地方の気候変動、2022.
- 3) 原田裕介、松下拓樹、松澤勝：積雪寒冷地における短期集中降雪と寒さに関する指標の将来傾向、日本雪工学会論文集、32(2)、pp.31-42、2016.
- 4) 環境省：気候変動適応計画、2021.
- 5) Mizuta, R., Murata, A., Ishii, M., Shiogama, H., Hibino, K., Mori, N., Arakawa, O., Imada, Y., Yoshida, K., Aoyagi, T., Kawase, H., Mori, M., Okada, Y., Shimura, T., Nagatomo, T., Ikeda, M., Endo, H., Nosaka, M., Arai, M., Takahashi, C., Tanaka, K., Takemi, T., Tachikawa, Y., Temur, K., Kamae, Y., Watanabe, M., Sasaki, H., Kitoh, A., Takayabu, I., Nakakita, E., Kimoto, M.: Over 5,000 years of ensemble future climate simulations by 60-km global and 20-km regional atmospheric models, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.98, pp.1383-1398, 2017.
- 6) Fujita, M., Mizuta, R., Ishii, M., Endo, H., Sato, T., Okada, Y., Kawazoe, S., Sugimoto, S., Ishihara, K., Watanabe, S.: Precipitation changes in a climate with 2-K surface warming from large ensemble simulations using 60-km global and 20-km regional atmospheric models, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.46, pp.435-442, 2019.
- 7) 気象庁ウェブサイト：アンサンブル予報
<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/whitep/1-3-8.html> (2022年8月18日閲覧)
- 8) 稲津將、佐藤友徳：1.大は小を兼ねるのか：ダウンスケージング、天気、57(4)、pp.195-199、2010.
- 9) 気候変動リスク情報創生プログラム：地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース利用手引き(抜粋)、2015.
- 10) 清水啓太、山田正、山田朋人：気候変動予測情報を用いた極値水文量の統計的推定、河川技術論文集、26、pp.19-24、2020.
- 11) Nguyen, T. T., Nakatsugawa, M., Yamada, T. J., Hoshino, T.: Assessing climate change impacts on extreme rainfall and severe flooding during the summer monsoon season in the Ishikari River basin, Japan, *Hydro. Res. Lett.*, Vol.14(4), pp.155-161, 2020.
- 12) 松本知士、池田典之、河田暢亮、山田朋人、中津川誠、中北英一：d4PDFを活用した発電専用ダムによる洪水被害軽減運用手法の効果検証、河川技術論文集、27巻、pp.637-642、2021.
- 13) 星野剛、山田朋人、柿沼孝治：気候変動を踏まえた水管理のためのアンサンブル気候データの活用、寒地土木研究所月報、No.834、pp.65-70、2022.
- 14) Sugawara, K., Inatsu, M., Shimoda, S., Murakami, K., Hirota, T.: Risk assessment and possible adaptation of potato production in Hokkaido to climate change using a large number ensemble climate dataset d4PDF, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol.17, pp.24-29, 2021.
- 15) 村上貴一、根本学、稲津將、菅原邦泰、広田知良：現在および将来気候のもとでの確率的な農業影響評価のための1kmアンサンブル日平均気温・日降水量データセット、生物と気象、Vol.22、pp.33-38、2022.
- 16) 大阪府河川構造物等審議会：気候変動を踏まえた設計外力の設定の考え方、2020.
- 17) Hoshino, T., Yamada, T. J., Kawase, H.: Evaluation for characteristics of tropical cyclone induced heavy rainfall over the sub-basins in the central Hokkaido, northern Japan by 5-km large ensemble experiments, *Atmosphere*, Vol.11, pp.435, 2020.
- 18) Matthews, L., Andrey, J., Picketts, I.: Planning for winter road maintenance in the context of climate change, *Weather, Climate and Society*, Vol.9, pp.521-532, 2017.
- 19) Lorentzen, T.: Climate change and winter road maintenance, *Climate Change*, Vol.161, pp.225-242, 2020.
- 20) Kawazoe, S., Inatsu, M., Yamada, T. J., Hoshino, T.: Climate change impacts on heavy snowfall in Sapporo with 5-km mesh large ensemble simulations, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, Vol.16, pp.233-239, 2020.
- 21) Inatsu, M., Kawazoe, S., Mori, M.: Trends and projection of heavy snowfall in Hokkaido, Japan as an application of self-organizing map, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol.60, pp.1483-1494, 2021.