

気候変動下における水文統計解析手法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平21～平23

担当グループ：水災害研究グループ

研究担当者：田中茂信、深見和彦、栗林大輔、
廣江亜紀子

【要旨】

治水及び利水計画は、降雨・流量等の水文事象が定常であるという前提で、既往の資料から当該流域に発生すると想定される所定の確率規模に対応する降雨量・流量を算定し、それに基づいて計画目標が検討・決定されてきた。しかしながら気候変動の影響により時系列資料がトレンドを有しかつ変動幅も徐々に大きくなる等の傾向を持つことが指摘されている。本研究では国内の水文資料の変動特性、諸外国の解析手法の動向を調査し、水文データベースの整備、気候変動下において適用可能な解析手法の検討を行った。

その結果、最大値だけでは適切な判断は難しいが、閾値超過資料では平均とばらつきの増加傾向が示された。また、諸外国の考え方を解析手法に取り入れ、気候変動下において適用可能な解析手法の提案を行った。

キーワード：気候変動、水文頻度解析、非定常性、極値分布、Mann-Kendall 検定

1. はじめに

従来、河川計画では、降雨・流量等の水文事象が定常過程であるという前提で、過去の資料から当該流域に発生すると想定される所定の確率規模に対応する降雨量・流量を算定し、それに基づいて計画目標が検討・決定されている。しかしながら地球規模の環境変化により時系列資料がトレンドを有しかつ変動幅も徐々に大きくなる等の傾向を持つことが指摘されている。このため、本課題では、従来の手法に代えて河川計画に用いることが出来る非定常過程における水文統計解析手法を検討した。

2. 研究方法

本研究は以下の項目で構成される。

- 1) まず、アメダスおよび河川関係事務所等の雨量等の資料の整理を行い、長期的な変動の有無やその地域性について整理を行う。
- 2) あわせて諸外国の水文統計解析手法について、長期的な変動等の考慮の有無および長期的な変動を考慮している場合の解析手法の整理を行う。
- 3) これらの結果を踏まえ、現在行われている確率降雨量解析等の水文解析手法について、実際の観測資料を基に気候変動下において適用可能なものの検討を行う。
- 4) また、併せて今後の統計解析検討が容易になるように継続的に取得される資料を対象とするデータベースを整備する。

2.1 わが国の水文データにおける長期変動特性の把握

一般に、降雨は人為的な影響を受けにくい流量は流域の改変や洪水調節施設、利水施設等の影響を受けるので本研究では主に降水量を対象に解析する。一般に河川計画の対象とする外力はまれにしか起こらない現象である。このような現象を扱う理論として極値理論がある。従来我が国の河川計画では、極値理論に基づく極値分布以外に対数正規分布や対数ピアソンIII型等が候補として挙げられ、適合度の良いものが採用されてきた。しかしながら、1年間のある値以上の事象の生起確率、すなわち、年超過確率が例えば0.01であることとその事象が平均的に100年に1回生じることが等しく成り立つのは極値分布しかない。このため、本研究では頻度解析を極値理論に基づいて進めることとする。

水文時系列資料を一定の区間に分割し、それぞれの区間に含まれる最大値を収集した水文資料を区分最大値という。一般に良く用いられている年最大値資料(Annual Maximum Series, AMS)は区分最大値である。区分最大値を扱う極値分布には3つのタイプがあるが、それらを一つにまとめたものが一般極値分布 (Generalized Extreme Value Distribution, GEV) であり、その累積分布関数は次式で表される¹⁾。

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

ここに、 ξ : 位置母数、 α : 尺度母数、 κ : 形状母数であり、 $\kappa = 0$ の場合、Gumbel分布になる。なお、GEVは $\kappa > 0$ の場合、変量 x の取りうる範囲が上限を有する。

$$-\infty < x \leq \xi + \alpha/\kappa \quad (\kappa > 0) \quad (2)$$

AMS以外に、極値理論に基づく解析方法として閾値を超過する独立なピーク値を全て取り出した閾値超過資料 (Peaks Over Threshold, POT) がある。AMSが他の年の年最大値より大きな年間第2位や3位などのデータを使わず、また、年によっては洪水とみなせないような事象を含むのに対し、適切に閾値を選べばこのように特性の異なる水文資料を含むことを回避できる利点がある。閾値の選定によく用いられる手法としては、標本平均超過関数を用いる手法がある。POTを扱う分布として一般パレート分布 (Generalized Pareto Distribution, GP) があり、累積分布関数は次式で表される。

$$G(x) = 1 - \left(1 - \kappa \frac{x - \xi}{\alpha}\right)^{1/\kappa} \quad (3)$$

ここに ξ : 位置母数 (閾値)、 α : 尺度母数、 κ : 形状母数であり、 $\kappa = 0$ の場合、指数分布である。なお、GPは $\kappa > 0$ の場合、変量 x の取りうる範囲は次の通りである。

$$\xi \leq x \leq \xi + \alpha/\kappa \quad (\kappa > 0) \quad (4)$$

AMSとPOTの累積分布関数の間には次式の関係があり、POTをAMSと比較することができる。

$$F(x) = \exp\left\{-\lambda(1 - G(x))\right\} \quad (5)$$

時系列資料がトレンドを有するかどうかの判断に使える手法として、Mann-Kendall検定²⁾³⁾や新記録数検定等⁴⁾がある。ただし、検出力がそれぞれ異なり、必ずしも水文資料が単調なトレンドを有していることは少ないことから、複数の方法や対象期間等により評価する必要がある。

Mann-Kendall検定は、トレンドが線形か非線形かを問わずに水文時系列資料のトレンドを検定するノンパラメトリックな手法である。本検定の帰無仮説 H_0 と、対立仮説 H_1 は、以下に示すとおりである。

H_0 : n 個のデータ $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ が独立で同一の確率分布に従う。

H_1 : n 個のデータ $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ が同一の確率分布に従わない。

Mann-Kendall検定においては、式(8)で与えられる

統計量 Z を定義する。

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (6)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left\{ n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m e_i(e_i-1)(2e_i+5) \right\} \quad (7)$$

$$Z = \frac{S - \text{sign}(S)}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad (8)$$

ここに、 e_i はデータ $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ を昇順に並べた時、同じ値が連続して出現する個数 (タイの大きさ) を表し、 m はその組数を表す。ここで、有意水準を α としたとき、標準正規変量 Z が $|Z| > z_{1-\alpha/2}$ のとき仮説 H_0 は棄却される。ここに、 $z_{1-\alpha/2}$ は標準正規分布の超過確率 $\alpha/2$ に相当するクォンタイルであり、有意水準5%のとき1.96である。また、 $Z > 0$ のとき時系列資料は上昇 (増加) 傾向、 $Z < 0$ のとき下降 (減少) 傾向であることを示す。

水文時系列資料の最初の記録を新記録として、以降この記録が更新される回数を数える。時系列資料が定常で独立同一分布に従う場合、この新記録数 p は理論的に次式で表されるので、観測値から得られる新記録の回数と比較することにより定常性を評価できる。

$$p = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \approx \log n + \gamma \quad (9)$$

ここに、 n は観測回数 (年最大値を対象とする場合観測年数)、 γ はオイラー定数で、約0.577216である。時系列が増加傾向であれば、観測値から得られる新記録の数は理論値を上回り、減少傾向であれば逆に下回ることになる。例えば、有意水準5%のとき、 $n = 25, 50, 100$ に対する新記録の個数の上限値はそれぞれ7、8、9である。

2.2 諸外国における検討、対応状況の整理

欧米での検討、対応状況を調べるため、先ず、2010年1月に米国の水関連組織 (ICIWaRM, USACE, Bureau of Reclamation, USGS, NOAA, EPA, コロラド大) 共催してコロラド州ボルダーで開催された「非定常性、水文頻度解析、水マネジメント」WSに竹内邦良ICHARMセンター長が出席して、日本の状況を報告するとともに情報を収集した⁵⁾。また、主に欧州の資料を使用してWMOが取りまとめたガ

イドライン⁶⁾の内容を調査した。

2.3 水文統計解析データベースの整備

気候変動により特性が時間的に変化すると考えられる水文資料の統計解析を適切に行うためには、精度の信頼性だけでなく、長期間にわたり資料が蓄積される必要がある。我が国流域の水文環境に関連する資料としては、まず、気象庁所管の気象官署155カ所の日雨量、時間雨量が整備されている。また、1974年以降、AMeDASの観測網が整備されており、約1,300地点での降水量などが自動的に記録されている。これらの記録は気象庁のWebsiteで毎日アップデートされている。一方、直轄河川を管理する国土交通省水管理・国土保全局においては流域内の降水量や主要な地点の水位、流量を観測・蓄積しており、水文水質データベースとして公開している。これらの資料を水文統計解析に使いやすいようにデータベース化し、長期変動特性の検討等の資料として用いた。

図-1は全国155の気象官署の降水量観測が行われた数の推移を示したものである。1901年に59カ所になり、1940年に100カ所を超え、1970年から155カ所になっている。一方、AMeDAS観測所は1974年11月から整備され、1979年には1300カ所を超えている。

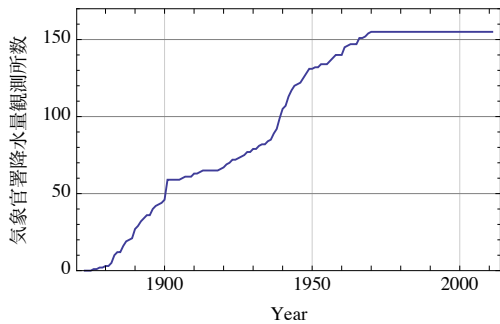


図-1 気象官署の降水量観測所数の推移

3. 研究結果

3.1 わが国の水文データにおける長期変動特性

整備した水文統計解析データベースを用いて、長期変動特性を調べた。この結果、個々の観測点では明瞭な傾向がわからないものが、多くの観測点の情報を合わせてみることにより、増加または減少傾向が見えてくることわかった。

(1) 全国50カ所の気象官署資料(1901-2005)

図-2は1901年から観測が行われている全国50カ所

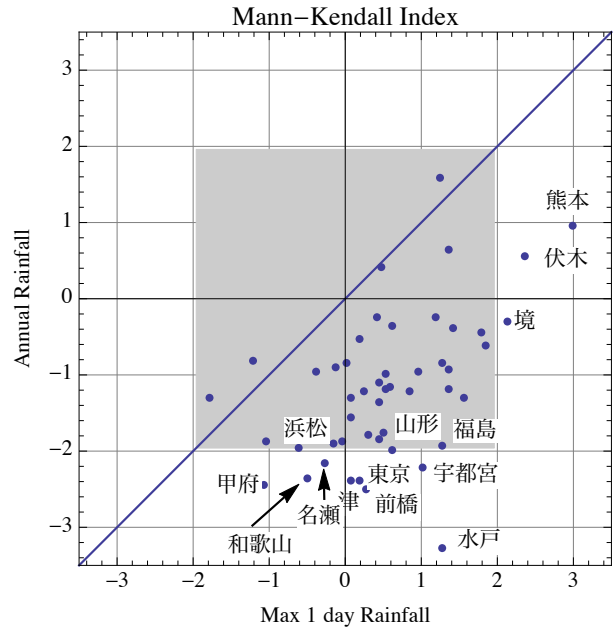


図-2 Mann-Kendall検定による全国50カ所の気象官署の年最大日雨量および年降水量(1901-2005)の変化傾向評価
中央の灰色の部分には有意水準5%で有意な変化傾向とは見なせない領域である

の気象官署の年最大日雨量および年降水量のMann-Kendall検定の結果を示したものである。熊本、伏木、境は年最大日雨量の増加が有意であり、減少しているものは見られない。年降水量が有意に減少している箇所は図に示す11カ所であり、有意に増加しているものは見られない。有意でないものも含め、年最大日雨量は増加のみ、年降水量は減少のみである。

次にこの記録を全国まとめてみる。各年の上位1、2、3、7、12位の推移を見たものが図-3である。1位の変動は大きく、かつ、明瞭な増加減少の傾向は見られない。2、3、7、12位の変化は平均的に増

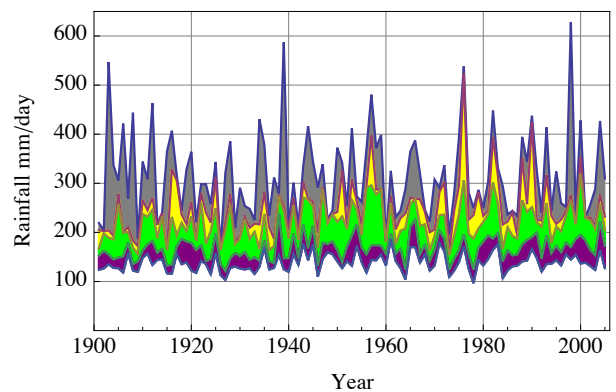


図-3 全国50カ所の気象官署の記録の1、2、3、7、12位の推移

えているように見える。図-4はこの各順位の時系列についてMann-Kendall検定を行ったものである。2位から12位までは増加が有意であることがわかるとともに1位の傾向がはっきりしないこともよく対応している。

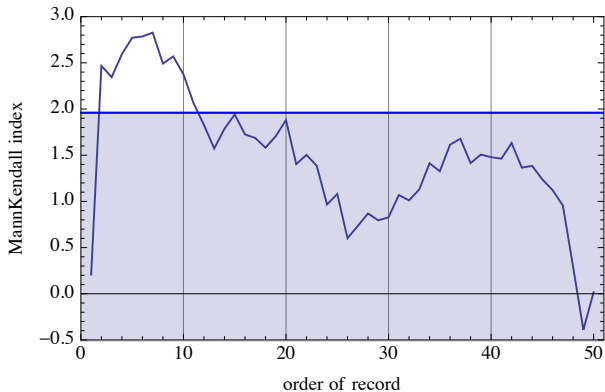


図-4 全国50カ所の気象官署の記録(1901-2005)の各順位のMann-Kendall Index

(2) 全国155カ所の気象官署資料

図-1に示したように全国155カ所の気象官署における降水量観測は徐々に増えてきた。各年の全国の日雨量150mm以上の回数をその年の観測所の数で除した観測所当たりの生起回数の推移を表したものが図-5である。1935年頃まで0.2あまりだったものが1940年以降は0.4前後とほぼ倍になっている。観測所数が100カ所を超えた1940年以降の観測所当たりの日雨量150mm以上の降雨事象はMann-Kendall検定によると有意には増えていない。ただ、傾向としては増加傾向にある。図-6は各年の日雨量の最大値と第5位および第15位の値の推移を比較したものであり、5年の移動平均を太線で示している。最大値の変動が激しく、明瞭な増加傾向は見られないが、5

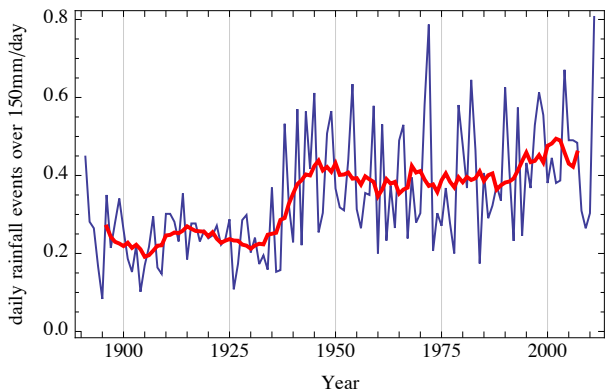


図-5 全国155気象官署の観測所当たり日雨量150mm/day以上の回数の推移とその10年移動平均

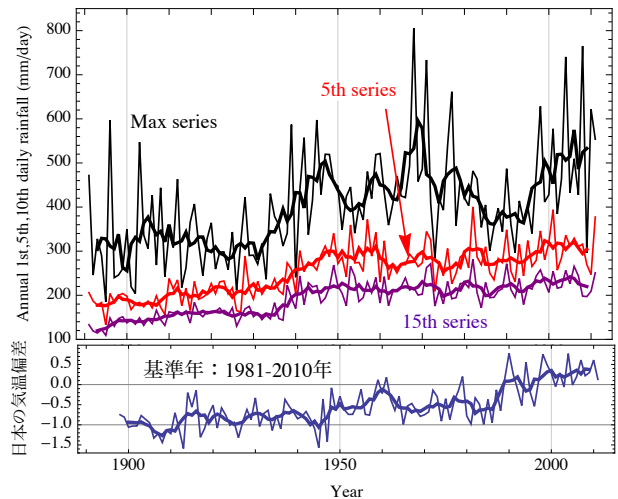


図-6 全国155気象官署の各年日雨量の最大値と第5位、第10位の値の推移と1981~2010年の30年平均値を基準とした日本の気温偏差

位の方は1960年頃まで徐々に増えていることおよび1925年頃までは年変動が小さいのに対し、それ以降は大きくなっているのがわかる。15位は1940年頃に急増する点を除けば5位とほぼ同様な傾向である。また、同図の下に示した日本の気温偏差と比べると最大値より5位または15位の方が気温偏差の変化傾向とよく調和している。全期間でKendall τ テストを行うと1930年頃から降水量が急に増加することを反映して、気温偏差と相関があると判断される。しかし、1940年以降では、各年の値には有意な相関はないが、移動平均をとると最大値は相関はみられないものの5位と15位は気温偏差と有意な相関がある。

(3) AMeDAS資料

AMeDASは全国に約1300カ所配置されており、その平均的な密度は17km四方に1カ所である。この資料を用いて、1976-2008年における観測所当たりの100mm/24hおよび150mm/24hと気象官署の100mm/dayを比較したものが、図-7である。プロットは両者が良好な比例関係にあることを示しており、平分線は気象官署100mm/dayに比べAMeDAS100mm/24hは2.7倍の回数観測していることを示している。一般的に、日雨量より24時間雨量の方が多く、これらは直接比較することはできないが、AMeDASが気象官署に比べ山間部も含めて網羅的に観測していることもこの違いに影響していると考えられる。赤丸のプロットはAMeDAS150mm/24hと気象官署100mm/dayの散布図であり、この平分線の傾きは1.0であり、両者がほぼ匹敵することを示している。

次に、AMeDASの時間雨量 n mm以上の降雨回数

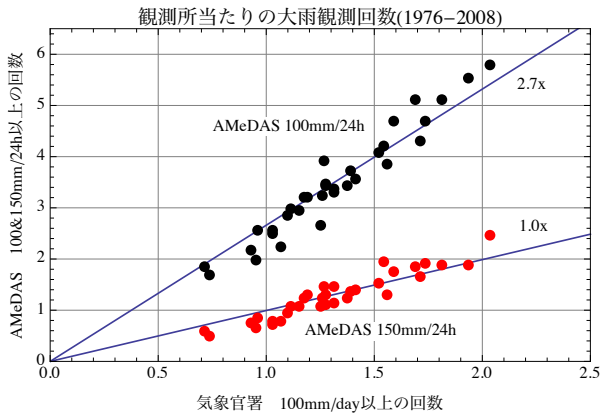


図-7 気象官署とAMeDASの観測所当たりの大雨観測回数の比較(1976-2008)

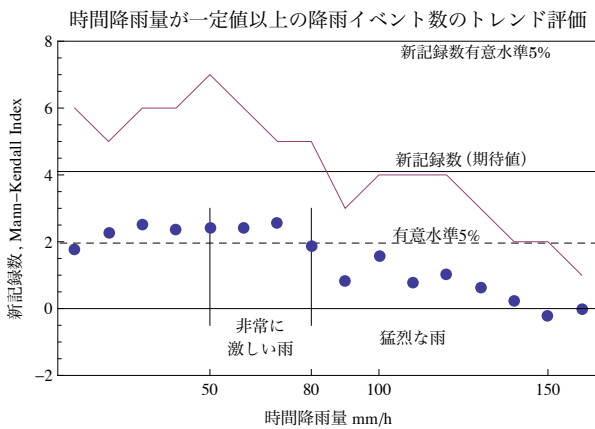


図-8 AMeDAS時間降雨量 n mm以上のトレンド評価(1976-2008)

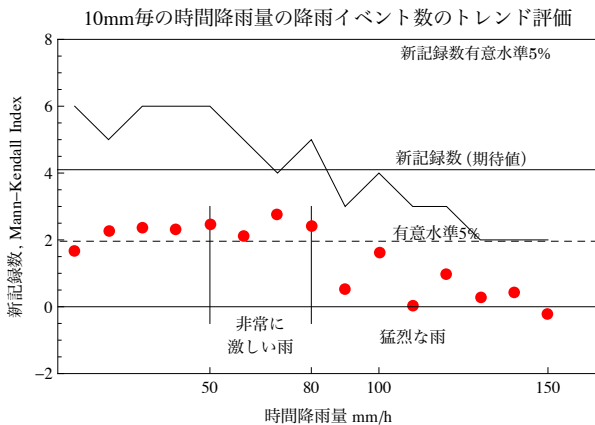


図-9 AMeDAS時間降雨量 n mm以上 $n + 10$ mm 未満のトレンド評価(1976-2008)

の時系列の定常性を調べる。図-8は閾値を10mm毎に変化させてMannKendall検定(青●)と新記録の回数(紫線)により調べたものである。同図からMannKendall検定では時間降雨量閾値が20mm~70mmのものが有意水準を超えており、有意に増加と判断される。新記録検定では10mm~80mmが期待値を超えているが有意水準8個には達しておらず、有意で

表-1 k 時間雨量 n mm以上の降水量のトレンド評価

| 閾値 (mm) | 10 | 30 | 50 | 80 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |
|---------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|
| 2h | 2.06 | 2.11 | 2.51 | 2.60 | 2.53 | 1.65 | | | | | |
| 3h | 1.75 | 1.66 | 2.05 | 2.62 | 2.40 | 2.27 | | | | | |
| 6h | | 1.66 | 2.05 | 2.62 | 2.40 | 2.27 | -0.38 | -0.03 | | | |
| 12h | | | | 1.81 | 1.91 | 1.70 | 1.97 | 2.14 | 2.24 | | |
| 24h | | | | | 1.53 | 1.75 | 1.84 | 2.08 | 2.14 | 2.06 | 2.34 |

はないが、上昇傾向であることがわかる。図-9は時間雨量 n mm以上 $n + 10$ mm未満の降水量の発生回数の傾向をみたものであり、MannKendall検定(赤●)では n が20mm~80mmで有意に増加している。新記録検定(黒線)では10mm~60mmおよび80mmの範囲で期待値を超えているが、増加が有意と判断されるほどではない。表-1は k 時間雨量 n mm以上の降水量の発生回数のMannKendall検定の結果を示したものであり、黄色でハッチした部分が統計量 $Z \geq 1.96$ であり、有意に増加していると判断される。

3.2 諸外国における検討, 対応状況

「非定常性、水文頻度解析、水マネジメント」WSにおける主な意見は次のとおりである。

- ・現在の变化は定常の範囲内との意見有り。
- ・「定常性は死んだ？」に異論有る一方で、水文の専門家ははじめから水文資料は定常とは思っていない。
- ・Bulletin 17Bの改訂の共同委員会が始動(USGS, USACE, Bureau of Reclamation, FEMA)。
- ・洪水頻度解析にLPIII分布、ダムにPMP/PMF、堤防にSPFを使う。
- ・NOAAは5分~60日の降雨の頻度分布を出版。
- ・イギリスはGEV, オーストラリアもこれにならう。欧州や日本がとっている方法を調査すべき。また、WMOが取りまとめたガイドライン(2009)の注目すべき部分は以下のとおりである。
- ・トレンドの検出には線形トレンドよりKendall τ テストを用いる。
- ・トレンドの判断は地点資料ではなくなるべく多くの資料を用いる。トレンド抽出のための多くの指標を定義している。
- ・極値解析には極値理論に基づくGEVまたはGPを用いる。
- ・非定常な資料に対しては共変量を有する極値分布を用いて解析する。
- ・定常・非定常解析用のツールキット“extRemes”を紹介している。(“R”という統計解析用のオープンソースのフリーソフトウェアで使える)

本研究において使用しているMannKendall検定は時系列資料のトレンド判定にKendall τ テストを適用したものと同一判断が得られるものであり、他も概ねWMOのガイドラインの方向に沿うような整理をしている。

3.3 気候変動下における水文統計解析手法の提案

気候変動下においては平均値や分散等の統計量が時間的に変化するため、確率分布も時間的に変化する必要がある。GEVは式(1)で表されるように3つの母数 ξ 、 α 、 κ を有しており、これらは、変数の平均値、分散、ひずみと関係している。時間変化を表せるようにこれらの母数を時間 t の関数として次のように表し、これらの母数を最尤法で推定する⁸⁾。

$$\xi(t) = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2 \quad (10)$$

$$\alpha(t) = \exp(\gamma_0 + \gamma_1 t) \quad (11)$$

$$\kappa(t) = \delta_0 + \delta_1 t \quad (12)$$

母数 α および κ の時間変化項が無視できる場合には資料からトレンドを除去して従来の定常解析を適用すれば良い。そうでない場合は資料から式(10)~(12)の右辺に含まれるパラメータを最尤推定する。

図-10は熊本の1901~2004年の日降水量にGP分布を適用した事例を示している。時間とともに3つの母数(位置母数、尺度母数、形状母数)が徐々に増えているのがわかる。

この事例では、共変量として時間 t の場合を示したが、気候変動下では単に時間的に変化する非定常ではなく気温等降水量に影響する物理量の方が説明しやすい。なぜならば、図-10のような場合、数百年後には母数が非常に大きな値になるが、そのような変化を想定することは難しい。一方、IPCC第4次評価報告書⁹⁾が示すように、温室効果ガス排出シナリオ毎に地上気温の予測は異なっており、適応策の導入により気温上昇が抑制されるものがある。このような状況に適切に対応するには、共変量として t ではなく、気温等の降水量に関係の深い物理量を選択する必要がある。

4. まとめ

本研究では、気候変動下における水文統計解析手法に関する検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 100年以上の資料でも最大値だけでは適切な判断は難しい。WMOのガイドラインにもあるように多くの資料により判断する必要がある。閾値超過

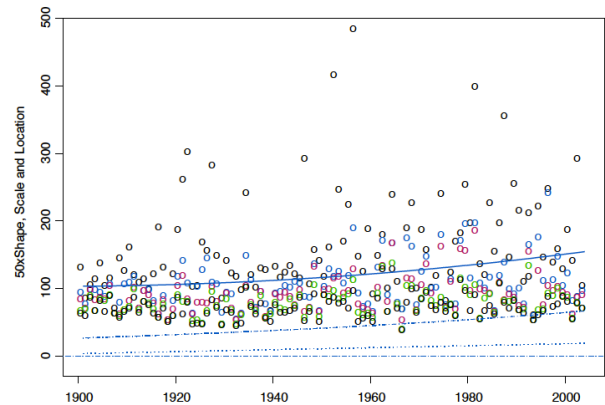


図-10 熊本の日降水量に時間変化を考慮したGP分布をあてはめた事例

資料の解析からは緩やかな増加傾向およびばらつきの増加傾向が抽出できた。

- 2) 諸外国における気候変動下の統計解析手法の動向を調べ、本研究の解析手法に取り入れた。
- 3) 今後の水文統計解析手法を提案した。
- 4) 水文統計解析データベースを整備した。

今後は資料の蓄積とともに提案した手法を適用していく必要がある。

参考文献

- 1) Stedinger, J.R., R.M. Vogel, and E. Foufoula-Georgiou: Frequency Analysis of Extreme Events, Chap.18, Handbook of Hydrology, (Ed.) D. R. Maidment, McGraw-Hill, New York, pp.18.1-18.66, 1993.
- 2) Salas, Jose R.: Analysis and Modeling of Hydrologic Time Series, Chap.19, Handbook of Hydrology, (Ed.) D. R. Maidment, McGraw-Hill, New York, pp.19.1-19.72, 1993.
- 3) Hipel, K.W. and McLeod, A.I.: Nonparametric Tests For Trend Detection, Chap.23, Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems, <http://www.stats.uwo.ca/faculty/aim/1994Book/>
- 4) 竹内 啓, 藤野和建: スポーツの数理科学—もっと楽しむための数字の読み方—, 応用統計数学シリーズ, 共立出版株式会社, p.181, 1988.
- 5) 竹内邦良: 「米連邦水関係機関共催「非定常性, 水文頻度解析, 水マネジメント」ワークショップ参加報告」, 河川, 2010-2, pp.90-96, 2010.
- 6) WMO : Guidelines on Analysis of extremes in changing climate in support of informed decisions for adaptation, Climate Data and Monitoring, WCDMP-No.72, WMO-TD No.1500, p.52, 2009.
- 7) Milly, P.C.D., J. Betancourt, M. Falkenmark, R.M. Hirsch, Z.W. Kundzewicz, D.P. Lettenmaier and R.J. Stouffer: Stationarity is dead: Whither Water Management? *Science*, Vol.319, no.5863, pp.573-574, 2008.
- 8) 高橋倫也: 極値統計学, 統計数理研究所, 公開講座資料, p.57, 2008.
- 9) Climate Change 2007: Synthesis Report, http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf.

A Study on Statistical Analysis of Hydrologic Data under Climate Change

Budget: Grants for operating expenses
General account

Research Period: 2009-2011

Research Team: ICHARM

Author: Shigenobu Tanaka,
Kazuhiko Fukami,
Daisuke Kuribayasi, Akiko Hiroe

Abstract

In flood-control and water-use planning, project goals have been discussed and adopted based on calculation of rainfall and discharge with a certain probability of occurrence estimated from past hydrological records of the target basin on the condition that hydrological phenomena, such as rainfall and discharge, are stationary. However, recent research has pointed out that time series data on such phenomena have shown a certain trend due to climate change impact with an increasing width of fluctuation. In this study, we first reviewed trend characteristics of domestic hydrological data and examined approaches used in overseas research to analyze such data, and then discussed the possible development of hydrological databases and approaches for data analysis applicable under climate change conditions.

The study found an upward trend in average and fluctuation width regarding hydrological data over some threshold though annual maximum series don't show such tendency. We also proposed a data analysis approach applicable under climate change conditions by reference to ideas from those presently in use overseas.

Key Word; Climate Change, Hydrological Frequency Analysis, Non-stationarity, Extreme Value Distribution, Mann-Kendall Test