シームレス実験とタイムスライス実験の統合による

確率降雨量の将来変化予測

Future Projection of Probable Rainfall by Integrating Seamless and Time-Slice Climate Experiments

北海道大学大学院工学研究院	OE	員	清水啓太 (Keita Shimizu)
北海道大学大学院工学研究院	IE	員	山田朋人 (Tomohito J. Yamada)

1. はじめに

近年,我が国では,既往最大値を上回る規模の豪雨に 伴う洪水災害が発生している.洪水災害の頻発ならびに 気候変動の影響を考慮した,治水対策の具体的検討が実 施されている.2021年3月に「気候変動を踏まえた治水 計画に係る技術検討会」¹⁾がとりまとめた提言では,

「気候変動を考慮した治水計画へ見直すにあたり,計画 で想定する外力を世界の平均気温が2度上昇した場合を 想定した降雨量とするとともに,過去に経験したことの ない雨の降り方も考慮した上で,治水対策の検討の前提 となる基本高水を設定すべき」ということが示されてい る.これらの技術検討にはアンサンブル気候予測データ ベースが活用されている.山田ら^{2),3}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,

database for Policy Decision making for Future climate change

(d4PDF)」⁴の領域実験に対して,力学的ダウンスケ ーリングを実施することで構成された高い空間解像度の 降雨情報を導入した洪水リスク評価手法を提案している. さらに,力学的ダウンスケーリングにより導出された確 率雨量の振れ幅(信頼区間)は,数理統計理論により導 出された信頼区間と極めて高い精度で一致することが示 されている⁵.

気候変動を踏まえた計画規模相当降雨量の推定には, 確率雨量の合理的な評価手法の構築が急務である.した がって,本研究は,気候システムが有する年最大降雨量 の自由度をエントロピーとして表現することで,確率雨 量の将来変化予測手法の構築を目的としている.エント ロピーは,系の自由度(乱雑性)を表す尺度である.そ の系譜^のとして Clausius (1865)による熱力学的エント ロピーの発見,その後の Boltzmann (1877),Gibbs

(1902) による統計力学エントロピーの定式化がある. Shannon (1948) ⁸⁾は,情報の定量表現としてのエント ロピーを確立した.情報理論においては,エントロピー は情報源からの信号の多様性(情報源が有する選択肢の 総数)によって表現される ^{7),8)}.力学系は,その時間的 な振舞いを通して,外部に何らかの情報を発する情報源 と見なすことが出来る.力学系としての情報源からの信 号の多様性(選択肢の総数)は,情報エントロピーによ り規定されると考える.情報エントロピーとは,確率変 数 X(本研究では年最大降雨量)の実現値 xが持つ自己 情報量の平均値である.ここで,情報エントロピーの時 系列に対して,エルゴード性の成立を仮定 ^{9,10)}すると, 時間平均値としての情報量と,集合(アンサンブル)平 均値としての情報量が等価となる.本研究では、著者ら の既往研究11)に基づき、上記の情報量に対してエルゴー ド性の成立を仮定した、将来の年最大降雨量の極値分布 の推定手法を提案する.これは、20世紀中盤から今世 紀末までの時間連続的な気候計算値である「シームレス 実験」と、d4PDFに代表される、気候モデルにより計算 された海面水温の将来予測値等を境界条件とした多数の 気候計算値を有する「タイムスライス実験」の統合を目 的とするものである. すなわち, シームレス実験による 予測結果に対して、アンサンブル実験値を取り込み、そ の予測結果を更新させアンサンブル予測を構成する.具 体的には、提案手法では、ベイズ理論を適用させ、所与 の時点に存在するシームレス実験による年最大降雨量の 確率分布を事前分布として、その事前分布にアンサンブ ル実験値を同化させることで、事後分布・ベイズ予測分 布を推定する.この際、シームレス実験から算出した時 間平均情報量と同等の値を持つ集合平均情報量を持つべ イズ予測分布の推定を行う.本論ではその詳細を示す.

2. 使用したデータと研究手法

本研究では、文部科学省の「統合的気候モデル高度化 研究プログラム」において 150 年連続ラン¹⁰⁾を用いた. 150 年連続ランの特徴は RCP シナリオに基づいたタイ ムシームレスな数値計算結果であり、過去気候(1950~ 2014 年)と将来気候(2015~2099 年)の実験値から構成さ れる.150 年連続ランは、第 6 次結合モデル相互比較 プロジェクトCMIP6 の内の一つであるHighResMIP(高 解像度モデル相互比較プロジェクト)の実験として、全 球モデルを使用した数値計算が実施された.本研究では、 全球モデルの実験結果に対して、日本域を対象とした力 学的ダウンスケーリング計算を行い得られた、水平解像 度 20kmの領域実験結果を用いる.過去気候(1950 年~ 2014 年)の境界条件には英国のハドレーセンターにお いて作成された観測値の HadISST2.2 0.25°格子の日別 海面水温と海氷密接度が用いられている.次に将来気候

(2015 年~2099 年)の境界条件は、CMIP5 モデル平 均の RCP シナリオに対応する昇温量を HadISST2 に上 乗せした温暖化トレンドが採用されている¹²⁾.また、 2021 年 12 月現在、RCP シナリオごとに、1 アンサンブ ルの領域実験結果が利用可能となっている.次に、本研 究において使用したアンサンブル実験データの概要を示 す.使用した当該データは、水解像度 5km の d4PDF^{2),3)} から算出された十勝川帯広基準地点流域における過去実 験、2℃上昇実験および 4℃上昇実験結果である.実験 ごとに存在する、対象流域の流域平均雨量を 3,000 年間 分使用し、合計 9,000 個のアンサンブル実験値を用いた. なお、当該データの実験設定等の詳細は、文献^{2),3)(3)}を 参照されたい.ここで、図-1 は、対象流域における観 測値とシームレス実験値の時系列を示すものである.

次に、具体の研究手法を示す.150 年連続ランの結果 に対して、非定常極値分布モデル¹⁴⁾を適用することで、 情報エントロピー(平均情報量)が得られるが、その関 数形は時間軸上において平均操作を適用したものであり、 時間平均値となる.一方で、所与の時点においては、ベ イズ統計の理論により、アンサンブル実験値の確率分布 への同化を行うことで、出力結果であるベイズ予測分布 ならびに、同化に採用したアンサンブル実験値から平均 情報量が得られる.後述した平均情報量は、集合平均値 として得られるものである.本研究では、これら二つの 平均情報量に対して、エルゴード性の成立を仮定してい る.これにより、所与の時点で存在し得る確率分布群を 推定し、シームレス実験による確率雨量予測結果が限ら れているという点に対して、その振れ幅をアンサンブル 実験により定量化する.

3. 年最大降雨量の時間平均情報量及び集合平均情報量 の算定

確率変数Xの実現値を $\{x_1, x_2, ..., x_n\}$, これら実現値の総数をn, Xの従う確率分布をp(X), p(X)の下での各実現値の生起確率を $\{p(x_1), p(x_2), ..., p(x_n)\}$ とすると, Xの情報エントロピー(平均情報量)は式(1)より定義される.

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p(x_i) \log(p(x_i))$$
(1)

ここに, *i*: *X*の実現値群{*x*1,*x*2,...*xn*}に割り当てられた 番号(*i*=1, 2,..., *n*), -log(*p*(*xi*)):自己情報量である. な お,各実現値の生起確率{*p*(*x*1), *p*(*x*2),...*p*(*xn*)}の総和は 1 であり,このことを式(2)に示す.

$$\sum_{i=1}^{n} p(x_i) = 1 \tag{2}$$

自己情報量-log($p(x_i)$)は、ある一つのデータ x_i がもつ情報量を意味する.情報理論では、低頻度(生起確率 $p(x_i)$ の小さい)現象のもつ自己情報量は大きくなり、そのデータがもつ情報の価値は高い.このため、自己情報量は、当該のデータ x_i を観測した際の"驚きの度合い"とも言われ¹⁵)、記録的豪雨の観測値のような低頻度極端現象のもつ情報の価値は高くなる.自己情報量-log(p(x))をxの生起確率p(x)で、重み付き平均をしたものが平均情報量(情報エントロピー)となる.

本研究では, 確率 $p(x) \delta x$ の超過確率として定めた. 具体的には, 当該の超過確率p(x)は, 年最大降雨量の累 積分布関数値 $Fx(x) \delta 1$ から引いた値 (p(x)=1-Fx(x)) と した.これにより, 低頻度(超過確率 $p(x_i)$ の小さい) かつ大規模な確率雨量の有する情報量は大きくなる.ま た, 任意の標本が有するデータの超過確率群の正規化は



図-1 対象流域における 1951 年から 2010 年に亘る 60年間分の年最大流域平均 72 時間雨量(黒点)と, 1951 年から 2099 年に亘る 149 年間分の年最大流域平 均 72 時間雨量のシームレス実験値(赤点)の時系列

以下の式(3)より行った.

$$\left(p(x_1), p(x_2), \cdots, p(x_n)\right) = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_0(x_i)} \left(p_0(x_1), p_0(x_2), \cdots, p_0(x_n)\right)$$
(3)

ここに, *po*(*x*):*i* 番目の年最大降雨量 *x_i*の超過確率, *po*(*x*):年最大降雨量分布の生存関数値(1-(年最大降雨量 分布が与える *x* の累積確率値)), *p*(*x_i*):正規化された, *i* 番目の年最大降雨量 *x_i*の超過確率である.式(3)より得 られる正規化された超過確率群は, 情報エントロピーの 算出に用いる確率への制約条件(式(2))を満たす.

自己情報量の時間平均値としての年最大降雨量*X*の情報エントロピー*H*(*X*)を式(4)に示す.

$$\overline{H(X)} = -\sum_{i=1}^{T} p(x(t_i), t_i) \ln(p(x(t_i), t_i))$$
⁽⁴⁾

ここに、 $p(x(t_i))$:時点 t_i における年最大降雨量 $x(t_i)$ の正 規化された超過確率、i: シームレス実験の対象年数 $(i=1,2\cdots T)$, T: シームレス実験の対象年の総数(本研究では、<math>T=149[年]である).

次に、対象流域における時間及び集合平均情報量の算 出方法を示す.本研究では、非定常 Gumbel 分布を対象 流域における 1951 年から 2099 年に亘る 149 年間分の年 最大流域平均 72 時間雨量のシームレス実験値に当ては め、最尤法による母数推定を実施した.図-2 に当該の シームレス実験値に当てはめた非定常 Gumbel 分布を示 す.加えて、当該の非定常 Gumbel 分布を用いて算出し た時間平均情報量を図-3 に示す.次に、各時間ステッ プ(1年)において、同図に示す時間平均情報量と同等 の値となる集合平均情報量を有するベイズ予測分布を算 出する.

極値の予測分布は、ベイズ予測分布により得られる. 本研究では、アンサンブル気候データ中の年最大降雨量 を尤度関数に与え、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法)の一種であるメトロポリス法によりベイ ズ予測分布を算定した.なお、MCMC 法により得られ る事後分布の母数のサンプル値群を用いると、極値のベ イズ予測分布は式(5)により表すことができる.

$$F_{X_F}\left(x_F \mid \boldsymbol{x}\right) \approx \frac{1}{s} \sum_{i=1}^{s} F_{X_F}\left(x_F \mid \boldsymbol{\theta}_i\right)$$
⁽⁵⁾

ここに、 X_F : 極値を表す確率変数、 $F_{XF}(x_F | \mathbf{x})$: 極値の ベイズ予測分布の累積分布関数、 $F_{XF}(X_F \leq x_F | \theta_i)$: 母数 θ_i に対応する X_F の累積分布関数、s: MCMC 法により生成 した母数の総数である.次に、ベイズ予測分布により得 られる、所与の時点における集合平均値としての年最大 降雨量の情報エントロピー $\langle H(\mathbf{X}) \rangle$ を式(6)に示す.

$$\left\langle H(X)\right\rangle = -\sum_{i=1}^{n_F} p_F\left(x_{F\,i}\right) \ln\left(p_p\left(x_{F\,i}\right)\right)$$
(6)

ここに、ベイズ予測分布の導出に使用したアンサンブル 気候データの標本 X_F={x_{F1},x_{F2},…,x_{FnF}}の正規化された超 過確率 $p_F(x_{Fi})$ (= 1- $P(X_F \leq x_{Fi} | \mathbf{x})$), n_F : ベイズ予測分布 の導出に使用した当該データの総数、集合平均エントロ ピー(H(X))である. 任意の時点 tiにおいて,時間平均情 報量 $\overline{H(X)}$ と集合平均情報量(H(X))が等しくなるように, 当該時点で使用するアンサンブル気候データおよびその 総数 nF を決定する. ベイズ更新では, 単位時間ステッ プ(1年間)ごとに存在するシームレス実験値に当ては めた Gumbel 分布に対して、平均情報量が保存するアン サンブル気候データを抽出した.なお、本研究では、ベ イズ予測分布を MCMC 法の計算結果としての位置母数 と尺度母数の平均値を与えた Gumbel 分布とした. なお、 MCMC 法によるベイズ更新には,確率分布の母数に対 して事前分布を与える必要がある.そこで、本研究では、 推定した非定常 Gumbel 分布からの乱数生成により、時 間軸上で1951年から2099年に亘る149年間分の年最大 72時間雨量の標本を5,000通り算出した. これらの5,000 個の標本において,標本別に最尤法による母数推定を実 施することで,所与の時点での Gumbel 分布の母数を推 定した.事前分布の関数形としては、母数のサンプル数 が多いことから、ノンパラメトリック分布であるカーネ ル密度分布を採用した.

4. 確率降雨量の統合的予測手法

図-4 は本研究が提案するシームレス実験およびタイ ムスライス実験を統合した確率雨量の統合的予測手法の 概念図である.同図より、シームレス実験より算出され た時間平均情報量に対して、その値と同等となる集合平 均情報量を与えるベイズ予測分布が多数存在することが 分かる.赤点で示す集合平均情報量(H(X))は、式(6)よ り、アンサンブル実験値 xF 及びこれらの実験値による 事前分布の更新から得られるベイズ予測分布 Fxr (xF (x)(赤線)により算出される.ここで、事前分布は、所与 の時点における、シームレス実験に当てはめた非定常 Gumbel 分布を表す.本研究では、上述の通り、時間平 均情報量と集合平均情報量が保存するという、平均情報 量のエルゴード性を仮定している.この仮定を設定する ことで、シームレス実験に基づき得られる年最大降雨量



図-2 1951 年から 2099 年に亘る 149 年間分の年最大 流域平均 72 時間雨量のシームレス実験値に当てはめ た非定常 Gumbel 分布



図-3 年最大流域平均 72 時間雨量のシームレス実験値 (1951 年から 2099 年) に当てはめた非定常 Gumbel 分布より算出した情報エントロピーの時系列



図-4 情報エントロピーの保存を仮定した確率降雨量 の統合的予測手法

の極値分布に対して,この分布が有する情報量と同等の 情報量を有する極値分布をタイムスライス実験結果から 算定できる.シームレス実験は,温暖化トレンドを組み



図-5 年最大流域平均 72 時間雨量のシームレス実験 値(1951年から2099年)に当てはめた非定常Gumbel 分布より算出した情報エントロピーの時系列

込んだ気候予測結果を利用可能とする一方,アンサンブ ル数が少ないため,その予測不確実性の定量化が課題で ある.したがって,所与の時点での情報量の保存という 観点から"情報理論"上,存在可能な,ベイズ予測分布 群を算定することで,シームレス実験値とアンサンブル 実験値の双方の補完が可能となると考える.

本手法の適用結果を図-5 に示す.図-5 は、本手法に おいて算出したベイズ予測分布群が与える 150 年確率年 最大流域平均 72 時間雨量を示したものである.同図に おける青線は、これらの確率雨量群の平均値であり、紫 線は95%信頼限界線である.同図の結果が示すように、 シームレス実験による確率雨量予測結果が現状有限であ るという点に対して、情報量の保存を考慮することで、 時間軸上でアンサンブル実験値を付与し、情報理論的に 実現しうる極値分布群が得られ、確率降雨量の頻度分布 が推定可能となった.

5. まとめ

気候変動に伴う確率雨量の将来変化予測は洪水対策上 急務となる.その評価の実現に向けて,本研究は,気候 システムが有する年最大降雨量の自由度をエントロピー として表現し,確率雨量の時間変化を逐次的に推定する 手法を提案した.提案手法の前提には,情報エントロピ ーの時系列に対するエルゴード性の仮定がある.その過 程とは,時間平均値としての情報量と,アンサンブル平 均値としての情報量が等価とするものである.その仮定 を踏まえ,本研究では,シームレス実験による予測結果 に対して,アンサンブル実験値を取り込み,その予測結 果を更新させることで,確率雨量のアンサンブル予測手 法を構築した.

当該手法により得られる逐次的な確率雨量の時系列は, 段階的な洪水対策の整備を検討する場合,現実の時間軸 を踏まえた事業オプションを検討する際の有益な指標と なると考える.

謝辞:本研究は文部科学省統合的気候モデル高度化研究 プログラム領域テーマ C「統合的気候変動予測」 JPMXD0717935561,科研費基盤研究(B) 19H02241,内 閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベ ーション創造プログラム「国家レジリエンス(防災・減 災)の強化」,令和2年度地球シミュレータ特別推進課 題および一般課題の支援を受けた.記して謝意を表しま す.

参考文献

- 国土交通省 気候変動を踏まえた治水計画に係る技 術検討会:「気候変動を踏まえた治水計画のあり 方」 提言 2021.
- 山田朋人,星野剛ら:北海道における気候変動に 伴う洪水外力の変化,土木学会河川技術論文集, 第24巻, pp.391-396, 2018.
- Yamada, T.J.: Adaptation Measures for Extreme Floods Using Huge Ensemble of High-Resolution Climate Model Simulation in Japan. Summary Report on the Eleventh Meeting of the Research Dialogue, UNFCCC Bonn Climate Change Conference, pp. 28–30, 2019.
- Mizuta,R., Murata,A., and Ishii,M. : Over 5,000 Years of Ensemble Future Climate Simula-tions by 60-km Global and 20-km Regional Atmospheric Models, Bull.Am. Meteorol. Soc., pp.1383-1393, 2016.
- Shimizu, K.; Yamada, T.; Yamada, T.J. Uncertainty Evaluation in Hydrological Frequency Analysis Based on Confidence Interval and Prediction Interval. Water 12, 2554, 2020.
- 森口繁一:確率表現関数の検定について-Kolmogorov-Smirnov 検定を考え直す-, pp.233-244,日本統計学会誌,第25巻,1995.
- James.S: Information Theory: A Tutorial Introduction, Sebtel Press, pp.171-184, 2015.
- Shannon, C. E. and Weaver, W.: The mathematical theory of communication. University of Illinois Press,1949.
- 9) 十時 東生:エルゴード理論入門,共立出版株式会 社,pp.18-29, 2009.
- 10) 日野 幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店, pp.77-82, 2009.
- 清水啓太、山田朋人:情報理論を導入した確率降 雨量の統合的将来予測,土木学会論文集 B1(水工 学) Vol.77, No.2, I 163-I 168, 2021.
- 12) 文部科学省統合的気候モデル高度研究プログラム:令和元年度研究成果報告書, pp.140-143, 2020.
- 何えば、北海道地方における気候変動予測(水分 野)技術検討委員会 (https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa kei/splaat000000vdyw.html)
- 14) Coles, S. : An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer, Chapter 6, Extremes of Nonstationary Sequences, pp.105-123, 2001.
- 15) 豊田正:情報の物理学,講談社サイエンティフィ ク, pp.1-18, 1997.