

我が国における降水量の長期変化と極端降水量の増加

Long-term Variation in Precipitation and Increase in its Extreme in Japan

田中茂信

Shigenobu TANAKA

Synopsis

It is important to know current situation of hydrological condition including its tendency for effective water-related disaster risk management. This study investigates trend and extreme characteristics of recent precipitation in Japan with AMS(Annual Maximum Series) and POT(Peaks Over Threshold(100mm)) at 155 meteorological observatories. It shows that most rainfall stations show slight decrease trend in annual precipitation but slight increase in annual maximum daily precipitation. Average of all rainfall stations in Japan is in significantly increasing trend. Events exceeding 100mm/day is significantly increasing in 1901-2014 while 1940-2014 is in just slight increase. Even in 1940-2014, the largest 50th rainfall in Japan shows significant and steady increase. These results show the importance of POT analysis not only AMS data. The advantage of this method would be with not only observation data but GCM data.

キーワード:日降水量, Mann-Kendall検定, AMS, POT, GP, 閾値

Keywords:daily precipitation, Mann-Kendall Test, AMS, POT, GP, threshold

1. はじめに

近年, 集中豪雨や大雨による洪水氾濫, 浸水被害が発生するとその原因として気候変動との関係の話題が報道されることが多い. 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)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」と報告している. 一方, 地球温暖化予測情報第8巻(気象庁, 2013)は, わが国の日降水量資料(統計期間1901~2011年)をもとに100mmおよび200mm以上の日数の長期変化について, 有意な増加傾向があることを示している. また, 統計期間1976~2011年のアメダス1時間降水量により, 50mm以上の短時間強雨の発生回数が有意な増加傾向であることを示している. しかしながら, 異常気象レポート2005(気象庁, 2005)などいくつ

かの研究で, 強い降水が多い期間があることが指摘されている. 本研究では単に長期間の直線回帰で見るのではなく, より細かく期間ごとの変化をみる. さらに, 短い期間の資料による極値推定については資料数の少ない年最大値(AMS)のみでなく閾値超過資料(POT)の観点からも極端降水の変化傾向を評価する.

2. データと解析方法

Fig. 1に示すように, 我が国には現在観測が続けられている気象官署が155カ所ある. 1901年からは気象庁等, 国のレポートでよく使われる51カ所を含め59カ所の観測資料がある. 1940年に100カ所を上回り, 1970年に155カ所となる. Fig. 2にこれらの位置図を示す. 関東, 中部, 近畿中央部, 九州の密度が比較的高く, 中国, 四国, 東北, 北海道中央部から東部の密度が比較的低いことがわかる. また, 1976年か

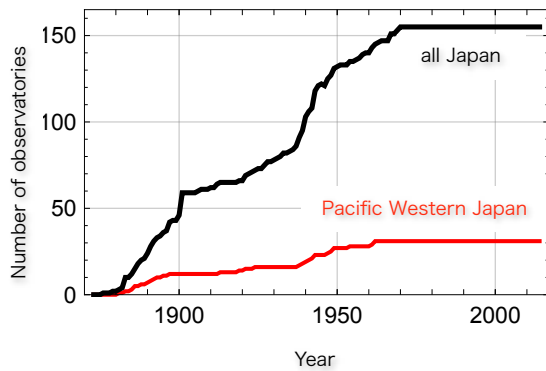


Fig. 1 Number of meteorological observatories in Japan

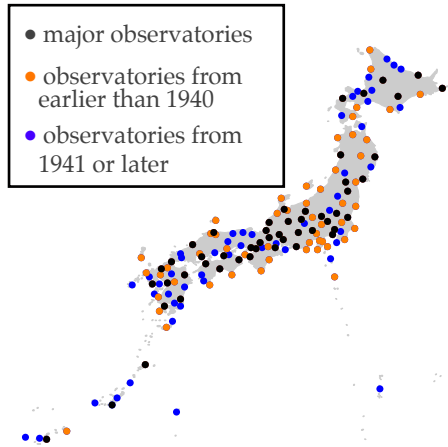


Fig.2 Distribution of meteorological observatories in Japan

らは1000カ所以上のAMeDAS観測が継続されている。本研究では長期変化に注目し、気象官署の観測開始年（1月から観測がない場合は次の年）～2013年の日降水量を用いる。前述の気象庁資料は51カ所（以下、主要気象官署）の気象官署の1901年以降の資料を用い、日降水量が100mm、200mm以上となる大雨の年間日数の変化は信頼度水準95%で有意な増加となっていることおよび1930年代までと1940年代以降には出現数や年々変動に差が見られることを示している。本研究では、気象官署で蓄積されている日降水量資料を用いて、年降水量、年最大日降水量、日降水量100mmを超える大雨の観測所あたりの日数、上位n位の値の変化傾向を見るとともに1940年以降の西日本太平洋側と全国の日降水量の閾値超過資料を極値解析することにより100年確率降水量の変化傾向を調べる。

2.1 Mann-Kendall検定による変化傾向の判定

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（例えば、Hipel and McLeod(1994)）。

本検定の帰無仮説 H_0 と対立仮説 H_1 は、 n 個のデータを $\mathbf{X}=\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ とすると、次のとおりである。

H_0 : \mathbf{X} が独立で同一の確率分布に従う。

H_1 : \mathbf{X} が同一の確率分布に従わない。

Mann-Kendall検定においては、式(3)で与えられる統計量 Z を定義する。

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

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

$$Z = \frac{S - \text{sign}(S)}{\sqrt{\text{Var}}} \quad (3)$$

ここに、 $\text{sign}(\cdot)$ は符号関数であり、 e_i はデータ \mathbf{X} を昇順に並べた時、同じ値が連続して出現する個数を表し、 m はその組数を表す。有意水準を α とすると、標準正規変数 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る。また、 $S > 0$ のとき、水文時系列資料 \mathbf{X} は上昇傾向であることを示し、 $S < 0$ のときは下降傾向であることを示す。

2.2 極値理論による極端事象の推定

水文時系列資料が定常と考えられるとき、極値解析を行う際の資料の抽出方法として、区分最大値（資料）と閾値超過資料があり、それぞれ一般極値分布および一般パレート分布を適用する（高橋(2014)）。

(1) 区分最大値資料による解析

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抽出した水文資料を区分最大値（資料）という。一般に良く用いられている年最大値資料(Annual Maximum Series, 以下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, 以下GEV) である。GEVの確率分布関数は次式で表される。

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

ここに、 ξ : 位置母数、 α : 尺度母数、 k : 形状母数であり、 $k=0$ の場合がGumbel分布である。

なお、GEVは $k < 0$ の場合、次式で表される上限値を有する。

$$x \leq \xi - \alpha/k \quad (5)$$

(2) 閾値超過資料による解析

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 (POT : peaks over threshold, 以下POT) を用いる方法もある。年最大値資料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, 以下GP) があり、次式で表される。

$$F(x) = 1 - \left(1 + k \frac{x - \xi}{\alpha}\right)^{-1/k} \quad (6)$$

ここに、 ξ : 位置母数, α : 尺度母数, k : 形状母数であり、 $k = 0$ の場合が指数分布である。

なお、GPは $k < 0$ の場合、次式で表される上限値を有する。

$$x \leq \xi - \alpha/k \quad (7)$$

極値分布に関する上記式(4)～式(7)において形状母数の定義が正負逆のものもあるので注意が必要がある。

3. 結果

3.1 年降水量

Fig. 3の上の図は全国平均年降水量の時系列を主要気象官署と全ての観測所について示したものであり、実線が全気象官署、破線が主要気象官署のみに対応しており、それぞれ太線は10年の移動平均値である。下の図は横軸に示した年から2013年までの資料を用いてMann-Kendall検定を年毎に行った結果であり、縦軸のMann-Kendall統計量が1.96を超えるとその年以降の資料は有意水準5%で増加傾向であることを示す。上の図と下の図は横軸を等しくとって配置している。1940年前後から年々変動が大きくなっている。1901年からの変化傾向は主要気象官署は有意ではないが減少傾向にあるのに対し、全気象官署のほうは有意ではないが増加傾向にある。1940年以降のMann-Kendall検定の結果は似たような値を取り続けている。これは、1940年に全観測所が103ヶ所となり、それ以降に追加された観測所によって平均値の変化傾向が大きな影響を受けていないことを示唆している。

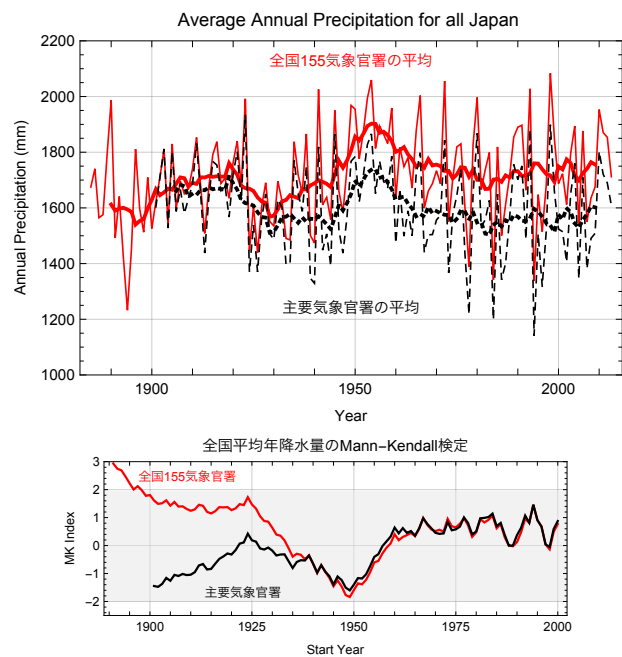


Fig. 3 Variation of average annual precipitation

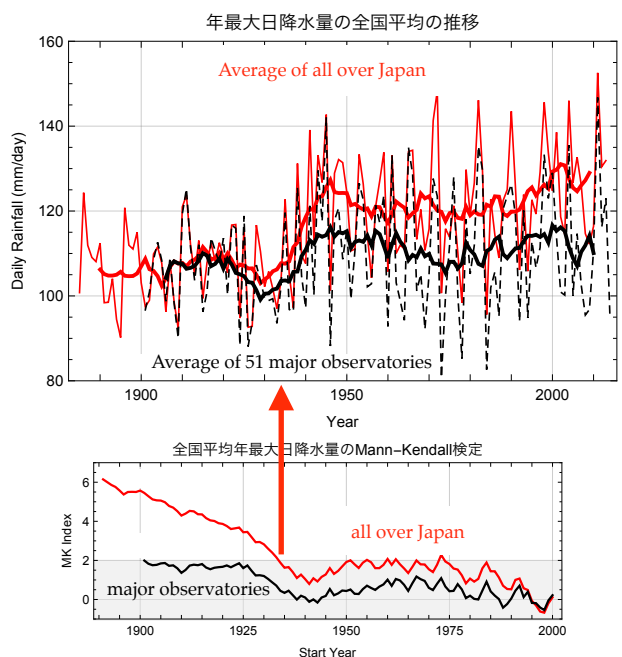


Fig. 4 Variation of average annual maximum daily precipitation

3.2 年最大日降水量

Fig. 4は年最大日降水量の全国平均の変化である。下の図はFig. 3と同様の方法でMann-Kendall検定の結果を示したものである。主要気象官署の資料は1901-1930頃～現在までの期間において有意ではないが増加傾向を示すが、それ以降は減少、増加傾向を示し、明確な変化傾向を示すことはない。全ての気象官署の資料を用いると1930年以前から現在までの資料は

有意な増加傾向を示す。それ以降1990年までから現在の資料は有意とは言えないが増加傾向である。

年降水量および年最大日降水量ともに主要気象官署の平均は1930年頃まではそれほど大きな年変動が見られないが、1940年代からは大きな年変動が見られ、日本全体が3ないし4年周期の大きな変動にさらされているように見える。

Fig. 5は各気象官署について縦軸と横軸にそれぞれ年降水量と年最大日降水量の観測開始以来の資料のMann-Kendall検定の結果を示したものである。中央の灰色の部分にはMann-Kendall統計量の絶対値が1.96以内の範囲であり、増加および減少傾向は統計的に有意ではない。熊本は年降水量および年最大日降水量ともに有意に増加している。他に有意な変化を示すところもあるが多くは中央の灰色の範囲にある。第4象限にあるものは統計的に有意ではないが年降水量が減って年最大日降水量が増加するという傾向である。逆の第2象限のものはわずかしがなく、Mann-Kendall統計量の絶対値も小さい。

3.3 大雨日数

気象官署の数が年を追って変化するので大雨の日数の経年変化を正しく評価するには観測所あたりの生起数で見る必要がある。日雨量100mm以上の年間イベント数を気象官署あたりで整理したものがFig. 6で

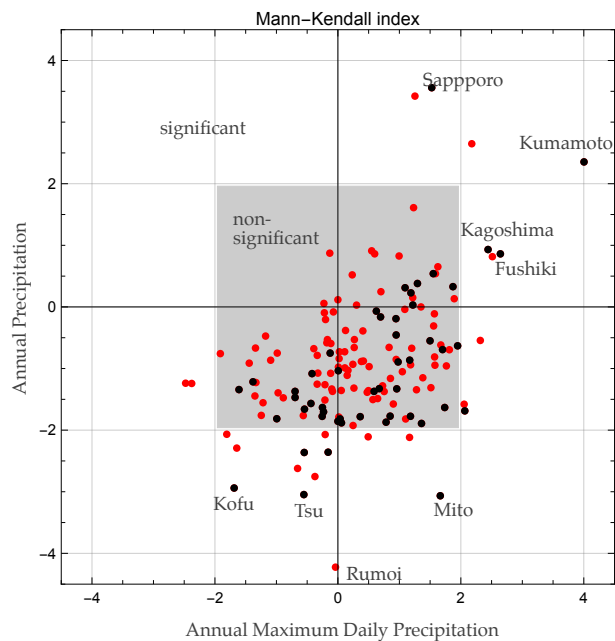


Fig. 5 Trends of annual precipitation and annual maximum daily precipitation of each observatories

ある。同図下の図から主要気象官署、西日本太平洋側及び全気象官署ともに1930年以前から現在までの傾向は統計的に有意な増加傾向を示すが、1940年以降は有意な増加傾向はみられない。また、西日本太平洋側の1950年前後の値は全国の値のほぼ倍である。

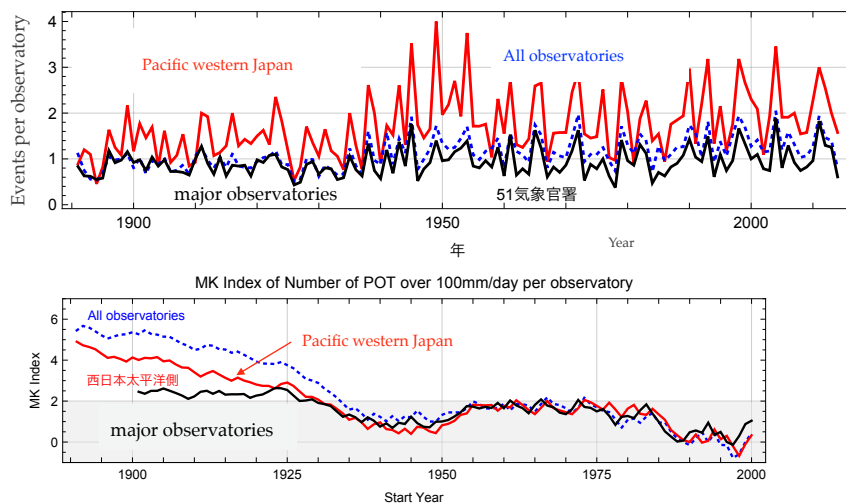


Fig. 6 variation of events $\geq 100\text{mm/day}$ per observatory

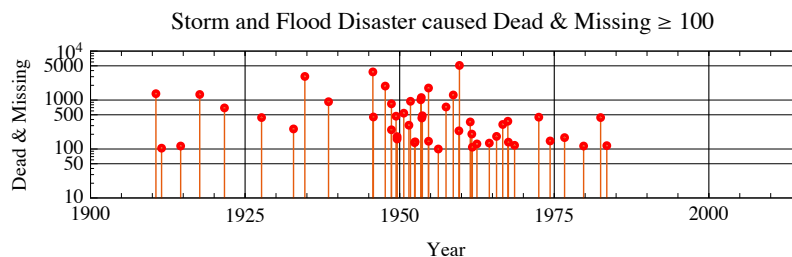


Fig. 7 storm and flood disaster caused dead and missing ≥ 100 since 1900

この時期ほど大きな値はそれ以降見られない。また、全国155カ所と51気象官署と比べると、気象官署が100箇所を超えた1940年以降は前者の方が1箇所あたりの回数が少し多い。ここには示していないが、1940年には既に観測開始していた103箇所と全国155箇所との1箇所あたりの回数はほとんど同じである。従ってFig. 6の全国155カ所と51カ所の1箇所あたりの回数の差は主に1901年以降1940までに観測開始された気象官署の資料が大きく影響していると考えられる。Fig. 7に示すように、1950年前後の期間は1900年以降、我が国の大規模暴風洪水土砂災害が非常に多かった時期に相当している。戦後の国土の疲弊などいろいろな条件が重なった結果であろうが、戦前の状況と比べると大雨の要因は大きいと思われる。

3.4 上位n位の降水量

Fig. 8は全国あるいは西日本太平洋側の地域における降水量資料の一つの標本としたものの各年の上位1位、10位および50位の経年変化を示したものである。この図でも1930年代以前の資料はそれ以降の資料とは異なる傾向にあることが明瞭である。西日本太平洋側の1位の部分にある●印はその年の全国1位に重なっていることを示す。1940年以前には西日本太平洋側の1位が全国の1位であった年が多いことがわかる。全国155カ所の最大値が1940年以降の資料では増減の傾向がないのに対し、50位の資料は有意に増加している。経年変化も着実に増加が見られる。10位

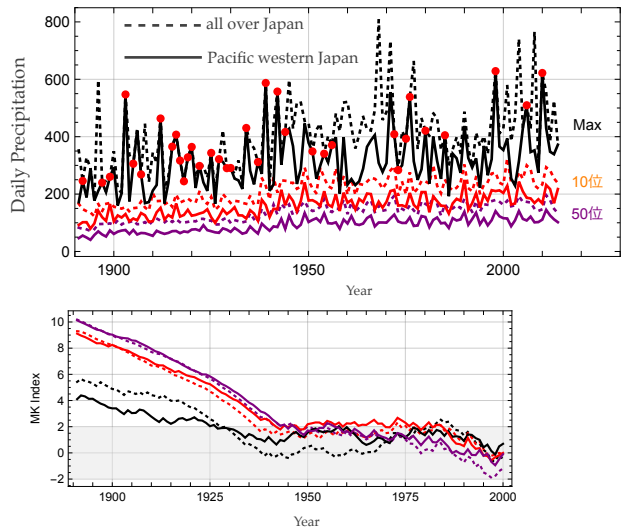


Fig. 8 variation of the largest 1st, 10th and 50th precipitation for all over Japan and Pacific western Japan

については西日本太平洋側は有意に増加しているが全国は増加しているものの有意ではない。

3.5 極端降水量の推定

Fig. 9は全国および西日本太平洋側地域について、1940年以降の日雨量100mm以上の資料を25年毎に区切りGumbel確率紙にプロットするとともにGP分布をそれぞれにあてはめたものである。上位数個のプロットとGPは少し乖離があるものの他は概ね良好である。この乖離は1940~1964年の資料で顕著である。年代ごとに徐々に確率プロットおよびGPの分布曲線が右にシフトしており、例えば、非超過確率0.99に対応す

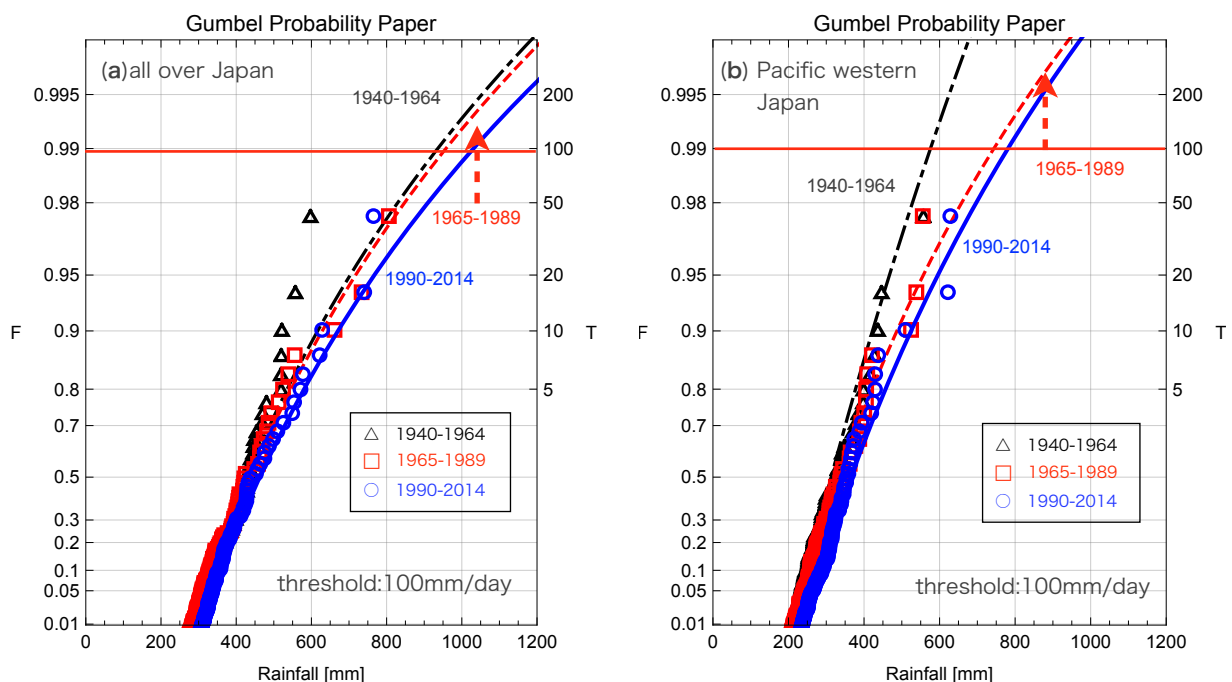


Fig. 9 probability plot and fitted GP distribution of daily precipitation POT in successive quarter of a century since 1940

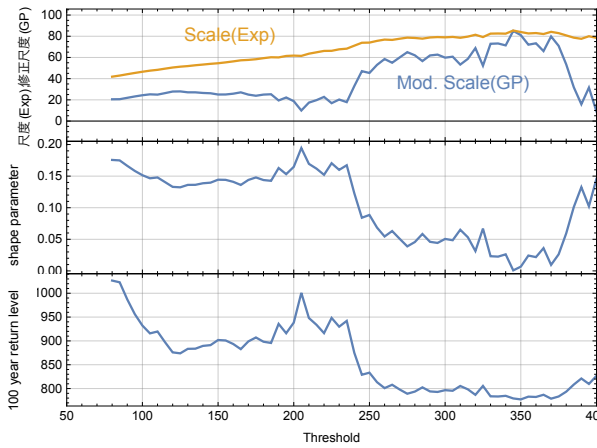


Fig. 10 sample mean excess function for all over Japan POT and 100 year return level during 1940-2014

る確率降水量，すなわち，長い目で見れば平均的に100年に1度起きるような日降水量は（図中の赤線とGP分布の曲線が交差する横軸の値）も年代ごとに大きくなっていることがわかる． Fig. 9(a)の1940-1964（黒）と1965-1989（赤）のように分布曲線が平行移動していることは年代ごとに位置母数のみが増加していることを示す． 一般に気候変動により極端事象は平均と分散が大きくなると言われているが，1940-1964と1965-1989の差に比べ1965-1989と1990-2014の差は大きくなっており，1990-2014において少し変動が大きくなっていると見られる．

これまでの資料整理が100mm以上の資料を用いた関係上同じ閾値を用いたが，次に閾値の選定について

検討する． Fig. 10は全国155気象官署の1940-2014の資料について閾値(threshold)80~400mmまで5mm間隔で，Expの尺度母数(scale parameter)，GPの修正尺度(modified scale)および形状母数(shape parameter)，GPによる100年確率降水量(return level)を示したものである． 高橋(2014)によるとExpの標本平均超過関数，GPの修正尺度および形状母数の値が一定となる下限を閾値として選ぶとあるので，GPは120mmないし260mmが候補となる． Expは一定となる部分がないが，あえて選ぶと270mmである． Fig. 11は閾値をそれぞれ(a) 120mmと(b) 260mmとした場合のGumbel確率紙へのプロットであり，AMSも合わせて示してある． AMSのSample Sizeは75で最小値は241mmである． (b)のPOTの閾値260mmはAMSの最小値より大きい，Sample Sizeは390とAMSの5倍以上ある． この確率プロットから，本資料にExpを適用することは難しいことがわかる． GPはPOTの全領域にわたってうまくフィッティングしている． 200~240mmのあたりを境に標本が少し異なる特性を持っているように見える． AMSに当てはめたGumbel分布およびGEVはほぼ重なっているが，AMSの下位のデータは変量が同様の値を持つ範囲のPOTとは異なる傾向にあり，GEVとGPのフィッティング曲線が異なる原因の一つとなっている． (b)で見ると，AMSを用いたGEVよりPOTを用いたGPの方が，100年確率降水量で30mm余り大きくなっている． Fig. 8に示したようにAMSの年々変動は非常に大きく，サンプルサイズも小さいことから年代ごとの変化を見るのは難しいが，POTはこのことを可能

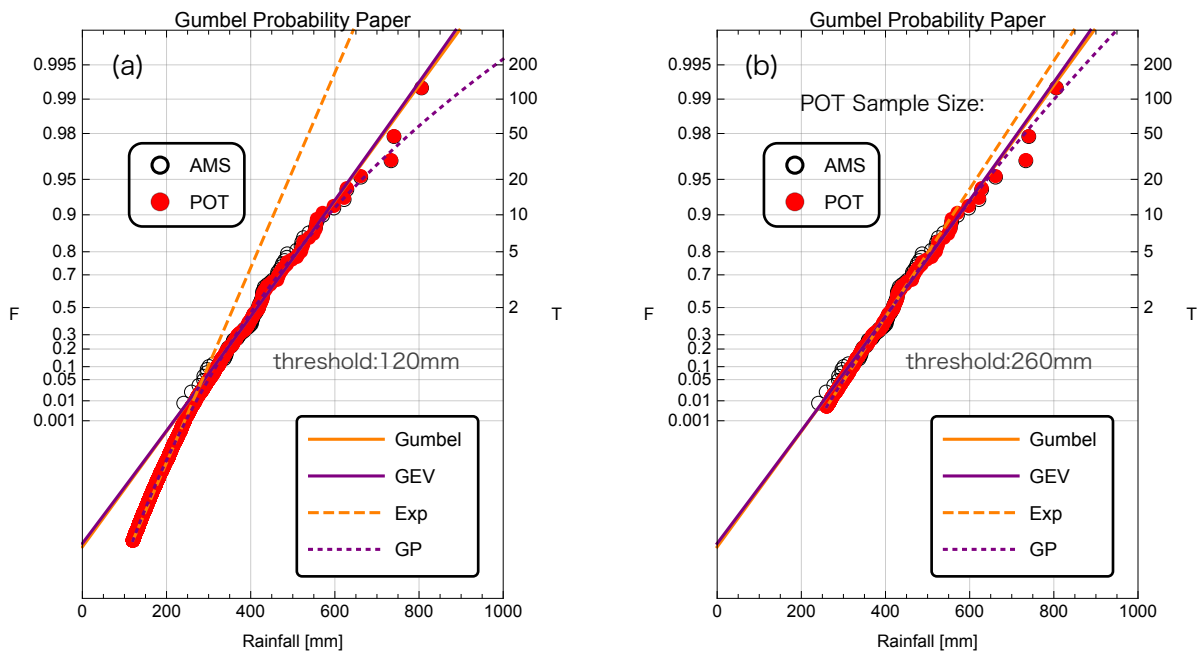


Fig. 11 probability plot of AMS/POT with GEV/GP fitting for daily precipitation all over Japan during 1940-2014

にする。ここで解析した全国の日降水量についてはGPによる解析が有効なことがわかった。

4. おわりに

気候変動に伴い豪雨災害が増えると言われている。全国の気象官署日降水量のPOTでそれを確かめることができた。今後は地域ごとの特性を検討する必要があるが、地域を細分すると標本が小さくなり、結果にばらつきが目立つ可能性が高い。どの程度の広がりを持った地域を対象に考えるべきか、閾値は選定しなおすべきかなど現実の資料をみると解決すべき課題がたくさん残っているが、気候変動は進行しているので精力的に進めていきたい。

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。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 気象庁(2005) : 異常気象レポート2005, http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/climate_change/2005/pdf/2005_all.pdf.
- 気象庁(2013) : 地球温暖化予測情報第8巻, www.data.jma.go.jp/cpdinfo/GWP/Vol8/pdf/all.pdf.
- 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_wgl_spm_jpn.pdf
- 高橋倫也(2014) : 極値統計学, <http://www.ism.ac.jp/~shimura/2014.12.8Bousai/03TakahashiS.pdf>
- 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/>

(論文受理日 : 2015年6月11日)