

2013年台風18号による淀川流域の洪水災害の外力評価

Frequency Analysis of Rainfall and Peak Discharge in the Yodo River Basin due to 2013 Typhoon 18

田中茂信

Shigenobu TANAKA

Synopsis

In 2013, Typhoon 18 hit Kinki area and caused serious damages. During the torrential rainfall an emergency warning for heavy rain was issued to Kyoto, Shiga and Fukui prefectures; it is the first in all Japan since the emergency warning was established on 30th August in 2013. This emergency warning is issued when rainfall of return period of several decades occurs. The basin average rainfall broke historical record for return period 200 years in 24 hours at the reference point Hirakata of the Yodo river. The flood water overtopped the embankment and caused inundation along the Katsura river. This manuscript describes frequency analyses of basin averaged rainfall and discharge at Hi-yoshi dam and six principal points in the Yodo river basin.

キーワード: 淀川, 日吉ダム, 流域平均雨量, ピーク流量, AMS, POT

Keywords: Yodo river, basin averaged rainfall, peak discharge, AMS, POT

1. はじめに

2013年9月, 台風18号が紀伊半島の沖を通過し, 16日8時前に豊橋市付近に上陸し, 三陸沖に抜けた. この影響で近畿地方は豪雨に襲われ, 8月30日に運用開始されたばかりの特別警報が初めて京都府, 滋賀県, 福井県に発令された. 大雨特別警報は数十年に一度の大雨となる恐れが大きい時に発表されるものである. 淀川水系の計画基準点枚方上流の流域平均24時間降水量が計画を超え, 桂川では溢水・氾濫が発生するほどの洪水となった. 淀川流域の日吉ダムおよび主要な地点の流域平均降水量やピーク流量について過去の観測値を用いて確率評価を行ったのでその概要を示す.

2. 降雨とその影響の概要

Fig. 1は台風が近畿地方に接近し, 大雨をもたらした9月14日~16日にかけての降雨の空間分布と桂観測所の時刻雨量および累積雨量を示したものである(近

畿地方整備局, 2013). 京都府, 滋賀県, 福井県の県境辺り, 滋賀・三重県境および紀伊半島南東部に累積雨量500mm以上の区域が分布しているが, 桂川流域ではその区域はほんの少しである. また, 桂観測所の最大時間雨量も40mm余りであり, 100mmを超える豪雨が珍しくない昨今においてそれほど強い豪雨ではない. 一方, 洪水対策の長期的な目標を示す河川整備基本方針における計画降水量や当面の整備目標を示す河川整備計画における雨量に対しては超過あるいは肉薄するレベルであった(Table 1).

Photo 1~6に桂川沿川の洪水時の状況を示す. Photo 1は嵐山地区の浸水範囲を示している. Photo 2は桂川の左支川鴨川の左岸で河川内の水位が高くなったことによって生じた噴砂の跡であり, この地区も危険な状態になっていたことがわかる. Photo 3は桂川右岸久我橋下流の越流地点での水防活動の状況である. Photo 4は観光名所である嵐山の渡月橋の9月16日午前9時頃の様子であり, 洪水流が橋桁に当たり危険な状況になっているのがわかる. Photo 5は

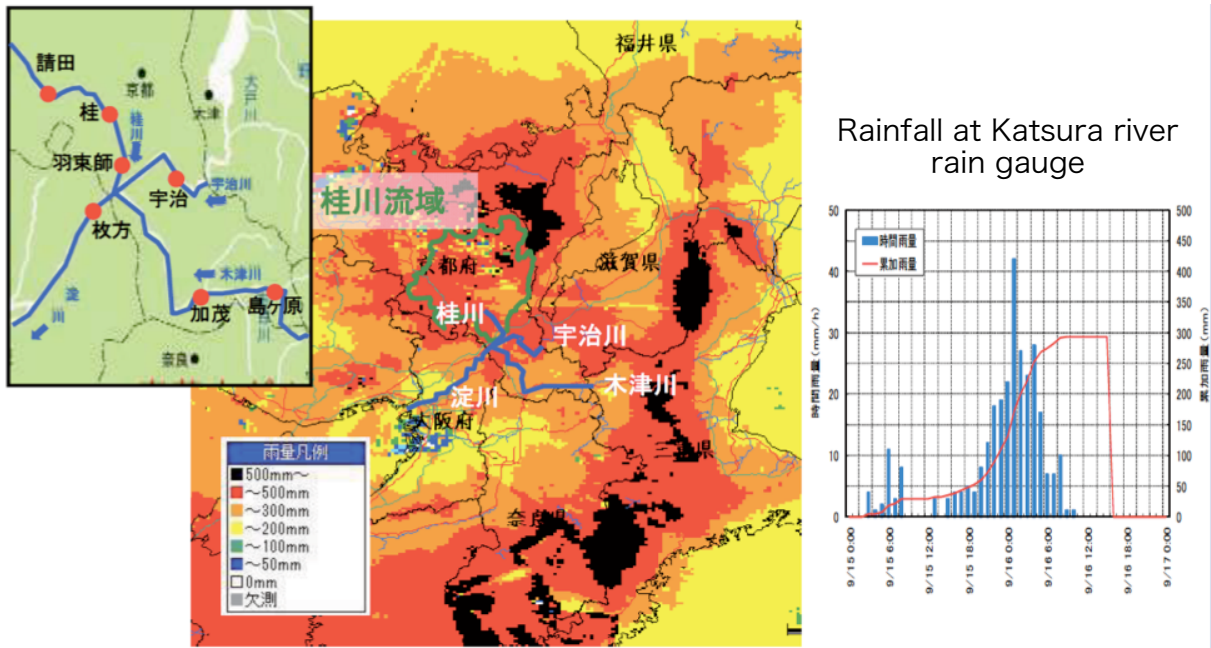


Fig. 1 Rainfall distribution during Sep. 14-16 due to Typhoon 18

JR亀岡駅の浸水状況であり、プラットホームのすぐ下まで水面が迫っている。Photo 6は亀岡駅の北側から見た亀岡盆地の浸水状況であり、広大な範囲が浸水しているのがわかる。

3. 降水量資料と流量資料

淀川流域内の日吉ダムおよび基準地点枚方および主要地点5地点における降水量および流量の資料を

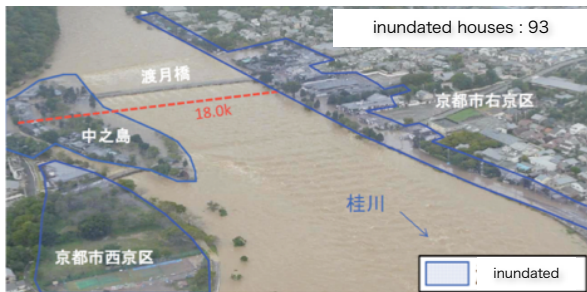


Photo 1 Inundation area at Arashiyama



Photo 2 Sand volcano back of left bank of the Kamo river

Table 1 Comparison rainfalls and discharges due to typhoon 18 with design values at principal points of the Yodo river basin

Location	Design Rainfall	R.I.D.P. Rainfall (1953 T13)	2013 T18 Rainfall	Design Discharge (m ³ /s)	R.I.D.P. Discharge (m ³ /s)	2013 T18 Discharge (m ³ /s)
Hirakata	261mm/24h	222mm/24h	269mm/24h	12,000	10,700	9,500
Uji	165mm/9h	161mm/9h	193mm/9h	1,500	1,500	1,300
Kamo	253mm/12h	186mm/12h	207mm/12h	6,200	4,900	3,900
Shimagahara	238mm/9h	196mm/9h	204mm/9h	3,700	2,800	2,300
Hadukashi	247mm/12h	174mm/12h	229mm/12h	5,300	3,600	3,500
Uketa	208mm/9h	174mm/9h	208mm/9h	3,500	2,500	2,500



Photo 3 Flood fighting during flood water overtopping area



Photo 4 Flood water hitting Togetsukyo bridge around 9:00 on Sep.16



Photo 5 Flood water about reaching the platform of JR Kameoka station



Photo 6 Inundation of Kameoka basin from JR Kameoka station

収集した。各地点の位置図をFig. 3に、各地点の上流域面積をTable 2に示す。これらの地点上流域平均降水量は1952年から蓄積されているが、日吉ダムを除く地点は2004年までの資料と2013年台風18号時の暫定値である。なお、淀川の洪水対策では琵琶湖

からの洪水時の放流量を $0\text{m}^3/\text{s}$ としているので、これ以降、本文では宇治と枚方についてはTable 2の括弧書きの数値を用いる。また、流量は上流のダムが無い場合の計算流量である。

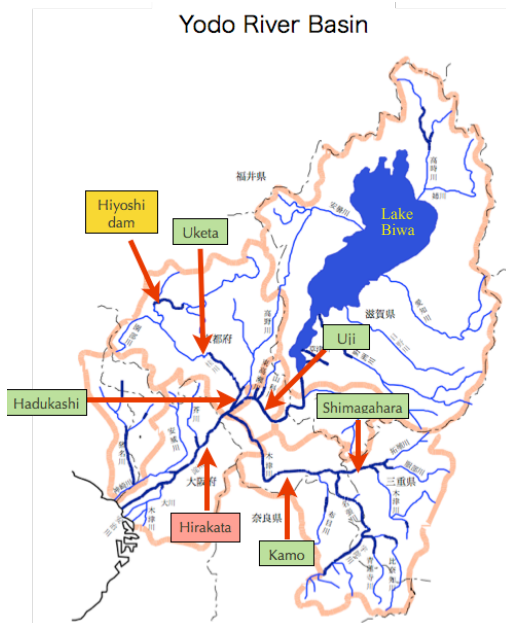


Fig. 3 Locations of analyzed principal points

Table 2 Catchment area at principal points

Location	Catchment Area (km ²) (excluding Biwa lake)	CA ratio to the reference point Hirakata(%)
Hiyoshi dam	290	8
Uketa	728	21
Hadukashi	1,077.9	31
Uji	4227 (379)	11
Shimazahara	523	15
Kamo	1,478.1	42
Hirakata	7,339.5 (3,491.5)	100

3.1 日吉ダム

日吉ダムは桂川上流に位置する多目的ダムであり、(独)水資源機構により1998年4月より管理が行われている。9月18日、国土交通省近畿地方整備局と(独)水資源機構は共同で、「日吉ダム(南丹市日吉町)流域では、9月16日0時から1時までの1時間の雨量が最大34.5mmを記録し、降り始めの9月15日2時から16日17時までの総雨量は345mmに達した」と発表しており、管理開始以来最大のダム流入量1,694m³/sを記録している(独)水資源機構, 2013)。ダムの計画は2日雨量349mmであるので、総雨量は計画にほぼ匹敵する量であったと考えられる。

ダム流域の降水量観測は1952年より流域平均降水量として日降水量が整理されている。(独)水資源機構から提供された資料によると、ダム流域内外含め建設前から現在まで28カ所の観測所で断続的に降水量観測が行われているが、時点毎に利用可能な観測所の資料を用いてティーセン法により流域平均降水量が求められている。なお、日界が9時のものと0時のものが混在しているが、多くの降水事例はそのほとんどが2日間で終了していることおよび日吉ダムの計画が2日降水量で検討されていることから、ここでは2日降水量を対象とし、経年変化特性を評価するとともに年最大値資料(AMS)と閾値超過資料(POT)を用いた確率評価を行う。

(1) 経年変化特性

Fig. 4に流域平均の2日降水量の年最大値の経年変化を示す。1960年ころにいくつか大きな降水を経験しているが、それ以降、2013年の台風18号まで300mmを超えるものは見られない。この時系列についてMann-Kendall検定を行ってみると5%有意水準で独立

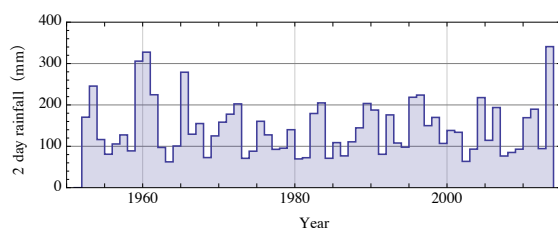


Fig. 4 Time series of Annual Maxima of catchment averaged 2-day rainfall at Hiyoshi dam

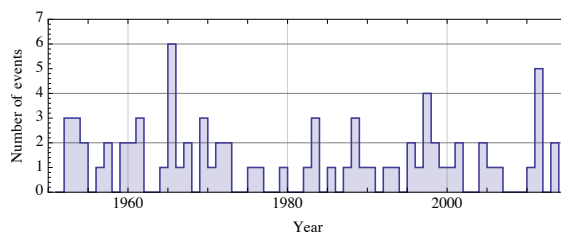


Fig. 5 Time series of number of 2-day rainfall events more than 100mm

で同一の確率分布にしたがうと判断されるが、若干、減少傾向である。Fig. 5は流域平均の2日降水量が100mmを超える事象の年毎の回数の経年変化をプロットしたものである。全期間で見ると年最大値と同様の結果が得られる。

なお、AMeDAS観測が開始された1976年以降の資料のみを用いた同検定では、流域平均の2日降水量の年最大値および100mmを超える事象の回数ともに5%有意水準で独立で同一の確率分布にしたがうと判断されるが、若干、増加傾向にある。

(2) 年最大値系列(AMS)を用いた確率評価

Fig. 6に年最大2日降水量をグンベル確率紙にプロットし、あわせてグンベル分布、一般化極値分布(GEV)をL積率法により母数推定し当てはめた分布曲線を示す。SLSCはグンベル分布0.029, GEV0.027でGEVの方が若干適合度がよいと判断される。しかしながら、年最大値系列の中でも上位の資料が上限を有するような並びとなっているにもかかわらず、GEVはTailの厚い分布となっており、リターンピリオドが大きくなるとより大きな確率水文学量を与える。この原因としては、年最大値系列の中でも上位の資料が上限を有するような並びでプロットされているにもかかわらず、サンプルの約1/4を占めている2日降水量が約90mm以下の下位の資料がほぼ同程度の値となっていて中上位の部分と傾向を異にし、上に凸でTailの厚い分布の当てはめになっているものと考えられる。1/100確率水文学量はグンベル分布が354mm(jackknife推定値も同値)、GEVが389mm(jackknife推定値387mm)であり、グンベル分布およびGEVで今回の345mmを評価するとリターンピリオドは、それぞれ85年および56年となる。

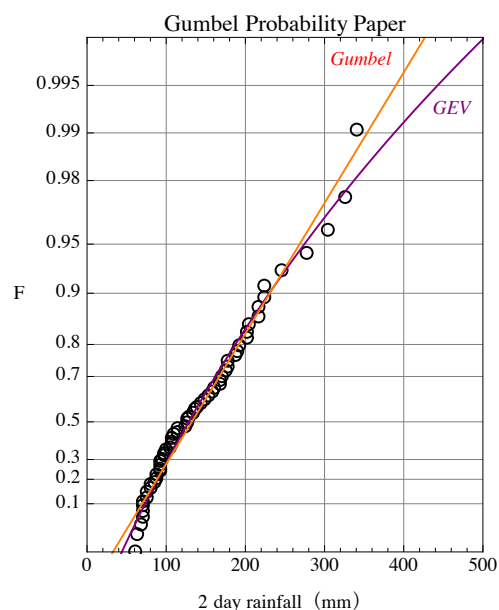


Fig. 6 Probability plot of AMS of 2-day rainfall

(3) 閾値超過資料(POT)を用いた確率評価

水文頻度解析にPOTを用いる際の課題の一つが閾値の選定であり、いくつかの手法が提案されている。一般に十分大きな閾値を超過する標本には指数分布(Exp)がよく当てはめられる。Expは、閾値を超過する部分の平均値から閾値を差し引いたものが閾値の大小にかかわらず一定となる性質を有しており、これを利用してPOTの順序統計量において、Expが当てはまる範囲を見いだすことができる。具体的には式(1)で表される標本平均超過関数(Sample Mean Excess Function, SMEF)を用いる(Reiss and Thomas, 1997)。

$$e_n(u) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - u) I(u < x_i)}{\sum_{i=1}^n I(u < x_i)} \quad (1)$$

ここにindicator function $I(u < x)$ は $u < x$ のとき1で、それ以外の場合0をとる。SMEFによる判断は、式(1)の値が一定となる u の下限値である。

前節で述べた年最大2日降水量が約90mm以下の資料の影響を見るため、POTの閾値を変えながらAMSと比較する。

Fig. 7右下に示すようにSMEFをプロットすると、この資料に相当と考えられる閾値109mmが得られる。Fig. 7左図はPOTの確率プロットとそれにExpと一般化パレート分布(GP)をあてはめた分布曲線をFig. 6に上

書きしたものである。この際、POTの資料と分布曲線それぞれについて式(2)を用いて変換している。

$$F(x) = \exp \{-\lambda (1 - G(x))\} \quad (2)$$

ここに、 $F(x)$: AMSの非超過確率、 $G(x)$: POTの非超過確率、 λ : POTの1年あたりの生起数である。POTは閾値以上のものしか抽出しないが、一般に閾値の大小により当てはめる確率分布の曲線が異なる。この資料の場合、閾値を徐々に下げていくと、閾値以上の中位の部分の資料とは特徴の異なる資料を含むことになり、結果的にExpの直線はより反時計回りに回転する。一方、GPの曲線(図中赤色破線)はGEVと同様、上に凸の曲線となってTailが厚くなる。

ここでは、標本平均超過関数により判断するとともに確率プロットも判断の参考にした。閾値109mmでのPOTを用いた結果はほぼグンベル分布の結果と同じになっている。閾値を95mm以下にしていくと徐々にGPがExpやグンベル分布から離れ、GEVに近づいていく。このように閾値を下げることは、洪水とは呼べないような出水の降水事象を含めて判断することを意味する。実際、日吉ダムは1998年に管理に移行しているが、洪水調節操作はほぼ総雨量95mm以上で行っている。水文頻度解析において、その小規模事象の含有の有無が外挿する部分の確率水量に大きく影響することがあるので、注意を要する。ここではAMSだけでなくPOTも併せて利用できたのでこのようなことが確認できたが、一般にAMSだけではこのよう

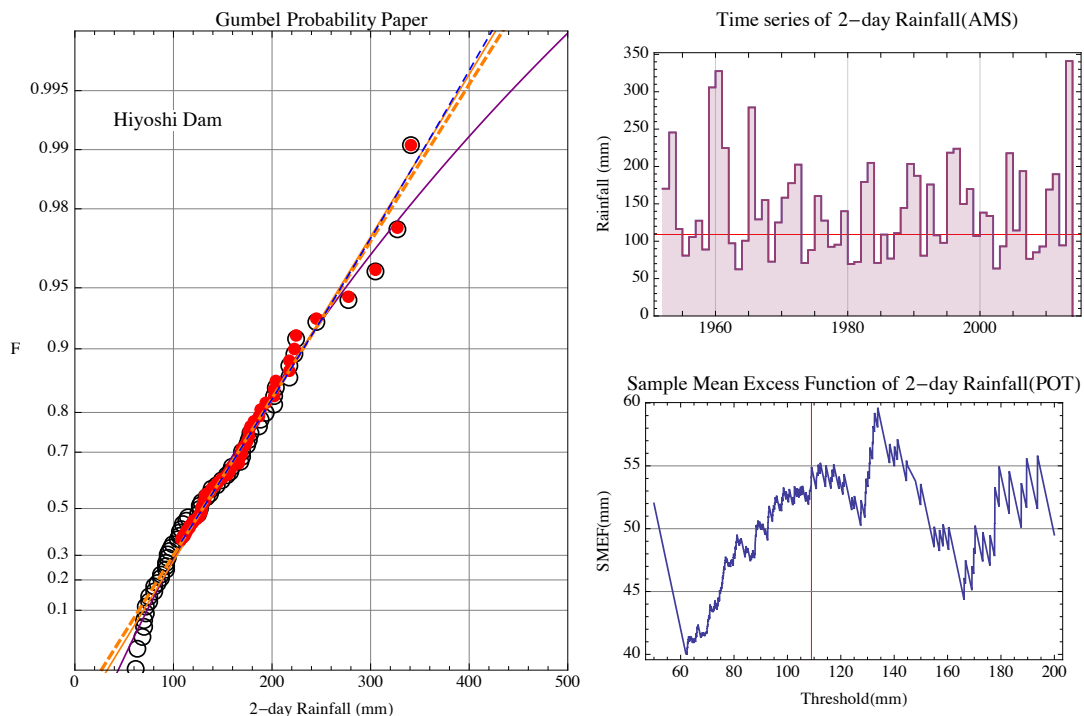


Fig. 7 Probability plot with AMS and POT, Time series of AMS and SMEF of POT on 2-day Catchment averaged rainfall at Hiyoshi Dam

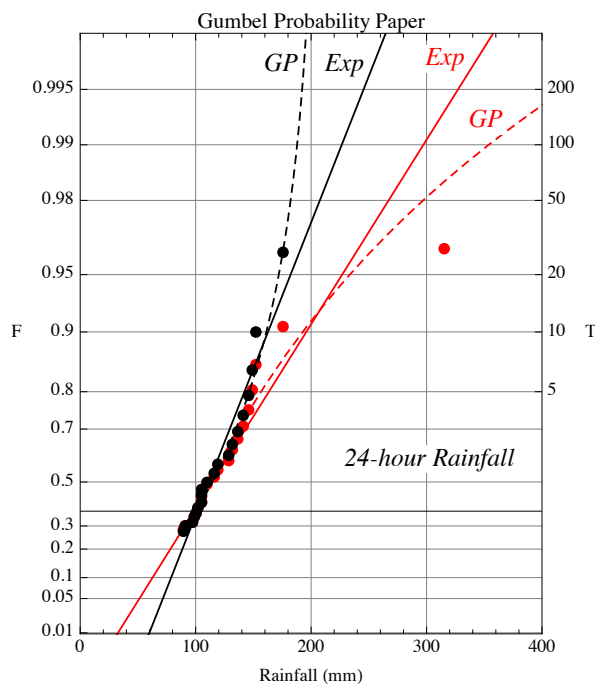


Fig. 8 Comparison of probability plot up to 2013 with up to 2012 for 24-hour rainfall at Hiyoshi Dam from 1998 (Black : up to 2012, Red : up to 2013)

なことは判断できないので、POTによる解析も可能なように資料の蓄積が望まれる。

日吉ダムは管理開始以降必ずしも毎年洪水調節操作を行っている訳ではない。一定の基準を満たした時に洪水調節操作を行っているので、洪水調節記録はPOTとみなすことができる。この記録から、ダム流域24時間雨量と流入ピーク流量について1998年から2012年までのサイズ21の資料と2013年9月末までのサイズ22の資料を用いた確率プロットをそれぞれFig. 8およびFig. 9に示す。24時間雨量および流入ピーク流量とも2012年までの最大値のほぼ2倍の値が台風18号でもたらされている。また、GP分布による評価は2012年までは上限を持つのに対し、2013年のデータが加わるとTailの厚い分布となっており、一点のデータの追加で分布形が変わることから、説得力のある確率評価を行うのが難しい事例である。

3.2 淀川流域の基準地点および主要地点

次に淀川の基準地点および主要地点の資料を見る。Fig. 10は主要地点等のn時間降水量の年最大値の経年変化である。Mann-Kendall検定を行った結果、すべての地点で有意ではないが減少傾向がみられる。日吉ダムの場合は1976年以降、上昇傾向がみられたが、こちらにはみられない。Fig. 11はこれらの1952年から2004年の値の確率プロットであり、図中の縦破線は2013年台風18号による降雨を示している。この図から、2013年台風18号時の値は請田およ

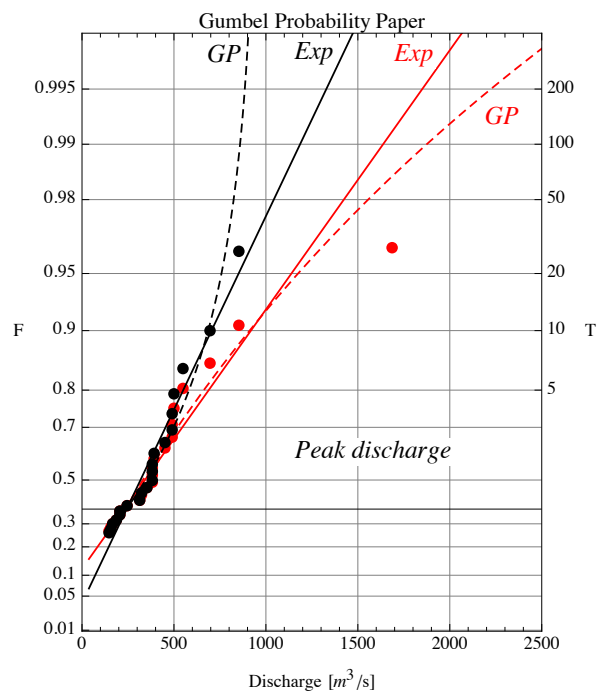


Fig. 9 Comparison of Probability plot up to 2013 with up to 2012 for peak discharge at Hiyoshi Dam from 1998 (Black : up to 2012, Red : up to 2013)

び羽束師ではほぼ1/100、枚方および宇治では1/200より低頻度の事象であったと見れる。

Fig. 12は羽束師地点におけるピーク流量の年最大値時系列、標本平均超過関数およびAMSとPOTによる確率評価である。標本平均超過関数による閾値の選定は確率プロットのAMSの屈曲地点とよく対応しており、適切に選ばれていることがわかる。POTにGPをあてはめると上限を持つ分布になり、AMSにあてはめたGEVと対照的である。Expで判断すると、縦破線で示す2013年の事象は1/100よりわずかに低頻度の事象と判断できる。

Fig. 13は枚方地点におけるピーク流量の年最大値時系列、標本平均超過関数およびAMSとPOTによる確率評価である。標本平均超過関数によると、4,400m³/sと3,100m³/sの2つの候補が考えられるが、標本サイズを確保することも考えてここでは後者を選定している。POTの中位の部分のプロットが羽束師と枚方で類似しているが、既往最大や2位など上位のプロットの状態がGPの形状母数の正負を決めているように見える。閾値の選定は確率プロットのAMSの屈曲地点とよく対応しており、適切に選ばれていることがわかる。また、縦破線で示す2013年の事象はExpおよびGPともに1/100より高頻度の事象として判断される。

付録に収録した島ヶ原、請田、加茂、宇治についてもピーク流量の確率プロットは上に凸の屈曲を示しており、外挿区間のクォンタイル推定においてAMSのGumbelは過小、GEVは過大傾向であり、POTのExpが

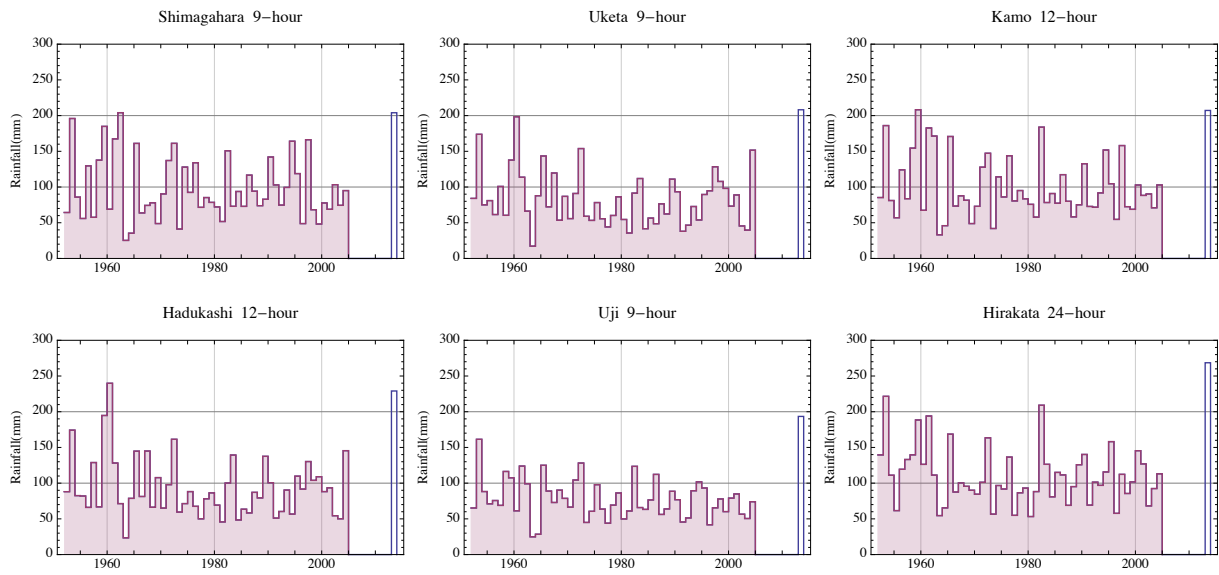


Fig. 10 Time series of AMS of n-hour catchment averaged rainfall at six principal points in the Yodo river basin

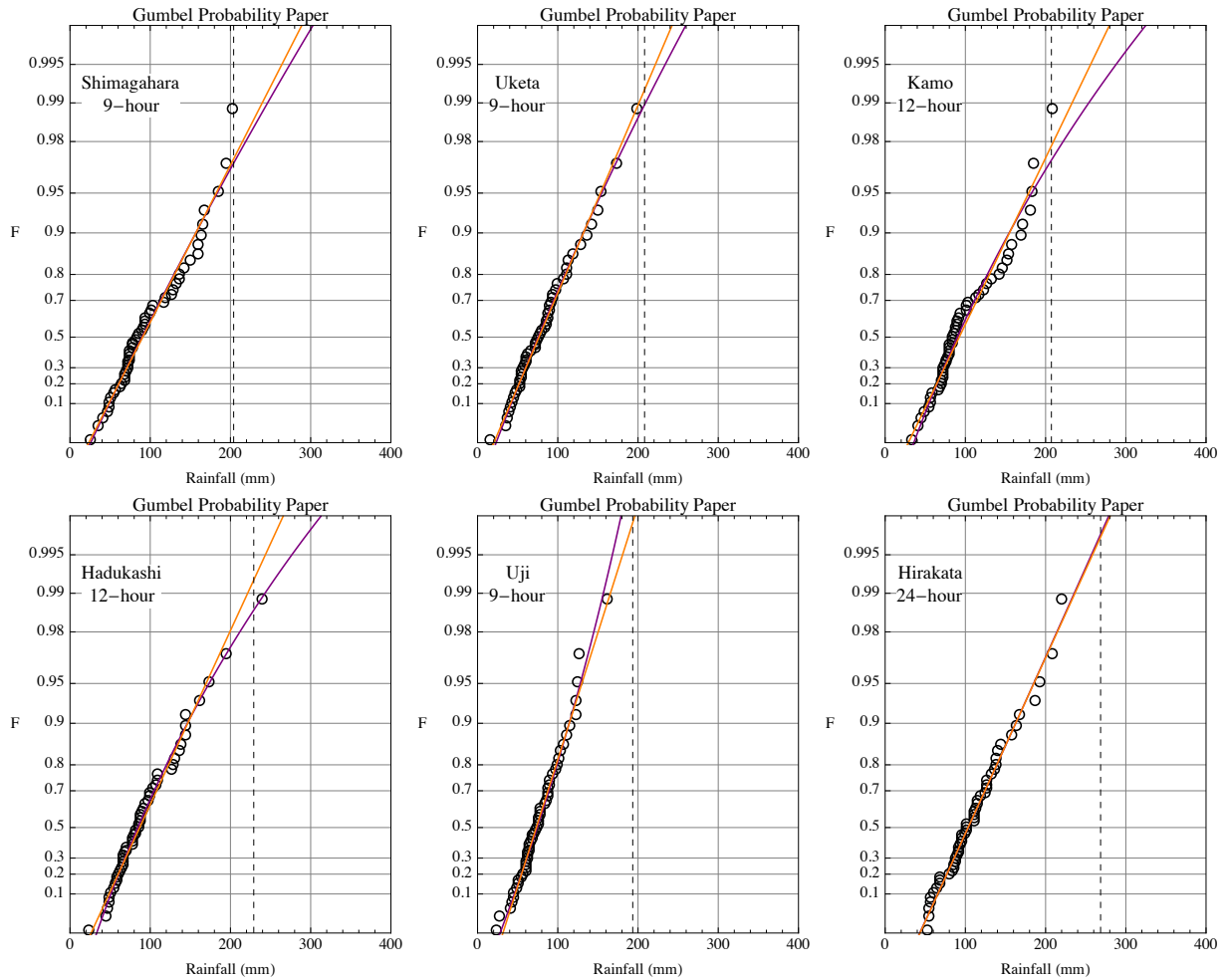


Fig. 11 Probability plots of AMS of n-hour catchment averaged rainfall at six principal points in the Yodo river basin
Vertical dashed line in each graph shows 2013 rainfall event. (Orange : Gumbel, Purple : GEV)

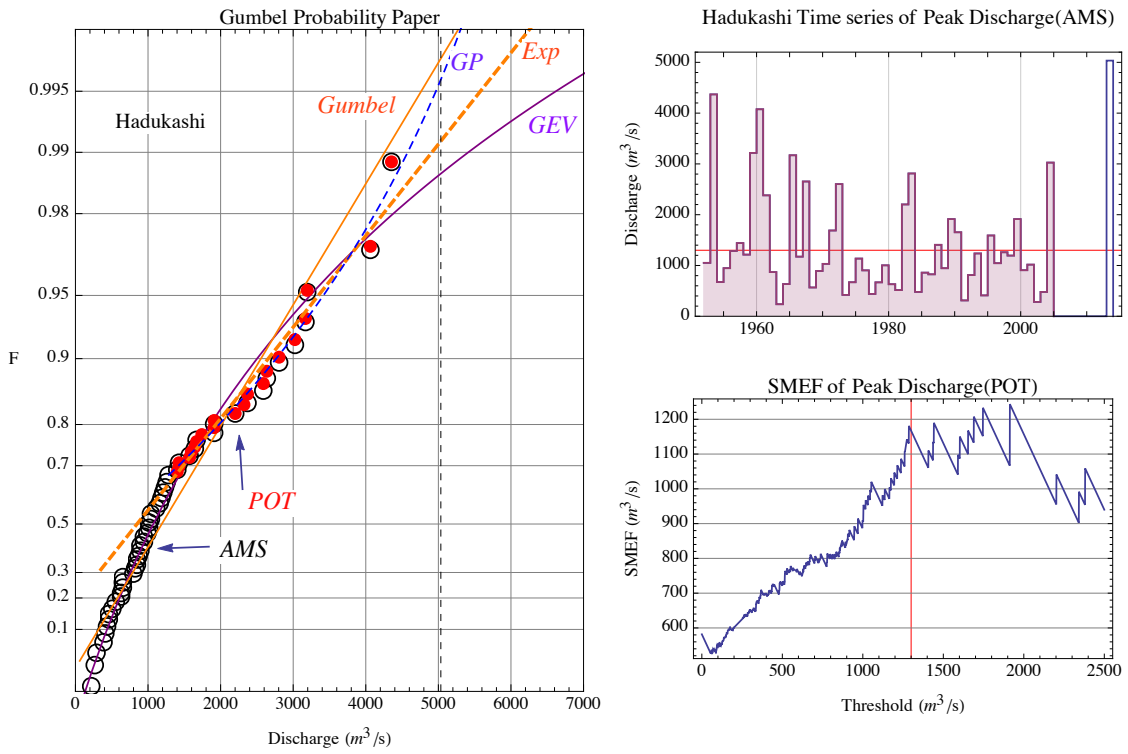


Fig. 12 Probability plot with AMS and POT, Time series of AMS and SMEF of POT on calculated discharge without dam operation at Hadukashi

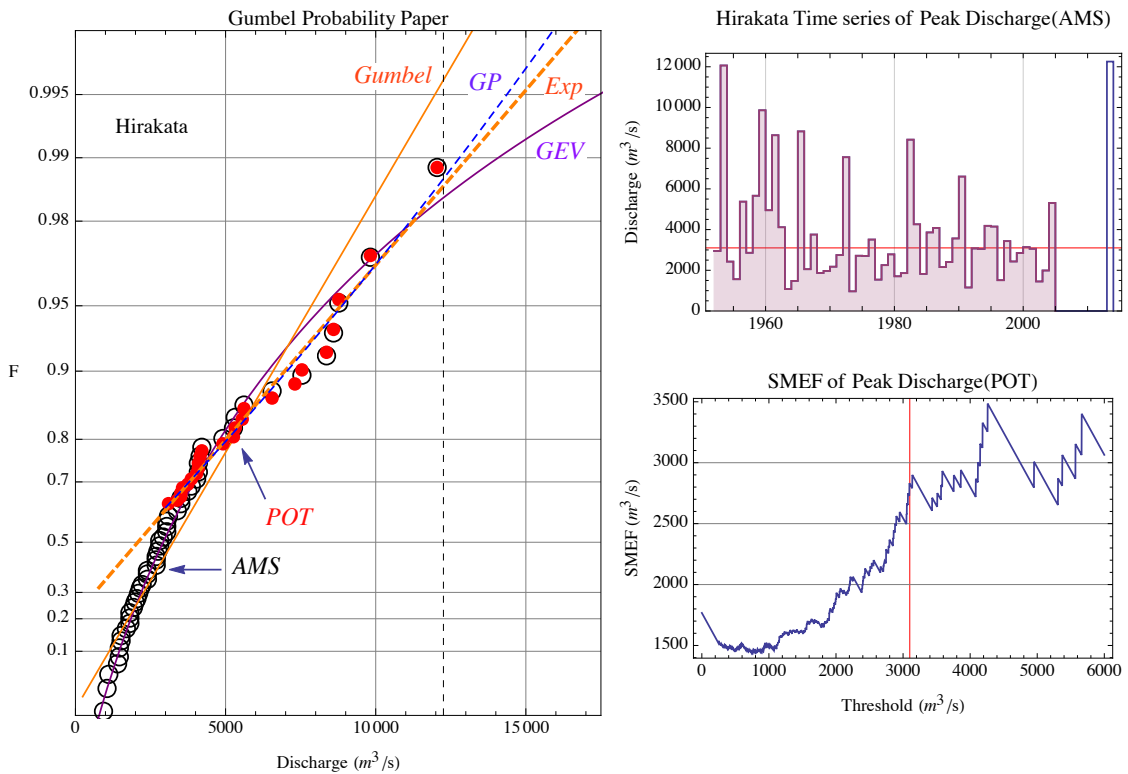


Fig. 13 Probability plot with AMS and POT, Time series of AMS and SMEF of POT on calculated discharge without dam operation at Hirakata, the reference point of the Yodo river

説得力のあるあてはめ曲線となっている。GPについては資料中の上位の値の関係で極端に上限を有する分布関数となることがあり、注意を要する。

4. 台風18号洪水と全国の既往最大値との比較

台風18号による淀川流域の出水は流域内の洪水調節ダムの管理者の適切な判断および懸命な操作による効果が発揮され、下流部ではあまり大きな被害とならずに済んだ。琵琶湖からの放流量は $0\text{ m}^3/\text{s}$ とし、流域内の洪水調節ダムがないとした場合の台風18号豪雨による計算ピーク流量は、基準地点枚方で $12,000\text{ m}^3/\text{s}$ あまりと推定されている。この値を琵琶湖除きの流域面積で除すと比流量3.5が得られる。角屋・永井(1979)の洪水比流量曲線にてらしてみると、今般の洪水の枚方地点での比流量3.5は同面積の比流量曲線の値6.2と比べ6割にも満たないレベルである。この比流量曲線は伊勢湾台風によってもたらされた新宮川水系熊野川の洪水ピーク流量を抱絡するように決められているものである。1979年以降我が国では大規模な洪水が発生している所があり、熊野川も2011年の紀伊半島豪雨で甚大な被害を被っている。したがって、2013年台風18号時の淀川流域の洪水より大きな洪水は全国レベルでは容易に起こると考えるべきであり、十分な準備が必要である。

5. 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が、Fig. 10に示したように淀川流域における年最大流域平均雨量には増える兆候はまだ明らかには見えてない。さらに、淀川流域は日本海側でもなく紀伊半島南部や四国・九州南部のように頻繁に豪雨がみ

られるわけでもない。一般に、瀬戸内地域同様大雨が降らない地域と認識されやすい。しかしながら、淀川流域の彦根は1896年9月に日雨量 596.9 mm の豪雨で琵琶湖の水位が3 mも上昇し大災害となっている(国土交通省, 2014; 気象庁, 2014a)。それ以降2013年までの記録の最大は 195.8 mm であり、1896年の記録は普段の年の3倍以上である。Fig. 14に示すように、1894年からの120年間の記録でこれを除いたプロットはほぼグンベル分布にしたがい、1896年の記録が極端なアウト라이어になっているのがわかる。気象庁(2014b)によれば、我が国の日雨量の上位20位中第4位に、豪雨で有名な地域に混じって小豆島の内海での 790 mm の記録が見える。淀川流域も瀬戸内地域も決して大規模豪雨を免れる訳ではないことがわかる。地点毎、地域毎の記録に基づく頻度解析では、短期間故に見えていないものがあるかもしれない。地理的条件および地形的条件が複雑な我が国ではあるが大きな気象のスケールと比べると我が国土は狭い。場所毎に別々に扱うのではなく、広い領域を対象に時空間的な極大値の発生状況を捉えるような研究が必要である。

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。本文で用いた全国の資料は国土交通省より提供頂いた。淀川水系の資料は国土交通省近畿地方整備局から提供頂いた。日吉ダムに関連する資料は独立行政法人水資源機構から提供頂いた。また、亀岡の浸水状況の写真は京都大学防災研究所堀智晴教授から提供頂いた。快く貴重な資料を提供・解説頂いた関係者の皆様方にここに記して謝意を表する。

参考文献

- 角屋 睦・永井明博(1979)：洪水比流量曲線へのアプローチ, 京都大学防災研究所年報, 19B-2, 143-152.
- 気象庁(2014a)：気象統計情報, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/annually_s.php?prec_no=60&block_no=47761&year=1896&month=05&day=07&view=a1
- 気象庁(2014b)：気象統計情報, 歴代全国ランキング, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rankall.php?prec_no=60&block_no=47761&year=1896&month=05&day=07&view=a1

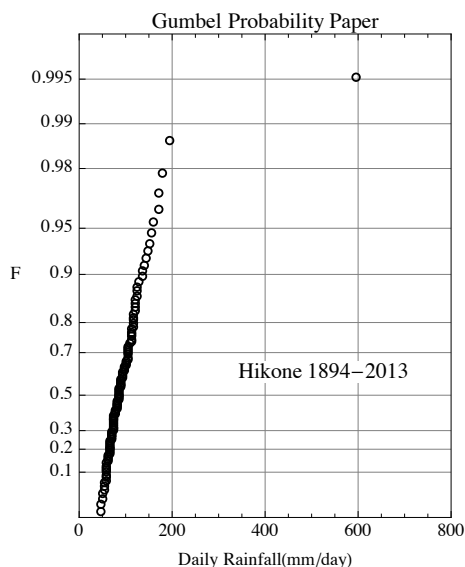


Fig. 14 Probability plot of AMS daily rainfall in Hikone

国土交通省(2014) : http://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/nihon_kawa/86060/86060-1_p4.html

国土交通省近畿地方整備局(2013) : <http://www.kkr.mlit.go.jp/river/saigai/20130916tyhoon18/saigaihoukoku04.pdf>

(独) 水資源機構(2013) : <http://www.water.go.jp/kansai/kansai/html/kisyahappyou/pdf/130918kisyahaltupyou.pdf>

Reiss, R.-D. and M. Thomas(1997): Statistical Analysis of Extreme Values, Birkhäuser, p. 316.

付 録

本文中に示さなかった淀川水系の主要地点である島ヶ原、加茂、請田および宇治におけるダムなし条

件での計算ピーク流量について、AMS時系列、SMEFおよびAMSとPOTの確率プロットをそれぞれFig. A1～A4に示す。

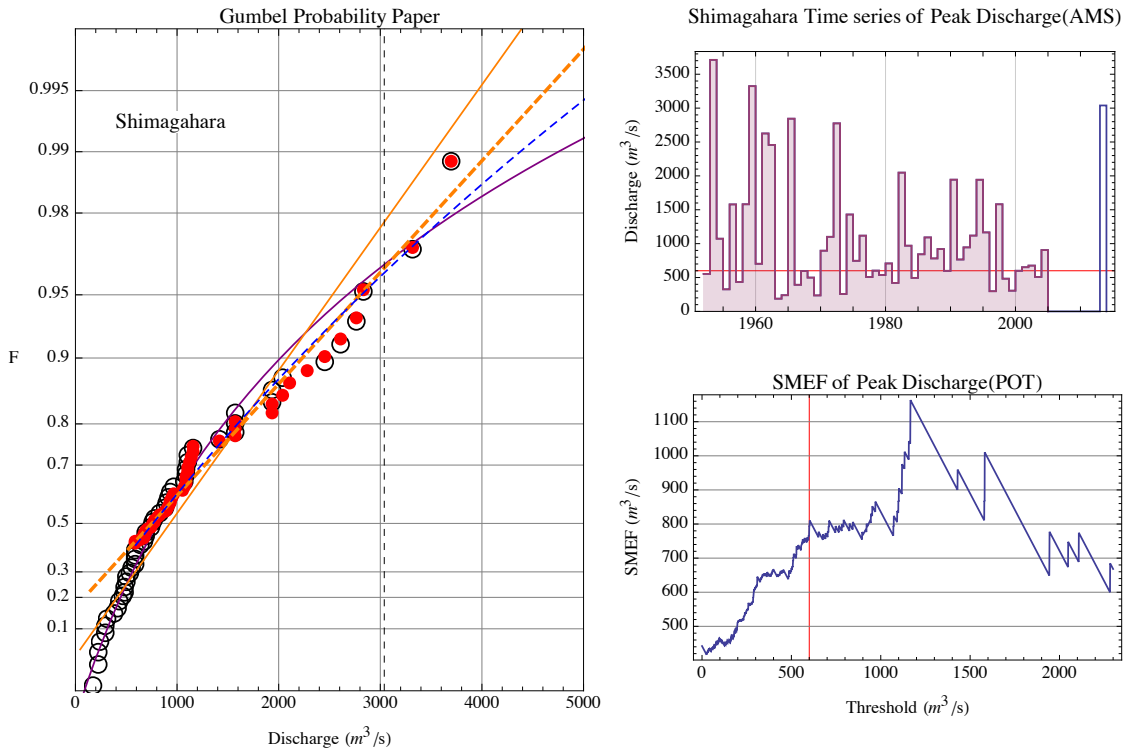


Fig. A1 Probability plot with AMS and POT, Time series of AMS and SMEF of POT on calculated discharge without dam operation at Shimagahara

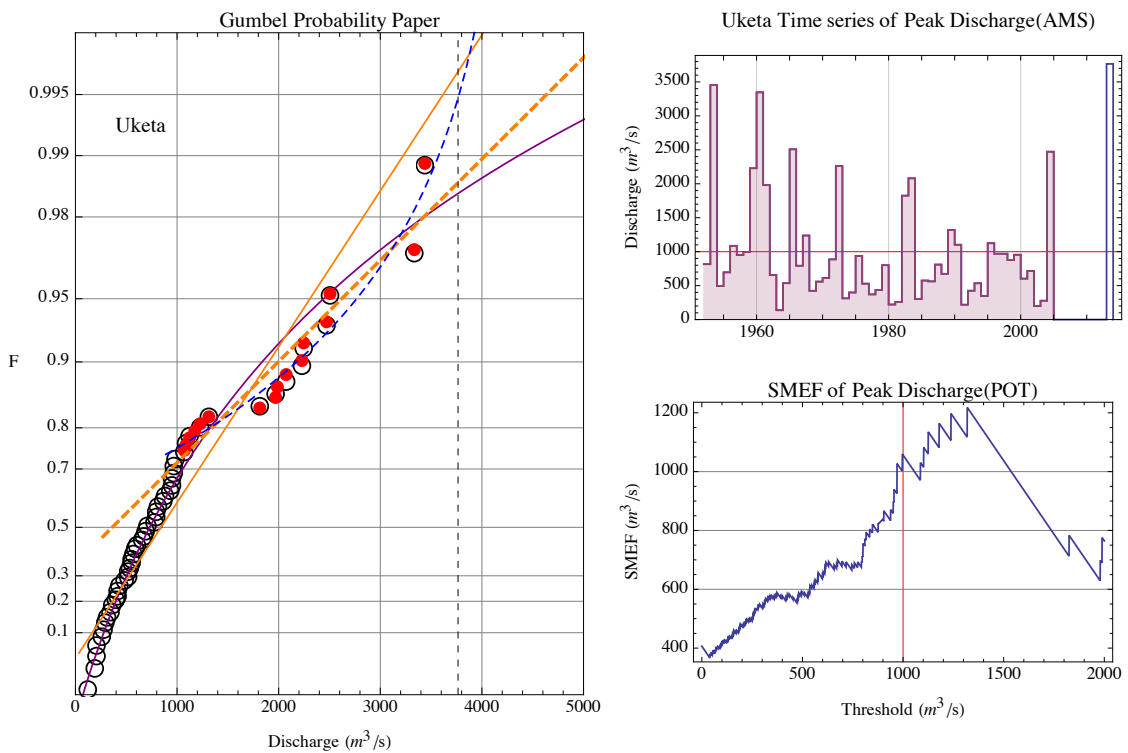


Fig. A2 Probability plot with AMS and POT, Time series of AMS and SMEF of POT on calculated discharge without dam operation at Uketa

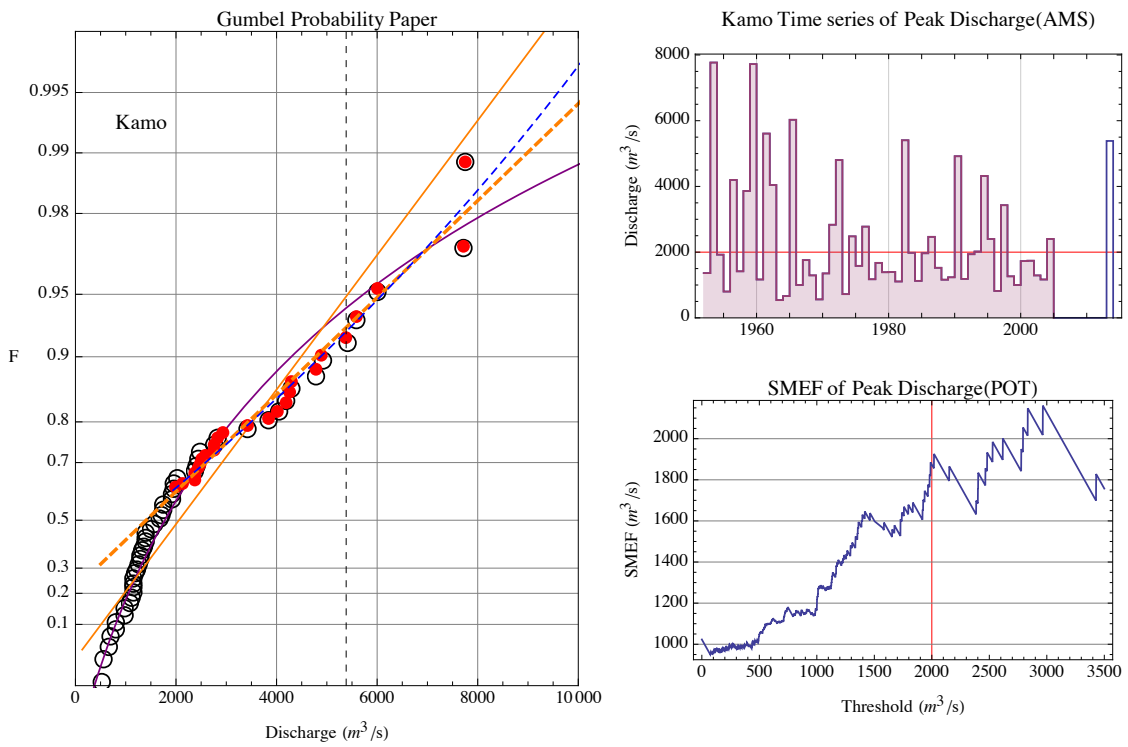


Fig. A3 Probability plot with AMS and POT, Time series of AMS and SMEF of POT on calculated discharge without dam operation at Kamo

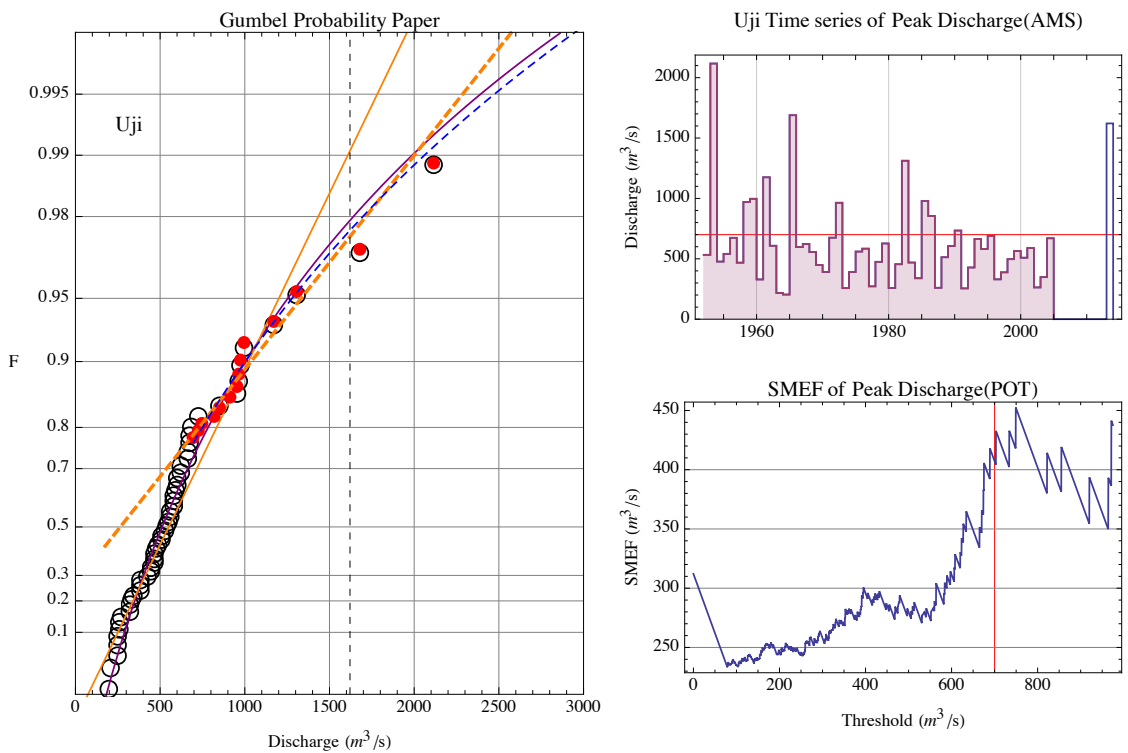


Fig. A4 Probability plot with AMS and POT, Time series of AMS and SMEF of POT on calculated discharge without dam operation at Uji

(論文受理日：2014年6月11日)