

d4PDFを用いた利根川流域降水量の極値評価

Frequency Analysis of Extreme Precipitation in the Tone River Basin using “d4PDF”

田中茂信

Shigenobu TANAKA

Synopsis

Concerning water-related disasters, heavy rains and debris flow disasters have been increasing (MLIT, 2008). Summary for Policymakers of IPCC AR5 says “... in many mid-latitude wet regions, mean precipitation will likely increase by the end of this century under the RCP8.5 scenario. Extreme precipitation events over most of the mid-latitude land masses and over wet tropical regions will very likely become more intense and more frequent by the end of this century, as global mean surface temperature increases” (IPCC, 2013). “Database for Policy Decision-Making for Future Climate Change” (d4PDF) which is intended to be utilized for impact assessment studies and adaptation planning for global warming, is open to the public in 2016. It has many ensembles of 20 km regional climate model simulation over Japan. This paper shows extreme analysis on 3-day catchment averaged precipitation in the Tone River upstream region. It is found that it will increase about 100mm in future.

キーワード: 気候変動, d4PDF, 利根川, 流域平均降水量, 極値

Keywords: climate change, d4PDF, Tone river, catchment averaged precipitation, extreme value

1. はじめに

近年, 国内の洪水災害や土砂災害の発生時に観測開始以来初めてというような極値事象が報道されることが少なくない. また, これらの原因として気候変動との関係が報道されることも多い. IPCCの第5次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約(気象庁, 2014)では, 「世界平均地上気温が上昇するにつれて, 中緯度の陸域のほとんどと湿潤な熱帯域において, 今世紀末までに極端な降水がより強く, より頻繁となる可能性が非常に高い」と報告されており, 将来の災害発生に関する報道などが行われるなど関心が高まってきている. 本文では, 我が国最大の流域面積16,840km²を有する利根川流域に焦点を当て, 文部科学省気候変動リスク情報創生プログラ

ムで作成され2016年6月に公開された「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)」(以下, d4PDF)(文部科学省, 2016)を用いて, 利根川の治水計画の基準となる八斗島地点上流(流域面積5,114km²)の流域平均3日降水量(以下, 流域平均3日降水量)について, 極値事象の発生頻度を調べる.

2. d4PDFの概要と利根川流域

地球温暖化の影響を評価し, 適応策を策定する際に, 気候変動予測とそれに伴う不確実性の定量評価が不可欠である. d4PDFは, 高解像度全球大気モデルおよび高解像度領域大気モデルを用い, これまでにない多数(最大100メンバ)のアンサンブル実験を行

うことによって、確率密度分布の裾野にあたる極端気象の再現と変化について、十分な議論ができるように作成されたものである（文部科学省，2016）。

d4PDFは日本周辺領域について20km格子でカバーしており、過去3,000年分（1950年9月1日～2011年8月31日の50アンサンブル）と将来5,400年分（6種類のSSTパターンについて、それぞれ2050年9月1日～2111年8月31日の15アンサンブル）で構成されている。将来実験6種類のSSTパターンのアンサンブルグループCCSM4, GFDL-CM3, HadGEM2-A0, MIROC5, MRI-CGCM3, MPI-ESM-MRを、それぞれCC, GF, HA, MI, MR, MPと称す。利根川流域に相当する範囲は42のグリッドで表されており、本文では利根川八斗島地点上流域に対応する13グリッドのみを対象とする。また、縁部は流域境界とグリッド境界が必ずしも一致しているわけではないが、ここではFig. 1に示す番号付きの13グリッドの降水量の算術平均を八斗島地点上流域平均降水量とした。d4PDFについては過去実験1951年～2010年および将来実験2051年～2110年のそれぞれ60年間の資料を用いている。



Fig. 1 Tone River Upstream Basin and d4PDF's 20 km grids

3. d4PDFによる流域平均の降水量の特性

一般にGCMの値はモデル特有のバイアスを有するので、過去の計算結果を観測値と比較してその特性を見ておく必要がある。Fig. 2は八斗島上流域の流域平均降水量の観測期間平均月降水量とd4PDFの60年平均月降水量の50アンサンブルの比較である。ここで、観測は八斗島地点上流域の気象官署及びアメダスの資料から求めた1976年1月1日～2010年12月31日の流域平均降水量に基づく年平均月降水量である。Fig. 2よりアンサンブルの平均月降水量は7月は観測に比べやや少ないが、8月から10月の月降水量は比較的良好一致しているのがわかる。流域内の13グリッドについて見ると流域北縁の境界のグリッドで冬季降水量が多く、東側境界のグリッドで夏季降水量が多くなっ

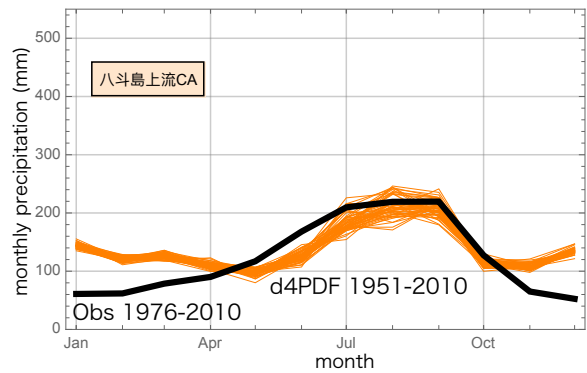


Fig. 2 Comparison between Mean Observed Monthly Precipitation(Black) and 50 Ensembles of Mean Monthly Precipitation of Past 60 years Experiment of d4PDF(Orange)

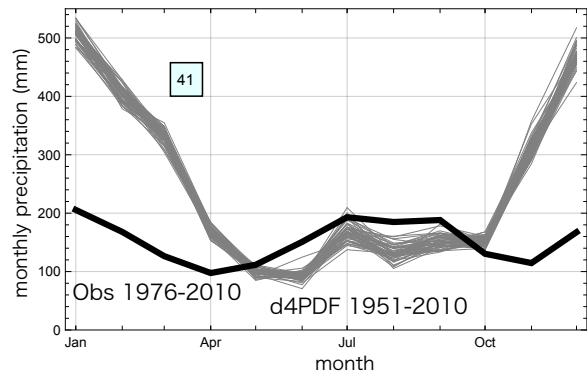


Fig. 3 Comparison between Mean Observed Monthly Precipitation of Fujiwara dam CA(Black) and 50 Ensembles of Mean Monthly Precipitation of Past 60 years Experiment of grid No.41 of d4PDF(Gray)

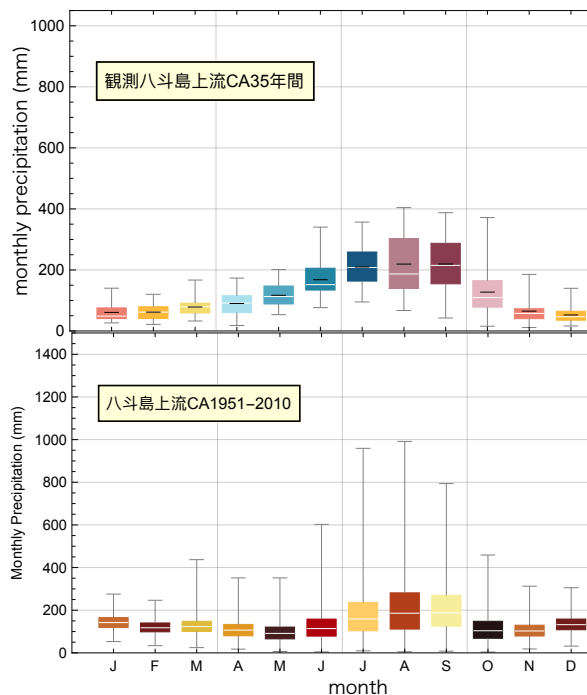


Fig. 4 Comparison between Variations of Observed Monthly Precipitation(Top) and that of 50 Ensembles of Past 60 years Experiment of d4PDF(Bottom)

ている。Fig. 3は矢木沢ダムと奈良俣ダムを流域内に擁する藤原ダムの流域平均降水量とグリッド番号41の降水量を比較したものである。冬季の降水量が観測に比べ2倍以上になっているのがわかる。なお、冬季のバイアスが大きいことは「d4PDF利用手引き」でも紹介されている。(文部科学省, 2016)

Fig. 4は観測値と過去実験50アンサンプルの月降水量それぞれのばらつきを示したもので、6月から10月においては平均や分散はほぼ同じであり、月降水量の観点からはバイアス補正の必要性はないと判断できる。なお、最大や最小値は大きく異なっており、アンサンプルが増えると極端な現象の度合いも極端になることがわかる。

Fig. 5は観測値と過去実験50アンサンプルの年降水量の推移を比較したものである。観測値には増大傾向が見られるが、Mann-Kendall Testによると信頼区間5%で有意な増加とはいえない。観測値はアンサンプルの変動幅の中にほぼ収まっており、年降水量の観点からはバイアス補正の必要性は見られない。

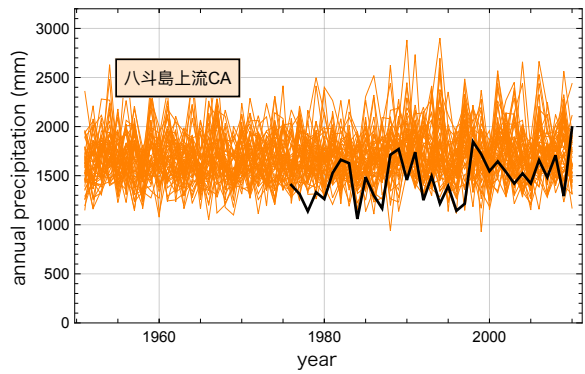


Fig.5 Comparison between Observed Annual Precipitation(Black) and 50 Ensembles of that of Past Experiment of d4PDF(Orange)

Fig. 6は将来実験の6種のSSTパターンのアンサンプルグループ毎にそれぞれ15アンサンプルの60年平均月降水量(上図)とそれぞれ15×60=900の月降水量のばらつきを比較したもの(下図)である。7月から10月の60年平均値はFig. 2に示した観測や過去実験のアンサンプルとほぼ同レベルである。一方、月降水量のばらつきは将来実験の方が大きくなっており、

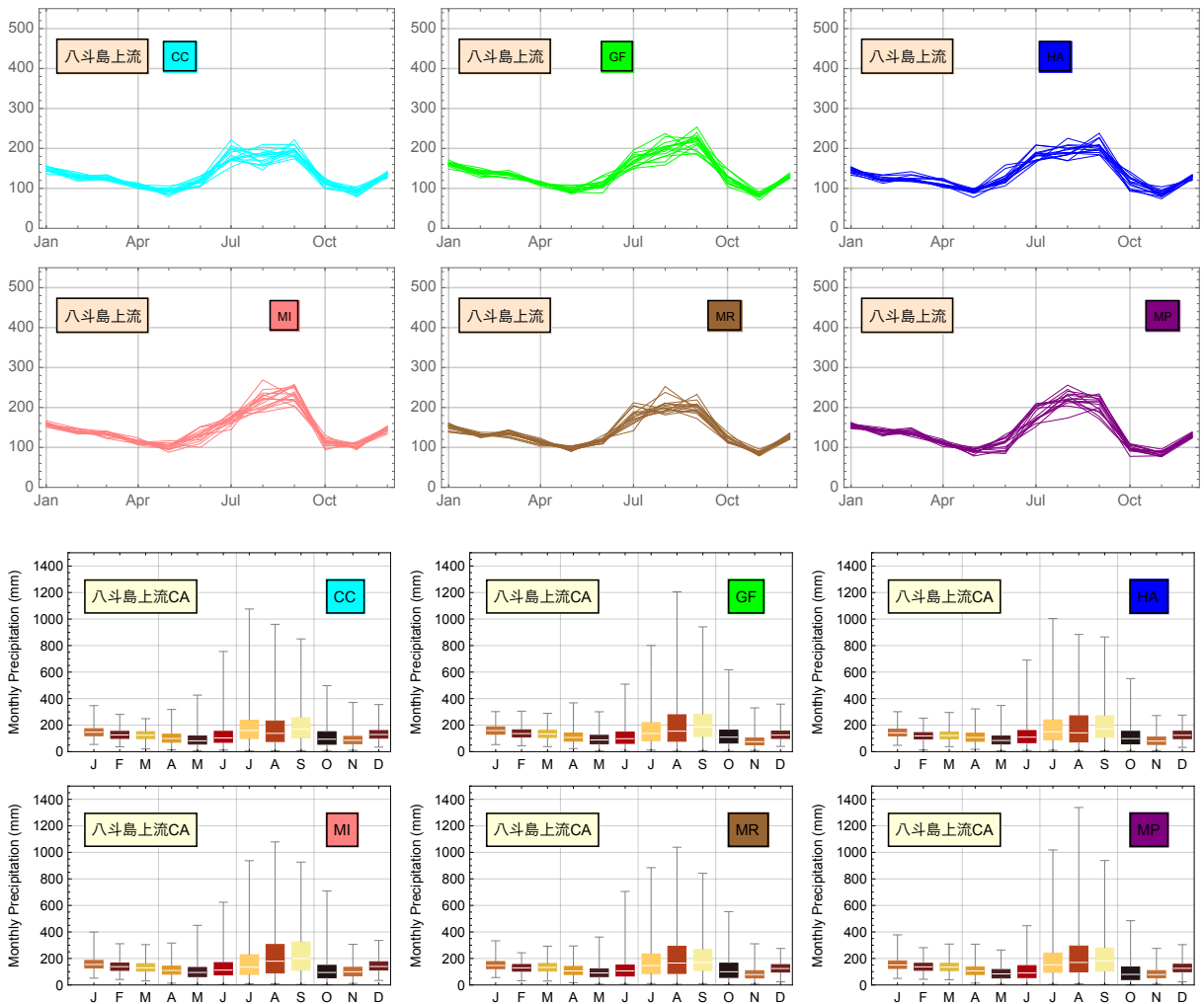


Fig. 6 15 Ensembles of Mean Monthly Precipitation of Future 60 years Experiment of Each SST Condition(Top) and Variations of 15 Ensembles of Future 60 years Experiment of Each SST Condition(Bottom)

特にGFとMRの8月が大きい。このように大きな月降水量が発生する場合、3日降水量も大きくなっている可能性がある。

4. d4PDFによる流域平均3日降水量の極値評価

4.1 極値評価の手法

流域平均降水量の極値解析に当たり、慣習的に用いられてきた年最大値資料(AMS)を用いるAMS解析だけでなく、閾値超過資料(POT)を用いたPOT解析も併用して判断する必要がある(田中, 2014)。AMS解析に用いられる極値分布は一般極値分布(GEV)であり、その形状母数が0であるグンベル分布を含んでいる。これに対応するPOT解析に用いられる極値一般パレート分布(GP)であり、その形状母数が0の場合が指数分布である。指数分布は資料抽出時に与える閾値を除けば母数は1つであり、取り扱いが簡単である。d4PDFについては、過去実験および将来実験それぞれ60年間の複数のアンサンブルがあるのでそれを用いると、様々な区間での最大値シリーズを抽出することができる。これらを次のように分類する。A)全てのアンサンブルを全部一緒にした資料、すなわち過去実験は3,000年分、将来実験は5,400年分を一つのAMSとして評価する。次に、B)60年を一区間とし、その区間最大値を用いた評価を行う。この場合、200年再現レベルを求めるには超過確率60/200を用いる。C)年最大値60年分による評価の平均をとる。なお、B),C)について、過去実験は50アンサンブルあり、将来実験は6種のSSTパターンをひとまとめにした90アンサンブルとそれぞれのSSTパターンの15アンサンブルのものも合わせて示す。D)観測(1976-2010)についても評価する。また、評価にあたっては、再現レベルの推定値だけでなく推定値の95%信頼区間も合わせて示す。

一部のサンプルについてはPOTによる解析も行った。

4.2 再現レベルの信頼区間

(1)再現レベルの分散を用いる方法

サンプルサイズ n が大きくなると漸近的に非超過確率 p に対応する再現レベル \hat{x}_p は正規分布に従う。 \hat{x}_p の分散 $\text{Var}(\hat{x}_p)$ が正規分布に従う場合、 $100(1-\alpha)\%$ 信頼区間は次式で表される。

$$\hat{x}_p - z_{1-\alpha/2}\sqrt{\text{Var}(\hat{x}_p)} \sim \hat{x}_p + z_{1-\alpha/2}\sqrt{\text{Var}(\hat{x}_p)} \quad (1)$$

ここに、 z は標準正規分布のクォンタイルである。

分散 $\text{Var}(\hat{x}_p)$ は分布により異なる。ここでは分布の母

数の推定にL積率を用いる場合に適用できるものを示す(Handbook of Hydrology, 1993)。

- 1) Gumbel分布の分布関数と再現レベルの分散
グンベル分布の分布関数は次式で与えられ、

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left\{ -\frac{x - \xi}{\alpha} \right\} \right] \quad (2)$$

L積率法で母数を推定する場合の再現レベルの分散は次式で与えられる。

$$\text{Var}(\hat{x}_p) = \frac{\alpha^2}{n-1} \left((1.1128 - 0.9066/n) - (0.4574 - 1.1722/n)y + (0.8046 - 0.1855/n)y^2 \right) \quad (3)$$

ここに、 $y = -\log \left\{ -\log(p) \right\}$ である。

- 2) GEV分布の分布関数と再現レベルの分散
GEV分布の分布関数は次式で与えられ、

$$F(x) = \exp \left[-\left(1 - k \frac{x - \xi}{\alpha} \right)^{1/k} \right] \quad (4)$$

L積率法で母数を推定する場合の再現レベルの分散は次式で与えられる。

$$\text{Var}(\hat{x}_p) = \alpha^2 \exp \left[a_0(p) + a_1(p) \exp(-k) + a_2(p) k^2 + a_3(p) k^3 \right] / n \quad (5)$$

ここに、係数 $a_0 \sim a_3$ はTable 1に示すとおりである(Lu, L.-H. and Stedinger, J.R., 1992)。

Table 1 Coefficients of Approximate Variance of GEV

| p | a_0 | a_1 | a_2 | a_3 |
|-------|--------|--------|--------|-------|
| 0.8 | -1.813 | 3.017 | -1.401 | 0.854 |
| 0.9 | -2.667 | 4.491 | -2.207 | 1.802 |
| 0.95 | -3.222 | 5.732 | -2.367 | 2.512 |
| 0.98 | -3.756 | 7.185 | -2.314 | 4.075 |
| 0.99 | -4.147 | 8.216 | -2.033 | 4.78 |
| 0.998 | -5.336 | 10.711 | -1.193 | 5.3 |
| 0.999 | -5.943 | 11.815 | -0.63 | 6.262 |

(2)プロファイル尤度を用いる方法

再現レベルの信頼区間は、分散を用いて推定するよりプロファイル尤度を用いても止めた方が正確である(高橋・志村, 2016)。GEV分布の分布関数が

$$F(x) = \exp \left[-\left(1 + \xi \frac{x - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi} \right] \quad (6)$$

で定義されるとき、次式の変換を行なって母数 μ を再現レベル x_p に変換する。

$$\mu = z_p - \frac{\sigma(r_p^\xi - 1)}{\xi} \quad (7)$$

$$r_p = -\frac{1}{\log(1-p)} \quad (8)$$

これにより、対数尤度は、

$$l(x_p, \sigma, \xi) = -n \log \sigma - (1/\xi + 1) \sum_{i=1}^n \log \left[r_p^\xi + \xi \left(\frac{x_i - x_p}{\sigma} \right) \right] - \sum_{i=1}^n \left[r_p^\xi + \xi \left(\frac{x_i - x_p}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \quad (9)$$

と表され、再現レベル x_p の95%信頼区間は

$$\left\{ x_p : \max_{\sigma, \xi} l(x_p, \sigma, \xi) \geq l(\hat{x}_p, \hat{\sigma}, \hat{\xi}) - 1.921 \right\} \quad (10)$$

と表される。Gumbel分布についても、同様に導くことができる。サンプルサイズが小さい場合は、この方法は適用しない。

(3) ノンパラメトリック法

さらに、d4PDFの過去実験および将来実験のそれぞれ全てのアンサンプルの年最大値を対象にして、パラメトリックな分布関数によらないノンパラメトリックな方法(北野ら, 2017)によっても評価する。試行回数が n とすると、母比率 p で生じるイベントの生起数 k に対して、

$$P(k) = \sum_{j=0}^k \binom{n}{j} p^j (1-p)^{n-j} \quad (11)$$

で表される2項分布を用いれば、95%信頼区間に対応する k の範囲が求まる。これは1/200確率の場合、試行回数3,000および5,400に対して、それぞれ $8 \leq k \leq 22$ および $17 \leq k \leq 37$ とな、これらに対応する順

位の降水量が信頼区間の上下限値となる。ここでは、全ての資料を一緒にしたケースのみ求めてみる。

Table2は過去実験と観測の確率評価結果の一覧である。Table3は将来実験の確率評価結果の一覧である。なお、両表において右端にPOT推定値をいくつか示した。POT抽出の際の閾値は確率プロットを参考に125mmと設定している。観測についてはGEVやPOTのExpがd4PDFの結果に近くなっている。POTのGP場合、上位データによって上限のある分布になっており、除外して考える方が良さそうである。Fig. 7は将来実験の全ての資料を用い、ブロックサイズを1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 60年として再現レベルと信頼区間の変化を見たものである。Fig. 8およびFig. 9にそれぞれAMS解析およびPOT解析の確率プロットを示す。ブロックサイズが1年と2年ではGumbel分布とGEVの結果が異なるが、それよりブロックサイズが長くなると、両者はほぼ一致することがわかる。ブロックサイズが小さい場合、Fig. 8に示されるように大きな降水量の傾向と異なる降水量の小さいイベントが含まれ、これがGEVとGumbel分布の乖離を大きくする原因となっている。

Fig. 7から過去実験に比べ、将来実験は110mmあまり大きくなっている。過去実験の確率プロットを見ると下位データの影響から、60年最大値を用いたもの以外でGEVは大きめの値を示していることが多い。このことを考慮すると結果は概ね380mm前後と見れる。同様に将来実験の結果は、480mm~500mm前後とみられ、過去実験に比べ、約100~120mm増加している。過去実験と観測の差はモデルなどのバイアスを含んでいるので詳細な比較検討はできないが、過去実験と将来実験の差分100mmあまりが4度C上昇時までの増分と考えれば良い。Fig. 8のAMSへ当てはめたGEVのTailが厚くなっており、非超過確率の大きい部分で再現レベルが大きくなっているのがわかる。一方、これに対応するPOTのGPは一例を除きあまりTailの厚いものは見られず、指数分布との差もそれほど

Table 2 200 year Return Level of 3 day Precipitation of Past Experiment and Observed Record (Unit : mm)

| 過去実験1951-2010 | 手法 | 95%信頼区間 | | | 95%信頼区間 | | | POT推定値 |
|---------------------|-----------|---------|-----|-----|---------|-----|-----|------------------|
| | | 下限値 | 推定値 | 上限値 | 下限値 | 推定値 | 上限値 | |
| | | Gumbel | | | GEV | | | |
| A) 3000年AMS | NonPrm | 376 | 401 | 432 | | | | |
| | 分散(LM) | 365 | 373 | 381 | 372 | 394 | 416 | 405(Exp) 392(GP) |
| | Profile尤度 | 354 | 362 | 370 | 388 | 410 | 436 | |
| B) 50×60年区間最大値 | 分散(LM) | 357 | 377 | 397 | 344 | 378 | 411 | |
| | Profile尤度 | 353 | 375 | 401 | 347 | 372 | 400 | |
| C) 60年AMS解析値の平均 | 分散(LM) | 316 | 372 | 429 | 237 | 393 | 550 | |
| D) 観測 AMS 1976-2010 | 分散(LM) | 281 | 355 | 429 | 175 | 376 | 576 | 394(Exp) 282(GP) |

大きくない。また、観測資料のPOTへのGP分布の当てはめは、閾値以上のイベントがそれほど多くない上、上位データに影響されて上限を有するあてはめになっている。

5. おわりに

過去実験の確率評価で得られた200年確率3日降水量の推定値は、利根川の河川整備基本方針の計画降雨量319mm/3日と比べ、60mmあまり大きい。さらに、4度C上昇時に相当する将来実験と過去実験との差分が100mmあまりもあることは重大に受け止めるべきで

ある。計画規模の大雨が降った上でさらにその大雨が100mm余分にもたらされるので相当の影響がある。

Fig. 2において7月から10月の八斗島上流流域平均月降水量が観測と同様の傾向ではあるが、Fig. 3のように流域北縁のグリッドでは冬季の降水量は観測とはかなり異なる傾向となっている。Fig. 4の箱ひげ図でも冬季の傾向は異なっている。利根川の洪水は主に夏季に発生しているので、洪水を考える際にはあまり大きな問題ではないが、冬季降水量が重要な役割を果たす渇水では状況は深刻であり、より詳細な吟味が必要である。また、モデルの改良が望まれる。

Table 3 200 year Return Level of 3 day Precipitation of Future Experiment (Unit : mm)

| 将来実験2051-2110 | 手法 | SST パターン | 95%信頼区間 | | | 95%信頼区間 | | | POT推定値 | |
|----------------------|-----------|-------------|---------|-----|-----|---------|-----|-----|--------|-----|
| | | | 下限 | 推定値 | 上限 | 下限 | 推定値 | 上限 | Exp | GP |
| | | | Gumbel | | | GEV | | | | |
| A-1) 5400年AMS | NonPrm | 6 SST | 468 | 504 | 520 | | | | | |
| | 分散(LM) | 6 SST | 480 | 488 | 496 | 506 | 530 | 554 | 500 | 505 |
| | Profile尤度 | 6 SST | 459 | 467 | 475 | 548 | 577 | 611 | | |
| A-2) 900年AMS | 分散(LM) | CC | 444 | 463 | 482 | 486 | 561 | 635 | | |
| | | GF | 455 | 474 | 493 | 454 | 508 | 563 | | |
| | | HA | 472 | 492 | 512 | 475 | 534 | 593 | | |
| | | MI | 477 | 497 | 517 | 453 | 500 | 547 | | |
| | | MR | 453 | 472 | 491 | 454 | 510 | 565 | | |
| | | MP | 498 | 520 | 541 | 499 | 561 | 623 | | |
| | Profile尤度 | CC | 413 | 430 | 449 | 533 | 623 | 725 | | |
| | | GF | 438 | 456 | 475 | 480 | 541 | 613 | | |
| | | HA | 453 | 471 | 491 | 509 | 578 | 661 | | |
| | | MI | 467 | 486 | 506 | 477 | 531 | 598 | | |
| | | MR | 434 | 452 | 471 | 492 | 563 | 647 | | |
| B-1) 90×60年 区間最大値 | 分散(LM) | 6 SST | 466 | 483 | 499 | 458 | 485 | 512 | | |
| | Profile尤度 | 6 SST | 464 | 482 | 505 | 463 | 482 | 505 | | |
| B-2) 15×60年 区間最大値 | 分散(LM) | CC | 452 | 498 | 545 | 457 | 512 | 567 | | |
| | | GF | 435 | 472 | 510 | 417 | 475 | 533 | | |
| | | HA | 454 | 504 | 555 | 395 | 496 | 597 | | |
| | | MI | 416 | 453 | 490 | 423 | 465 | 507 | | |
| | | MR | 417 | 459 | 502 | 338 | 441 | 544 | | |
| | | MP | 471 | 510 | 549 | 429 | 505 | 581 | | |
| C) 60年AMS解析値 の平均 | 分散(LM) | 6 SST | 410 | 487 | 564 | 296 | 535 | 774 | | |
| | 分散(LM) | CC | 388 | 462 | 537 | 263 | 568 | 872 | 471 | 538 |
| | | GF | 400 | 474 | 549 | 294 | 510 | 727 | 483 | 493 |
| | | HA | 415 | 493 | 572 | 300 | 543 | 787 | 503 | 497 |
| | | MI | 419 | 497 | 574 | 312 | 507 | 702 | 517 | 485 |
| | | MR | 399 | 473 | 547 | 293 | 516 | 739 | 486 | 482 |
| | | MP | 436 | 519 | 602 | 317 | 568 | 818 | 530 | 536 |

謝 辞

本研究は文部科学省委託事業気候変動リスク情報創生プログラム「課題対応型の精密な影響評価」のもとで行われた。d4PDFの資料は防災科学技術研究所社会防災システム研究領域石崎紀子氏より提供いただいた。また、観測資料は、愛媛大学農学部佐藤嘉展准教授に提供いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 気象庁(2014) : IPCC第5次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約, http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_spm_jpn.pdf
- 北野利一・高橋倫也・田中茂信(2017):気候モデルから得られる多数のアンサンブルデータを用いた確率降水量の推定法, 土木学会論文集B1(水工学), Vol. 73, No. 4, pp. I_1-I_6.
- 国土交通省 : 平成19年度国土交通白書, <http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/hakusho/h20/pdfindex.html>
- 高橋倫也・志村隆彰(2016):極値統計学, ISMシリーズ:進化する数理統計5, 近代科学社, 262p.

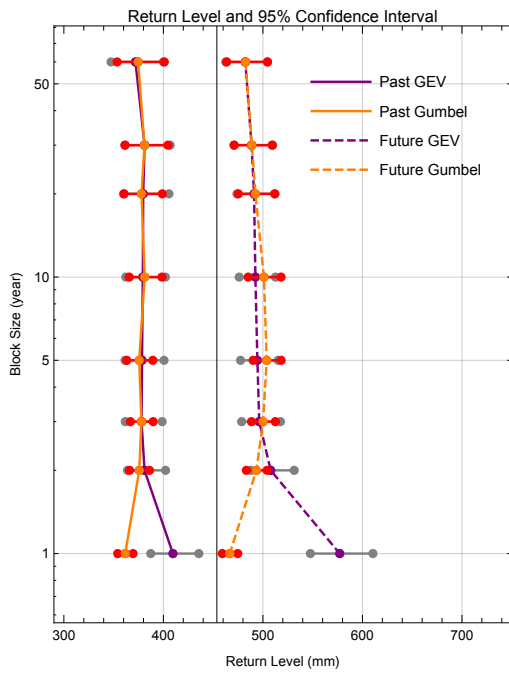


Fig. 7 Comparison of AMS Confidence Interval of the Past Experiment with that of the Future Experiment (Orange : Gumbel, Purple : GEV) Horizontal Bars show 95% Confidence Interval.

さらに、冬季降水量の傾向が異なることの原因が夏季の降水量に何らかの影響を与えることも有りうるのではないかと懸念され、本文での結果の解釈には注意を要する。

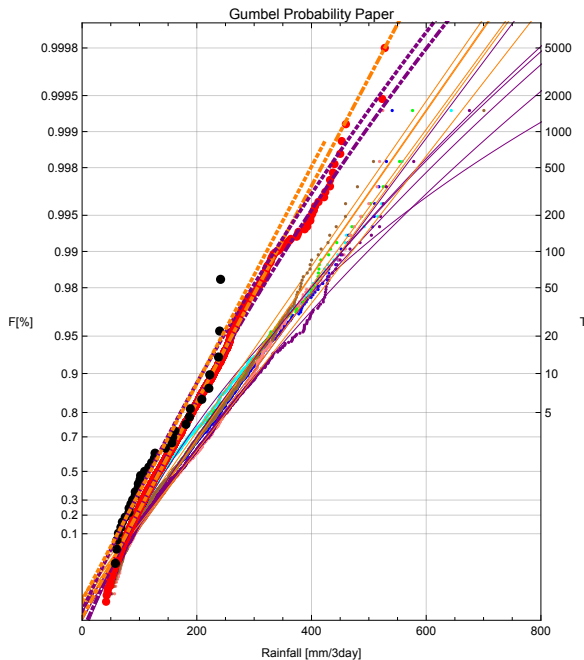


Fig. 8 Probability Plots of AMS and Fitting Curves(Orange : Gumbel, Purple : GEV) of Observation, Past Experiments and Future Experiments (not include Maxima in each 60-years)

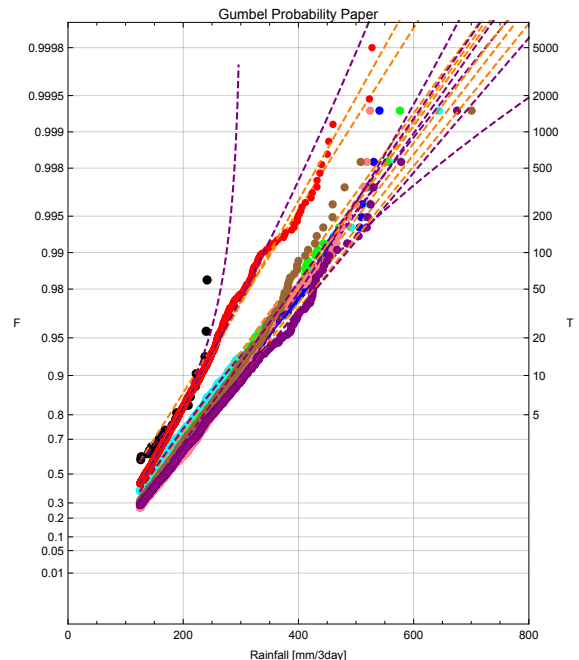


Fig. 9 Probability Plots of POT and Fitting Curves(Orange : Exp, Purple : GP) of Observation, Past Experiments and Future Experiments

田中茂信(2014) : 2013年台風18号による淀川流域の洪水災害の外力評価, 京都大学防災研究所年報, 第57号B, pp. 512-523.

文部科学省(2016) : 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, <http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/>

文部科学省(2016) : d4PDF利用手引き第3章領域モデル実験, http://www.miroc-gcm.jp/~pub/d4PDF/img/d4PDF_Chap3_20151214.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC)(2013), Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change, https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5_SPM_brochure_en.pdf

Lu, L.-H. and Stedinger, J.R., (1992): Variance of two- and three-Parameter GEV/PWM Quantile Estimators: Formulas, Confidence Intervals and a Comparison, *J. Hydrol.*, vol.138, no. 1/2, pp.247-268.

Stedinger, J.R., R.M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou(1993): Frequency Analysis of Extreme Events, Chap. 18, *Handbook of Hydrology*, (Ed.) D. R. Maidment, McGraw-Hill, New York, pp.18.1-18.66.

(論文受理日: 2017年6月13日)