

京都・滋賀における2013年台風18号の豪雨の特徴と桂川流域被害調査

Characteristics of Heavy Rainfall by Typhoon Man-yi in 2013 in Kyoto and Shiga Areas, and Disaster Research in Katsura River Basin

角 哲也・田中茂信・本間基寛

Tetsuya SUMI, Shigenobu TANAKA and Motohiro HONMA

Synopsis

Typhoon Man-yi caused heavy rainfall in Kyoto and Shiga area during September 15-16, 2013. Since sea water temperature around the Japanese Archipelago was higher than usual by 1-2 °C in the summer season, both the typhoon and rainy front delivered extraordinary water vapor to Kyoto and Shiga area. Rainfall intensity in short periods was not so high but longer ones such as 12, 24 and 48 hrs reached almost equal to the maximum records. Total average rainfall in the Yodo river basin was up to 269mm which is estimated more than 200 years return period. During the flood, several multipurpose dams located upstream of the Yodo river basin had effectively controlled inflow discharges coordinately. Especially in the Katsura river basin, Hiyoshi dam operated from 1998 by the Japan Water Agency had drastically cut the peak flow discharge from 1,694m³/s to 148m³/s. This remarkable flood control operation was based on advanced rainfall monitoring and runoff prediction systems. Cooperated decision making by the Kinki Regional Management Bureau, MLIT and the Japan Water Agency had successfully guided dam operation based on downstream flood flow predictions. Without this operation, more severe flood damages may have occurred in the downstream reaches of the Katsura river including Kameoka, Arashiyama and Kyoto city areas. Additionally, huge drift woods up to 13,500m³ have been accumulated in Hiyoshi dam reservoir during the flood. They have been delivered both from upstream mountains and river channels. Without trapping by the dam, they have been directly discharged downstream and might have increased flood damages by clogging at crossing bridges and flowing into inundated area. Moreover, flood peak cut by Hiyoshi dam might have decreased additional production of drift woods from the downstream river channel. These multiple functions should be studied further to clarify the total benefit of flood control dams.

キーワード: 台風18号, 桂川, 日吉ダム, 洪水調節, 流木

Keywords: Typhoon Man-yi, Katsura River, Hiyoshi Dam, Flood Control, Drift Wood

1. はじめに

2013年9月13日3時に小笠原諸島近海で発生した台風第18号は、発達しながら日本の南海上に北上し、14日9時に強風域の半径が500kmを超えて大型の台風となり、15日18時には暴風域を伴った。台風は、その後

も北上を続け、潮岬の南海上を通過して、16日8時前に暴風域を伴って愛知県豊橋市付近に上陸した。その後、台風は速度を速めながら東海地方、関東甲信及び東北地方を北東に進み、16日21時に北海道の東で温帯低気圧となった（国土交通省気象庁、2013）。

台風の接近・通過に伴い、日本海から北日本にの

びる前線の影響や、台風周辺から流れ込む湿った空気の影響、台風に伴う雨雲の影響で、四国から北海道の広い範囲で大雨となった。9月15日から16日までの総雨量は、三重県宮川村で575.5mm、奈良県上北山で542.5mmとなるなど、近畿、東海地方を中心に400mmを超えた。京都府、滋賀県、福井県では、その地域ではこれまでに経験したことがないような大雨が降ったとして、大雨特別警報が発表された（国土交通省気象庁、2013）。

この大雨等により、岩手県、福島県、福井県、滋賀県、三重県、兵庫県であわせて死者6名、行方不明者1名となり、四国から北海道までの広い範囲で損壊家屋1,600棟以上、浸水家屋1万棟以上の住家被害が生じた（総務省消防庁、2013）。

本稿では、京都府及び滋賀県を対象に、豪雨の特徴を整理するとともに、土木学会水工学委員会・関西支部合同の京都・滋賀水害調査団として9月18日に実施した桂川流域被害調査の結果をまとめる。

2. 京都・滋賀における豪雨の特徴

2.1 台風の経路と雨量分布

9月15～16日の天気図と解析雨量分布図をFig. 1に示す。台風第18号は、日本の南海上を時速30kmとゆっくりとした速度で北上し続けたため、前線や台風に伴う雨雲が居座り、長時間にわたって強い雨が降り続いた。9月15日0時から16日24時までの近畿地方における総降水量分布図をFig. 2に示す。この台風では、紀伊半島の南東斜面で総降水量が500mmを超えている地域が多く見られるとともに、近畿地方北部でも一部で総降水量が500mmを超えていることが特徴である。

台風が北上していた9月14日の日本近海での海面水温とその平年値からの偏差の分布図をFig. 3に示す。日本の南海上では、海面水温が28℃以上となっており、平年よりも1～2℃高い状態となっていた。通常、台風は北緯30度以上の中緯度帯に入ると勢力が衰えながら北上するが、台風第18号では北緯30度付近を越えてからも発達を続け、日本上陸の直前に中心気圧が965hPaと最発達した。その結果、台風が強い勢力を保った状態で上陸したため、台風北側での大雨につながったものと考えられる。

また、今回の台風では、紀伊半島の太平洋側に比べて、通常は降水量が少ない日本海側でも降水量が多くなった（Fig. 2）。Fig. 3に示すように、9月14日の時点では、日本海南部でも海面水温が26℃近くで、平年よりも2℃ほど高い状態となっていた。Fig. 4は、9月15日21時の大気下層での気流と水蒸気量の分布である。近畿地方北部では紀伊半島からの東暖湿流と日本海からの北東暖湿流が流入していることがわかる。通

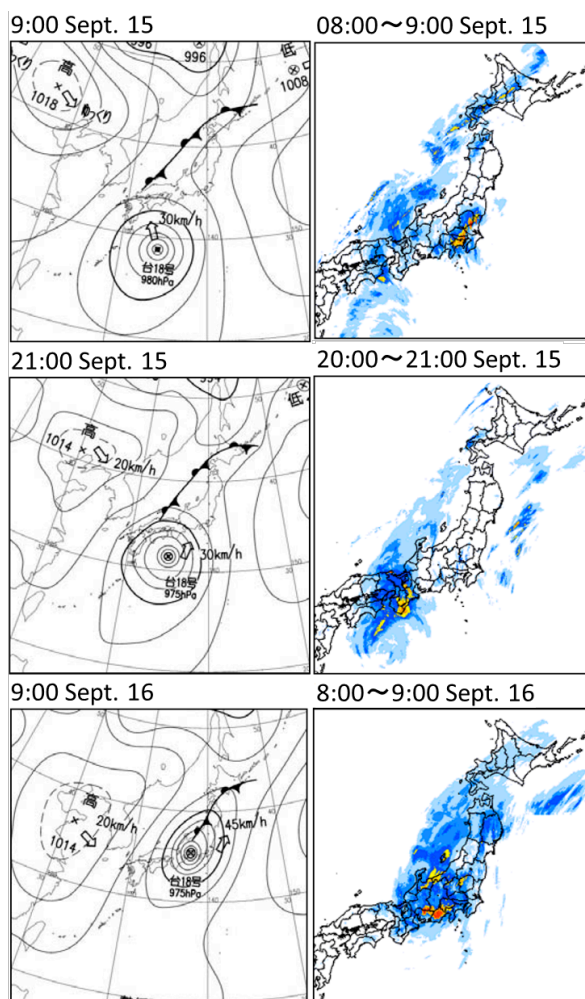


Fig. 1 Weather chart and analysed precipitation map on September 15-16, 2013 (Japan Meteorological Agency, 2013).

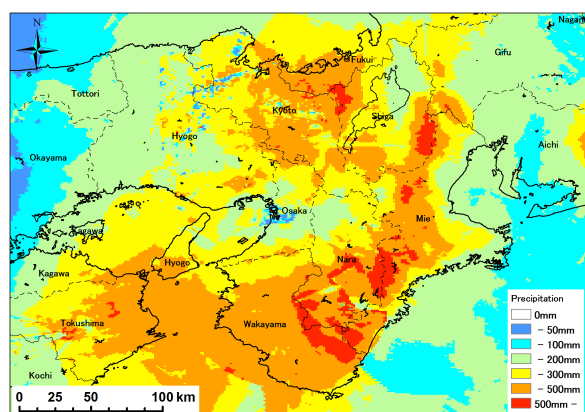


Fig. 2 Total precipitation distribution map from September 15 0:00 to 16 24:00.

常、日本海南部では海面水温が低いため大気中含まれる水蒸気量は少ないが、今回の豪雨では、日本海南部からも大量の水蒸気が流入し、地形による効果及び南東からの暖湿流との収束によって持ち上げられ、

大雨になったと考えられる（国土交通省気象庁気象研究所，2013）。

2.2 降水量の推移

京都府内及び滋賀県内の主な地点における1時間降水量と累積降水量の推移をFig. 5に示す。地点は全て、気象庁AMeDAS観測所である。雨は15日未明から降り始め、15日4時から10時頃にかけて、最初の小さなピークを迎えている。その後、15日夕方頃から雨脚が再度強くなり、京都府内の各地点や滋賀県西部の大津、朽木平良、今津では、16日未明に1時間雨量のピークを迎えている。滋賀県東部の彦根、土山、信楽では、16日明け方頃に1時間雨量のピークを迎えている。ピーク雨量は各地点とも30～40mm程度であったが、15日20時前後から16日8時前後までの12時間程度にわたって、10mm/h以上の降水が続いていた。

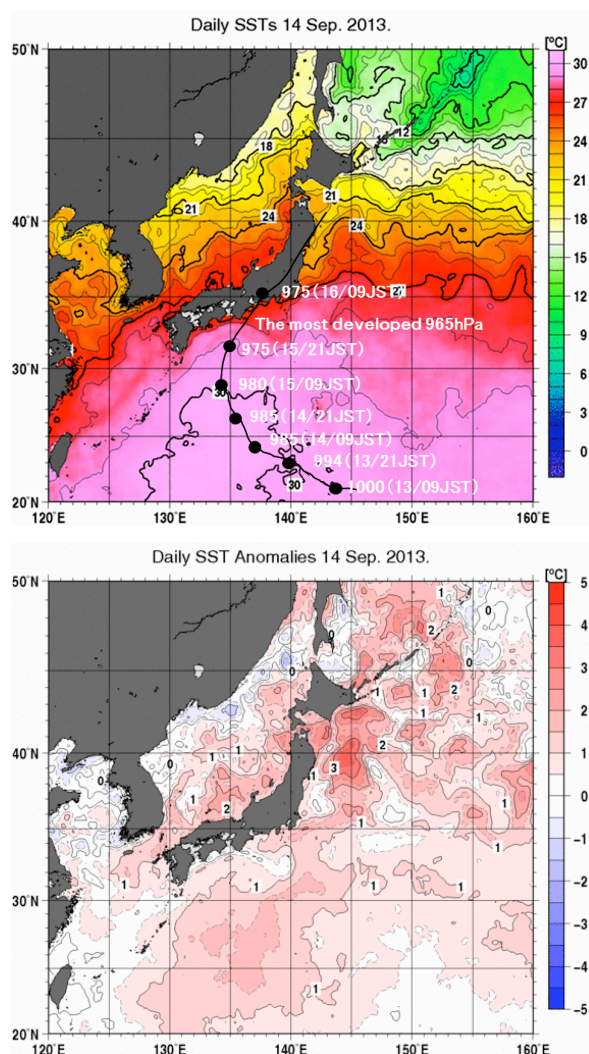


Fig. 3 Distribution map of sea surface temperatures (upper) and its anomalies (lower) on September 14, 2013 (Japan Meteorological Agency, 2014a). The typhoon course was added by the authors.

各地点の累積降水量もFig. 5に示している。滋賀県の朽木平良では500mm近くに達している他、多くの地点で300mm前後の降水量となっている。

2.3 過去の降水記録との比較

今回の台風では、京都府内及び滋賀県内の気象庁AMeDAS観測所（統計期間10年以上）で24時間降水量の年最大値を更新した地点が15地点（京都府：宮津、睦寄、本状、美山、須知、園部、京北、長岡京、京田辺、滋賀県：今津、南小松、近江八幡、大津、信楽、土山）、48時間降水量の年最大値を更新した地点が13地点（京都府：睦寄、美山、須知、園部、京北、京田辺、滋賀県：今津、南小松、近江八幡、東近江、大津、信楽、土山）であった（国土交通省気象庁大阪管区気象台，2013）。

美山、園部、京都、大津、朽木平良、土山の6地点を対象に、降水継続時間毎の最大降水量について1976年以降の最大値（以下、既往最大値と称す）と比較したDD解析図（Depth-Duration解析図）をFig. 6に示す。累積降水量が500mm近くに達した朽木平良では、3、12、24、48時間降水量が既往最大値を大きく超えていたが、1時間降水量は既往最大値と同程度であった。美山、園部、大津、土山では、12、24、48時間降水量が既往最大値以上となったが、1、3時間降水量は既往最大値以下であった。京都では、いずれの時間降水量

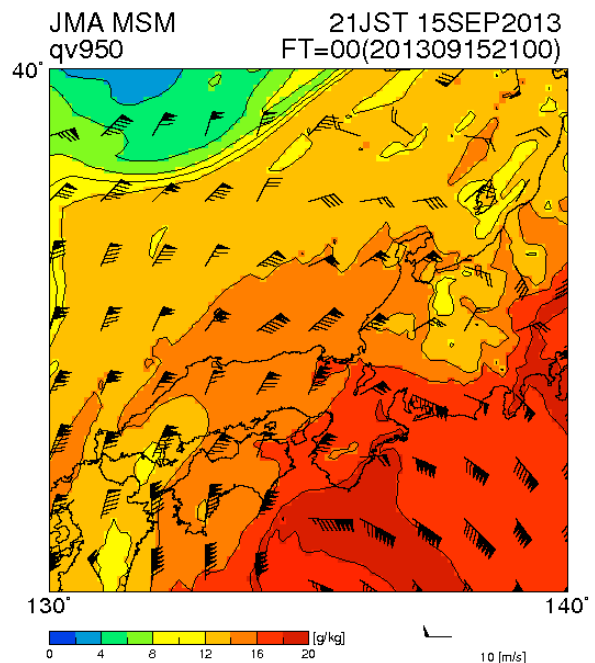


Fig. 4 Distribution of air current and water vapor (mixing ratio) at the lower layer of the atmosphere on 21:00 15th September 2013. Plotted from MSM data of Japan Meteorological Agency (Provided by Associated Prof. Tetsuya Takemi).

も既往最大値以下ではあったが、12、24、48時間降水量は既往最大値に近い降水量であった。このように、今回の事例では短時間の降水量は既往最大値を下回る降水量であったが、12、24、48時間降水量は既往最大値に匹敵またはそれを上回る降水量となっており、やや強い雨が長時間にわたって降り続いたことが特徴である。

3. 日吉ダムおよび淀川流域主要地点等における流域平均降水量と流量の確率評価

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点における降水量および流量の資料を収集した。各地点の位置図をFig. 7に、各地点上流域面積をTable 1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、枚方の流域面積に対する割合についてはTable 1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。

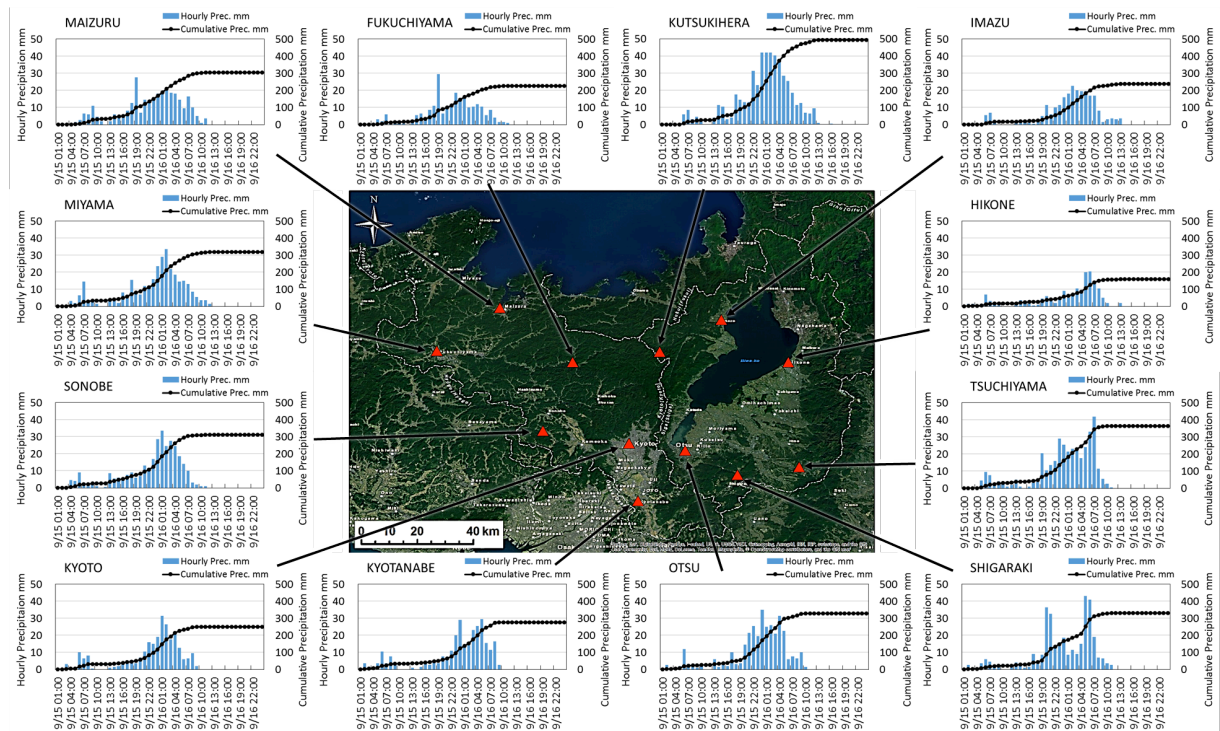


Fig. 5 Time series of hourly and cumulative precipitation at the main stations in Kyoto and Shiga prefecture.

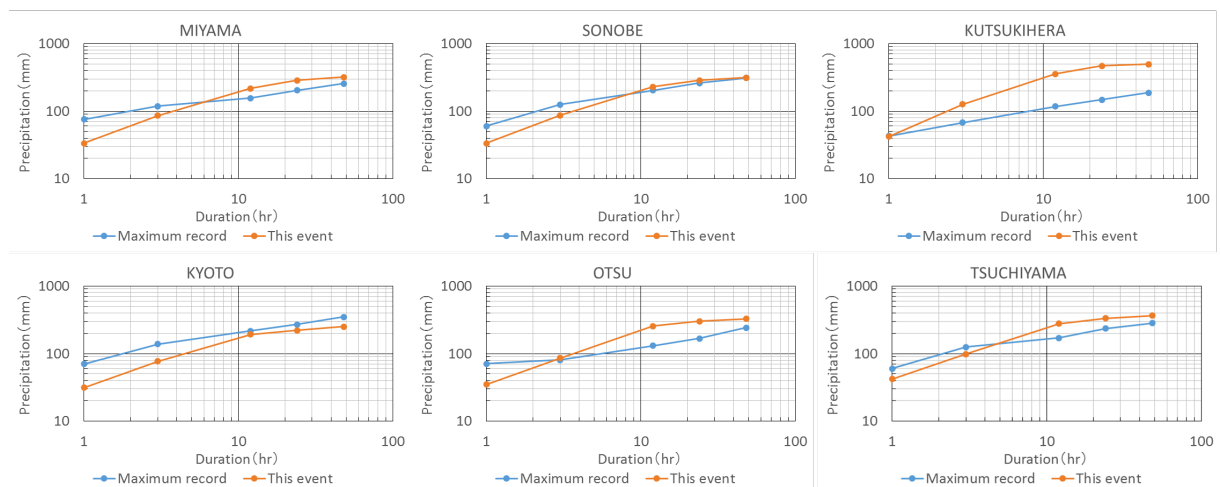


Fig. 6 Relations of rainfall duration and the maximum precipitation.

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)水資源機構が1998年4月より管理している。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1,694 m³/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

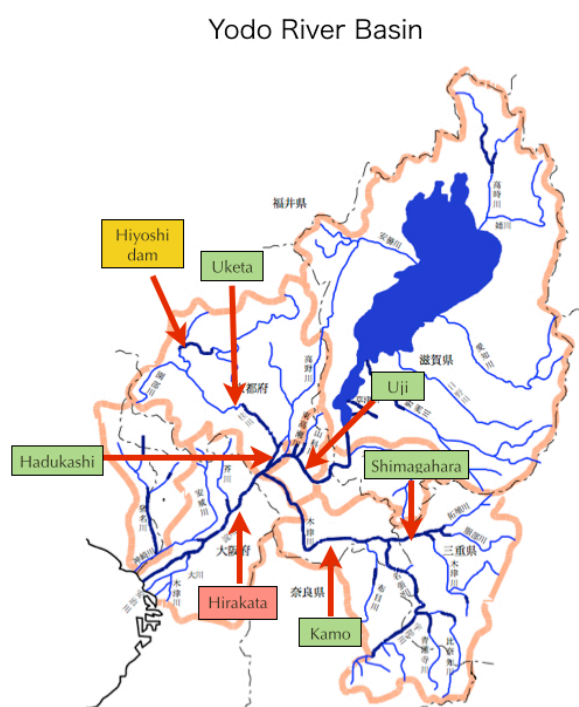


Fig. 7 Locations of analyzed principal points.

Table 1 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
Shimagahara	522.9	15
Kamo	1,478.1	42
Hirakata	7,339.5 (3,491.5)	100

であったと考えられる。

(1) 経年変化特性

Fig. 8に日吉ダム流域の年降水量の経年変化を示す。年々減少しているのが一目瞭然であり、この時系列についてMann-Kendall検定の結果も有意水準5% (以下すべて5%を用いる) で減少傾向が有意であることを示している。Fig. 9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有意な変化なしと判断されるが、若干、減少傾向である。Fig. 10は流域平均の2日降水量が100mmを超えるイベント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。

異常気象レポート2005 (国土交通省気象庁, 2005) は、1976年以降の全国のAMeDAS降水量をもとに50mm/h, 80mm/h, 200mm/dayおよび400mm/dayについ

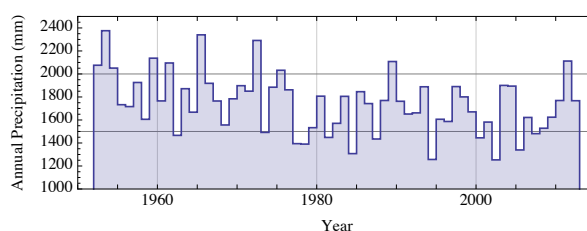


Fig. 8 Time series of Annual precipitation at Hiyoshi dam basin.

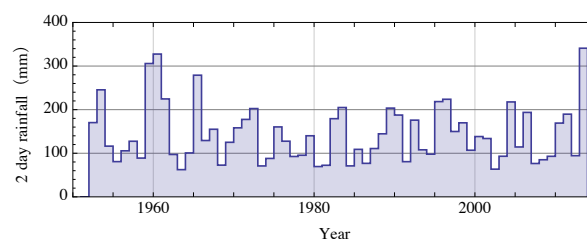


Fig. 9 Time series of Annual Maxima of catchment averaged 2-day rainfall at Hiyoshi dam.

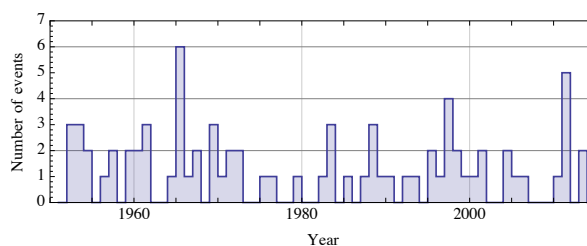


Fig. 10 Time series of number of Hiyoshi dam catchment averaged 2-day rainfall events more than 100mm.

て年間1地点あたりの観測回数が有意ではないが増加傾向であることを示している。これと比較するため、1976年以降のみを用いてMann-Kendall検定を行うと、流域平均2日降水量の年最大値および100mmを超えるイベントの回数ともに有意ではないものの若干、増加傾向にある。

年降水量が有意に減少する一方、大雨の傾向は有意な傾向を示してはいないが、近年増加する兆しをみせており、今後注意深く監視する必要がある。

(2) 年最大値資料 (AMS) を用いた確率評価

水文統計解析では年最大値資料 (Annual Maximum Series, 以下AMS) が一般的によく用いられている。Fig. 11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傾向とはGEVは異なり、リターンピリオドが大きくなるとより大きな確率水文量を与えるTailの厚い分布曲線となっている。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、サンプルサイズの約1/4を占めている2日降水量約90mm以下の下位の資料がほぼ同様な値となっていて中上位の部分と傾向を異にし、上に凸の形状での当てはめになっているものと考えられる。

1/100確率水文量はグンベル分布354mm (Jackknife推

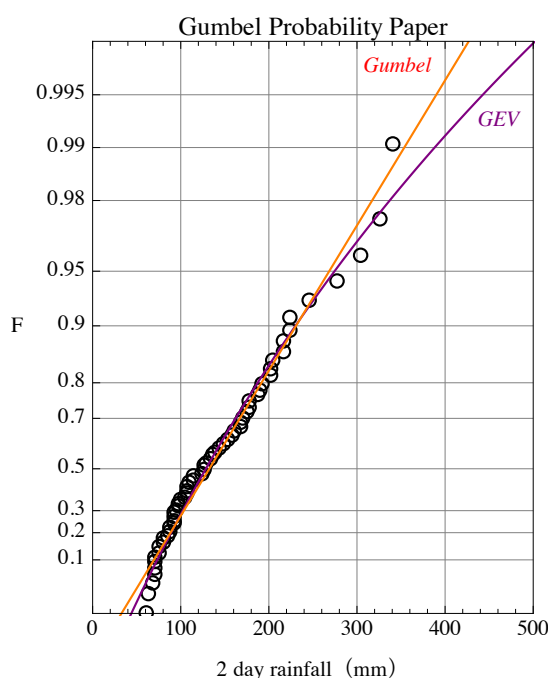


Fig. 11 Probability plot of AMS of 2-day rainfall.

定値も同値), GEV389mm (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。

(3) 閾値超過資料 (POT) を用いた確率評価

水文統計解析に用いられる方法にはAMS以外に閾値超過資料 (Peaks Over Threshold, 以下POT) がある。POTはAMSでは考慮されない年間第2位等の大きな洪水資料を考慮できるだけでなく閾値を適切に選べば洪水と呼べないようなイベントを資料から排除できるが、課題として独立なピークを抽出しなければならないことと閾値選定手法がある。前者は比較的容易である。後者についてはいろいろな方法が提案されており、ここではPOTが指数分布にしたがう場合、平均が閾値によらず一定である性質を利用する標本平均超過関数 (Reiss and Thomas, 1997) を用いて選定することとした。Fig. 12は標本平均超過関数をプロットしたものであり、適当と考えられる閾値109mmが得られる。Fig. 13はPOTのプロットとそれに指数分布 (Exp) と一般化パレート分布 (GP) をフィットさせた分布曲線をFig. 11に上書きしたものである。

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形状が異なる。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。閾値109mmでのPOTを用いた分布曲線はほぼグンベル分布に重なる。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イベントを含めて判断することを意味する。実際、日吉ダムは1998年に管理開始しているが、洪水調節操作はほぼ総雨量95mm以上で行っている。

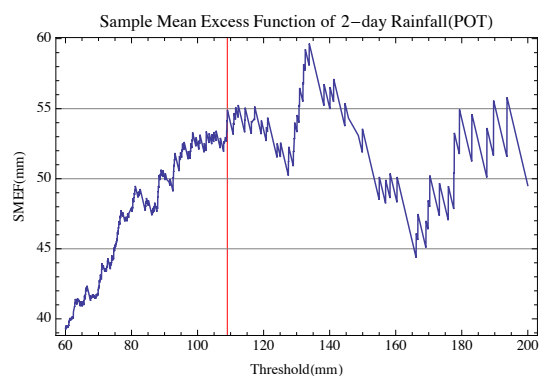


Fig. 12 Sample Mean Excess Function of 2-day rainfall (POT).

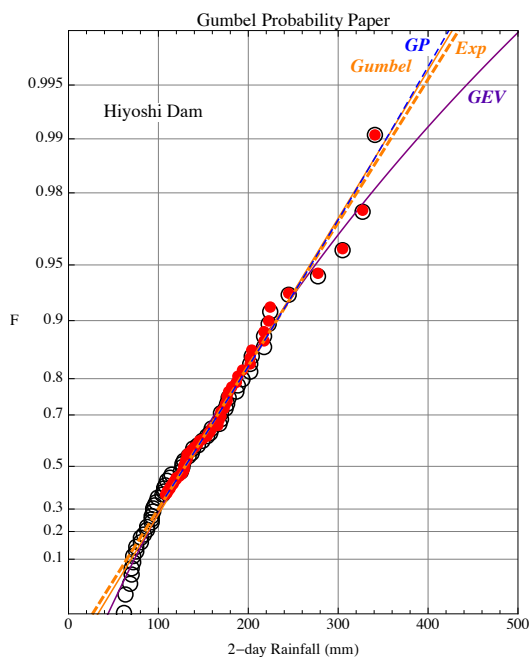


Fig. 13 Probability plot with AMS and POT of 2-day rainfall.

水文頻度解析において、その小規模イベント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わけではない。一定の基準を満たした時に洪水調節操作を行っており、洪水調節記録はPOTと考えることができる。この記録から、流入ピーク流量

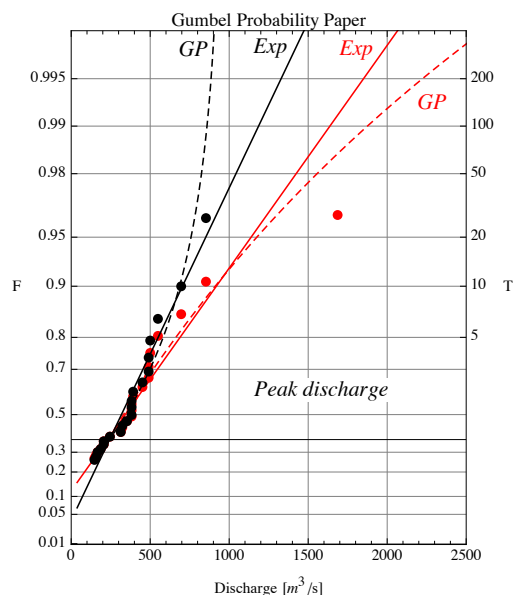


Fig. 14 Comparison of Probability plot up to 2013(Red) with up to 2012(Black) for peak discharge at Hiyoshi Dam from 1998.

について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Fig. 14に示す。2012年までの最大記録のほぼ2倍の値が台風18号でもたらされている。また、GPによる評価は2012年までは上限を持つのにに対し、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。

3.2 淀川流域の基準地点および主要地点

次に淀川の基準点および主要地点の資料を見る。

Fig. 15は主要地点等の上流流域面積を考慮した降雨継

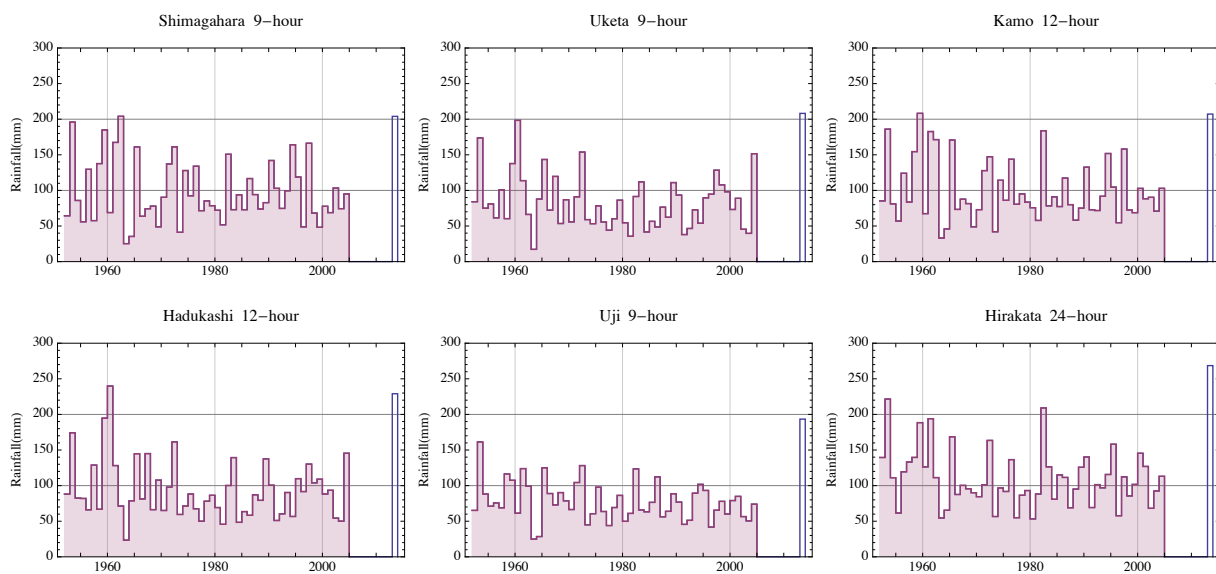


Fig. 15 Time series of AMS of n-hour catchment averaged rainfall at six principal points in the Yodo river basin.

続時間降水量の年最大値の経年変化である。各地点の時系列資料について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、この図にはみられない。台風18号時の雨は広域的に長時間降り続き、淀川流域でのすべての主要地点、基準地点で既往最大と同程度またはそれを超える雨量を記録しており、上述したDD解析の結果と同様の結果である。Fig. 16はこれらの値の確率プロットである。この図から、2013年台風18号時の値は請田および羽束師ではほぼ1/100、枚方および宇治では1/200より低頻度の現象であったと考えられる。

Fig. 17は羽束師地点におけるピーク流量のAMS時系列、標本平均超過関数およびAMSとPOTの確率プロットである。標本平均超過関数による閾値の選定はAMSの確率プロット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、2013年のイベントは1/100よりわずかに低頻度のイベントと判断

される。

Fig. 18は基準地点枚方におけるピーク流量のAMS時系列、標本平均超過関数およびAMSとPOTの確率プロットである。標本平均超過関数によると $4,400\text{m}^3/\text{s}$ と $3,100\text{m}^3/\text{s}$ 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、既往最大と2位の値が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、2013年のイベントはExpおよびGPともに1/100より高頻度のイベントとして判断される。

ここに示さなかった島ヶ原、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Tailの厚い分布形状となっている。このため、外挿区間のクォンタイル推定においてAMSのGumbelは小さめ、GEVは大きめとなる。GPについては資料中の最大値と2位の値の関係やPOTのサンプルサイズによっては極端に小さな上限を有する分布関数となるこ

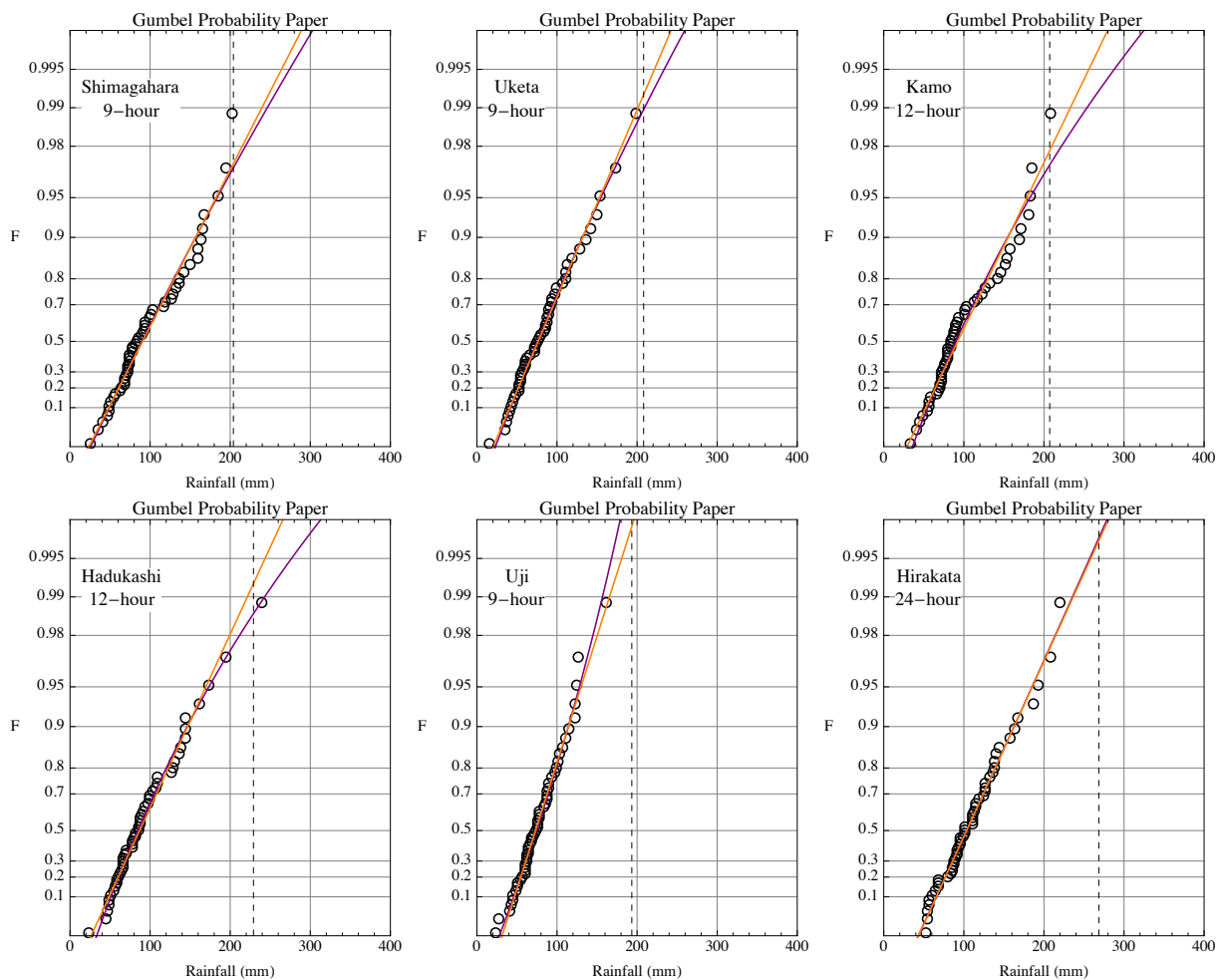


Fig. 16 Probability plots of AMS of n-hour catchment averaged rainfall at six principal points in the Yodo river basin
Vertical dashed line in each graph shows 2013 rainfall event. (Orange : Gumbel, Purple : GEV)

とがあり、注意を要する。Expが最も説得性を有しており、閾値を多少変えてもロバストである。

4. 台風18号洪水とわが国洪水記録との比較

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

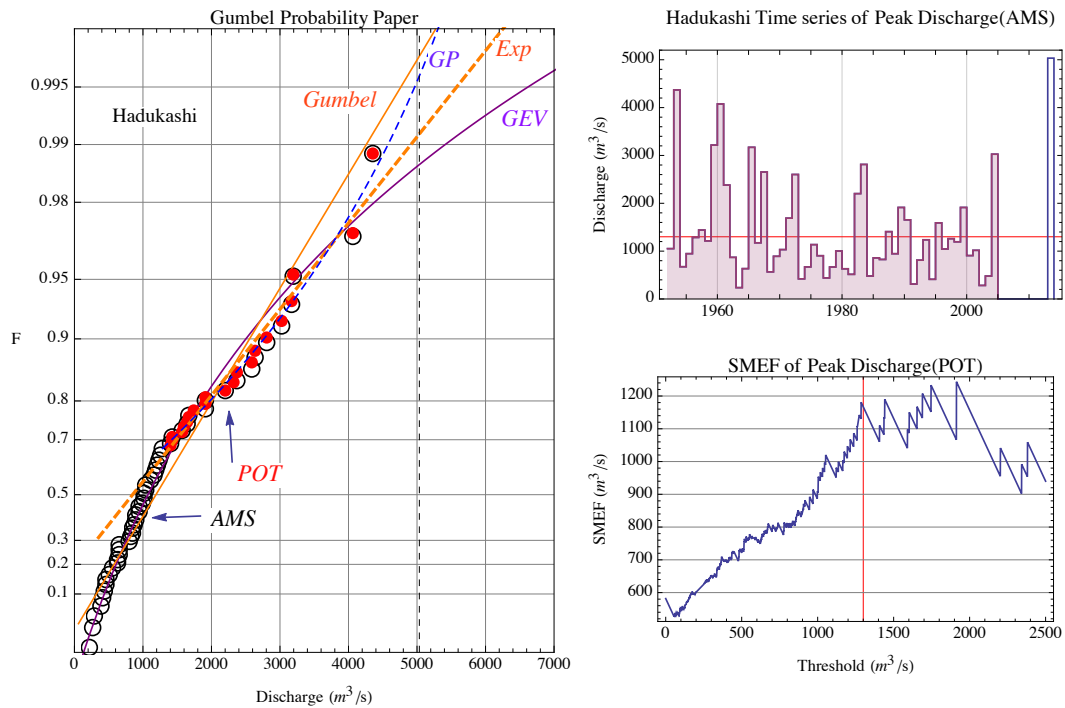


Fig. 17 Probability plot with AMS and POT, Time series of AMS and SMEF of POT on calculated discharge without dam operation at Hadukashi.

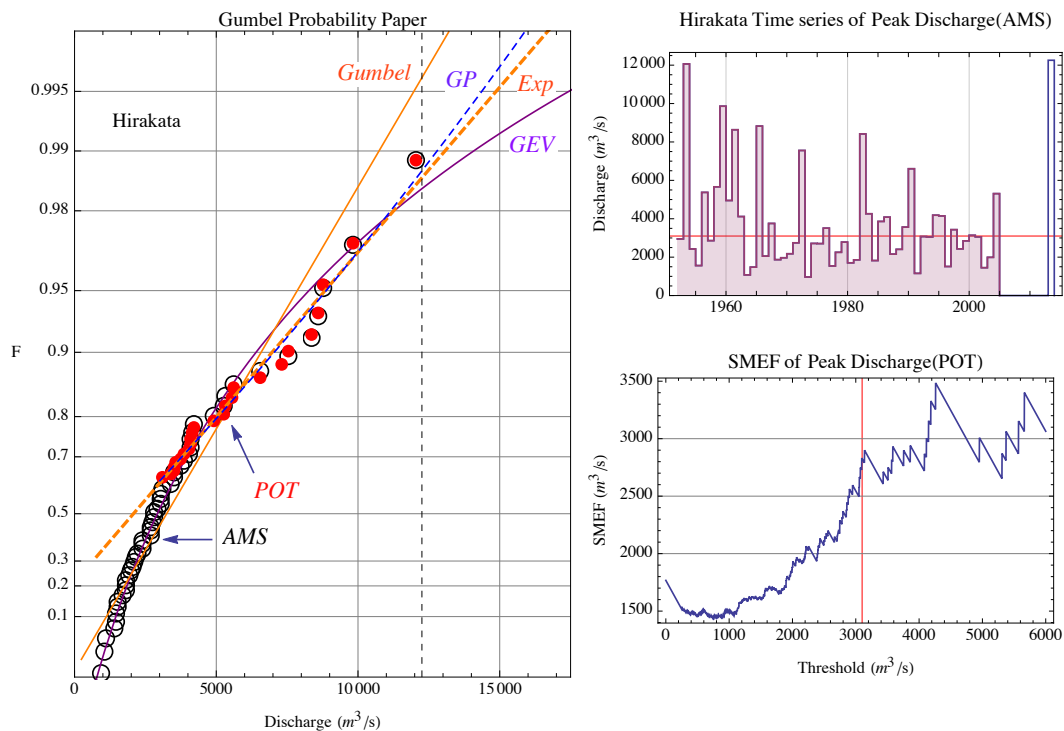


Fig. 18 Probability plot with AMS and POT, Time series of AMS and SMEF of POT on calculated discharge without dam operation at Hirakata, the reference point of the Yodo river.

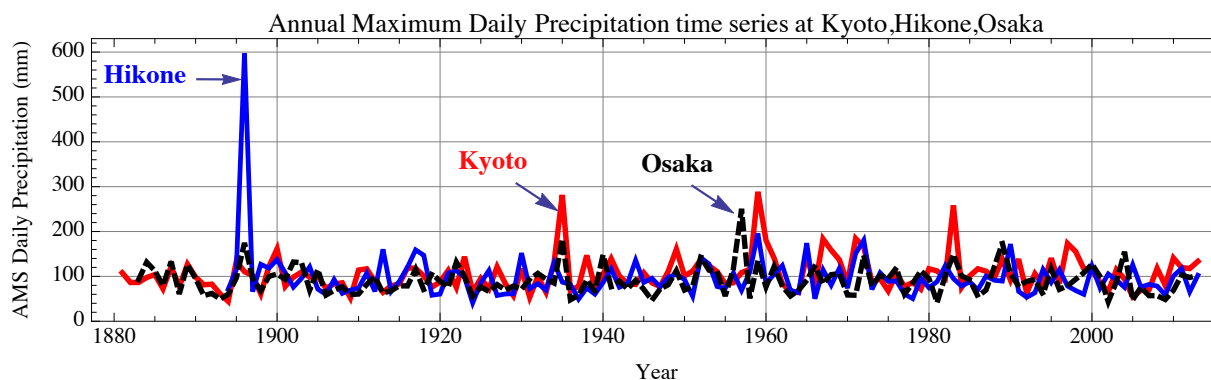


Fig. 19 Time series of AMS Daily Rainfall at Kyoto, Hikone and Osaka.

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 $3.5\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ が得られる。角屋・永井（1979）の洪水比流量曲線と比較してみると、今般の洪水の枚方地点での比流量 $3.5\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ は同面積の比流量曲線の値 $6.2\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ 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。

Fig. 19は淀川流域内で1900年以前から観測が続けられている気象官署である京都、彦根、大阪の年最大日雨量（国土交通省気象庁、2014b）の時系列である。これまでにいくつか大きな値が見られ、彦根の1896年の大雨は記録的である。これらの値に比べると2013年の年最大値は全く比較にならないレベルである。地点の日雨量と洪水に関する継続時間の流域平均雨量とは必ずしも同じように見ることはできないが、ダム群の高度な連携操作にもかかわらず一部で越水が見られた治水整備の現状を重く受け止める必要がある。

5. 現地の被害状況

5.1 調査日および調査対象地点

調査は2013年9月18日（水）に実施した。調査対象地点をFig. 20に示す。鴨川流域の京都市伏見区下鳥羽、桂川流域の京都市右京区嵯峨天龍寺（渡月橋）、亀岡市（請田、市街地）の被害状況と日吉ダムおよび世木ダムにおける流木の滞留状況について調査した。

5.2 京都市伏見区下鳥羽（鴨川）

京都市伏見区下鳥羽での鴨川左岸の堤防上での痕跡高をPhoto 1に示す。堤防天端から 0.39m の浸水高が確認された。堤防上には、当日の水防活動によって積み上げられた土嚢が残っており、土嚢の高さは堤防天端から 0.4m ほどであった。周辺住民への聞き取りをしたところ、この地点では9月16日5:30から9:30にかけ

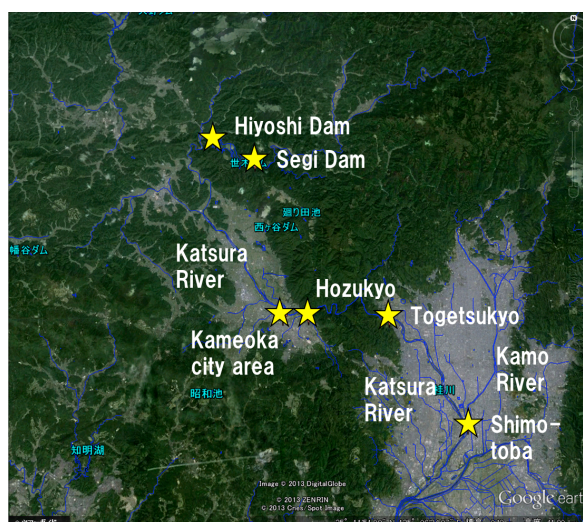


Fig. 20 Survey spot.



Photo 1 Inundation height on the left bank of the Kamo river near Shimo-Toba, Fushimi-ku, Kyoto city.

で鴨川が越水し、7:00～7:30が水位のピークであったとのことである。

5.3 京都市右京区嵯峨天龍寺（渡月橋）

桂川左岸の上流側から見た京都市右京区嵯峨天龍寺の渡月橋の様子をPhoto 2に示す。橋桁の下端付近まで流木が達している様子がわかる。渡月橋周辺の中之島や右岸では、腰の高さ（0.9m）程度の浸水高となっているところがあった（Photo 3）。

5.4 亀岡市（請田、市街）

亀岡市請田周辺の桂川と鵜ノ川の合流地点の様子をPhoto 4に示す。合流地点では桂川の右岸堤防が霞堤となっているとともに、下流が保津峡の狭窄部となっていることから、遊水地として機能が期待される地域となっている。合流点付近では高水敷より約2.3mの浸水高となっていた。

亀岡市街地（イオン亀岡店付近）の様子をPhoto 5に示す。亀岡市街地では約1mの浸水深となっていたことがわかる。



Photo 2 Togetsukyo Bridge looking from the upstream of the left bank of the Katsura river. Driftwoods reached the height of the bridge girder.



Photo 3 Inundation height at the right bank of the Katsura river, near Togetsutei Hotel.

5.5 日吉ダム、世木ダム

桂川の上流域にある日吉ダムと世木ダムの様子をPhoto 6、Photo 7にそれぞれ示す。世木ダムは日吉ダムの上流に位置し、関西電力が管理する発電用の重力式コンクリートダムであるが、日吉ダム湖（天若湖）が満水時にはほとんどが水没する。世木ダム直下には大量の流木が滞留している様子がわかる。

6. 日吉ダムの洪水調節操作と効果について

6.1 概要

台風18号災害では、桂川上流の日吉ダム（（独）水資源機構1997年完成）や由良川上流の大野ダム（京都府1961年完成）が大きな洪水流入量を記録し、洪水調節操作により下流の氾濫災害を大きく軽減させた。このうち日吉ダムは、堤高67.4m、総貯水容量6,600万 m^3 （うち、洪水調節容量4,200万 m^3 ）の多目的ダムであり、流域面積290 km^2 に対する洪水調節容量は145mm相当である（1/100の計画雨量は2日雨量で350mm）。

日吉ダムはFig. 21のように最大流入量1,694 m^3/s （9/16、7時）に対して最大約1,500 m^3/s のカットを行い、



Photo 4 Confluence of the Katsura river and the Unokawa river, the upstream of Hozukyo Gorge.



Photo 5 Inundation depth in the Kameoka city area (in front of Ion Kameoka store).

亀岡盆地、嵐山および桂川下流域に対して洪水水位の低下に大きく貢献した（国土交通省近畿地方整備局河川部，2014）。

このカット量を戻すと、例えば亀岡（保津橋）地点はFig. 22に示すように洪水水位を約1.5m低下させたと推定されている。この洪水カット量が下流に流下していたとすれば、嵐山（天龍寺）の流量を大きく増加させ、渡月橋を大きく越流して最悪の場合は渡月橋に大きな損傷が生じたり、さらに避難指示が出された下流の桂川右岸（羽束師地点）では堤防の越流量が増大し、大規模な破堤氾濫による甚大な被害が生じたりしていたことが懸念される。上記のことから、今回の日吉ダム洪水調節操作は、全国的にも極めて顕著なダムの効果を示す事例と考えられる。

6.2 ダム操作の検証

日吉ダムの当初計画では、1/100波形に対応する形で一定率・一定量放流（計画最大放流量500m³/s）の洪水調節操作が設定されている。しかしながら、亀岡を中心に河道の流下能力が十分確保されていないことから、中小洪水においても洪水調節効果が発揮されるように、150m³/sの一定量放流による現行操作が規定



Photo 6 Hiyoshi dam.



Photo 7 Accumulated driftwoods just downstream of Segi dam.

されている。その結果、概ね1/20程度の洪水規模までは治水効果がより優位となるが、これを超える規模の洪水時には治水容量を使い切ってしまうことが懸念される。

今回の洪水では、Fig. 21に示すように、実際にダムの洪水調節容量を使い切り、洪水時最高水位（サーチャージ水位）に近づくことが予想された。ダム操作の時間経過の詳細をFig. 23に示す。具体的には、今後の降雨・流出量予測とダムの残容量の関係から、9/16、5時前には、同9～10時頃に異常洪水時防災操作（ただし書き操作）の開始水位（EL.200.2m）に到達することが予想されたため、9/16、6時にダムに関する重要情報（計画規模を超える洪水時の操作を行う可能性の予告）を発出している。その後、同10時32分に実際に開始水位（EL.200.2m）に到達したが、下流水位が高いことから、被害軽減のために放流量を増加させずに貯留を継続した。さらに、実際に洪水時最高水位（サーチャージ水位）に到達した同11時25分に至っても、非

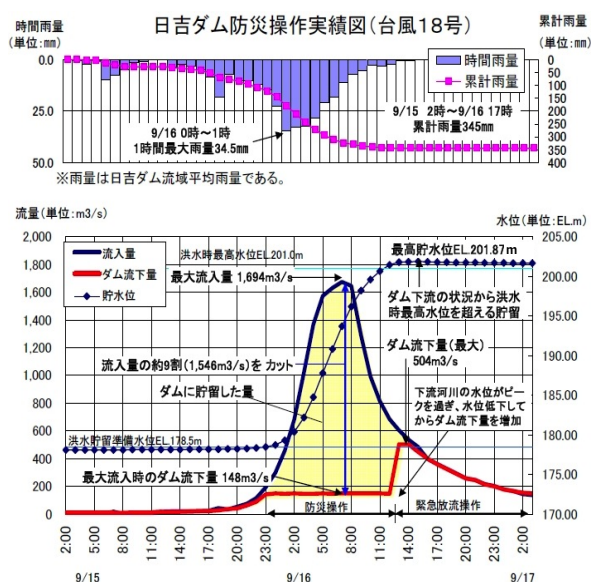


Fig. 21 Flood control of Hiyoshi dam (The Japan Water Agency).

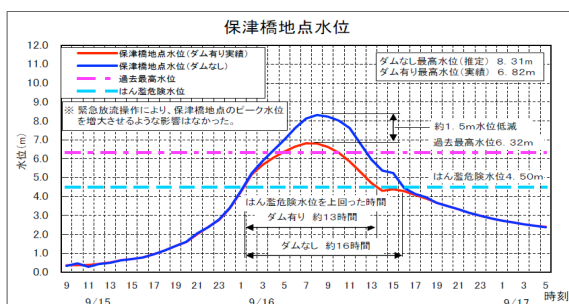


Fig. 22 Flood control effect of Hiyoshi dam (The Japan Water Agency).

常に高度な判断であったが、下流状況が引き続き氾濫の危険がある極めて厳しい状況であったことと、この時点では降雨が収束しており今後の流入量の低下が見込まれたことから引き続き貯留を継続した。最終的には、同12時1分に、流入量がピークを過ぎ、また、ダム下流の保津橋地点の水位が低下したことから、下流の状況を確認しながら放流量を増加（異常洪水時防災操作に移行）している。この際の最大放流量は500m³/sであり、その時点では下流水位はすでに低下してきており、被害の拡大はなかったと考えられる。

これらの関係を、日吉ダムを起点に亀岡～嵐山～桂川下流、さらには、これに順次合流してくる鴨川、宇治川、木津川、3川合流後の淀川本川の洪水ハイドログラフ（観測水位）を時間軸を合わせてプロットしたものがFig. 24である。これを見ると、以下のような重要な点を確認することができる。

- ・ 今回の洪水は、鴨川を含めた桂川、宇治川、木津川の3川ではほぼ同時刻の洪水ピークをもたらしている。
- ・ 3川の中では木津川の洪水流出がやや早い傾向にある（木津川では上流の高山ダムで4時以降最大1,100m³/sの洪水カットを行っており、この効果を考慮する必要がある）。
- ・ 日吉ダムは最大約1500m³/sカットの洪水軽減を実施し、最大放流量を約150m³/s一定に抑えたため、これが桂川の下流各地点の水位低下（ピーク時刻（亀岡（7時）、嵐山（9時）、桂川下流（9時））に大きく貢献した。
- ・ 日吉ダムの異常洪水時防災操作（ただし書き操作）への移行に伴い、桂川の各地点でわずかばかりの水位変化が認められるが、いずれも水位低下速度がやや遅くなった程度で大きな水位上昇は認められず、また、桂川下流（羽束師）ではほとんどその影響はない。
- ・ 桂川下流（羽束師）は9/16の4時から14時過ぎまで計画高水位（HWL7.86m）を上回る高水位が長時間継続した。
- ・ 堤防から越流した鴨川左岸地区の住民から洪水が2回来たとの証言が寄せられたが、場合により、3川合流によってもたらされた影響による水位上昇（6-8時ごろ）と、桂川自身や鴨川からの流量増による水位上昇（9-12時ごろ）の両者が時間遅れを伴って発生した可能性も否定できない。
- ・ 日吉ダムの放流通知が実際の放流開始よりも6時間も早い6時頃に出されているが、この情報に接した下流住民が、2回目の水位上昇をダム放流の影響であると誤解した可能性があり、今後、放流通知の出し方（タイミングとダムから当該地点までの流下時間に関する説明）を再検討する必要がある。

ある。

6.3 日吉ダムの効果

Fig. 22あるいはFig. 24で明らかなように、日吉ダムの効果は極めて大きいと考えられる。これを、亀岡、嵐山、桂川下流の3地区に分けて整理すると以下のとおりである。

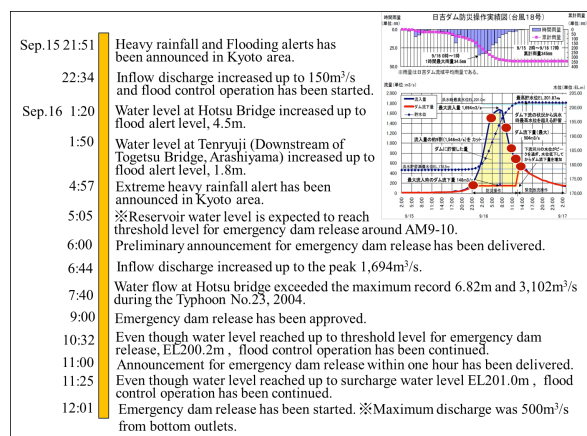


Fig. 23 Time line of flood control of Hiyoshi dam (The Japan Water Agency).

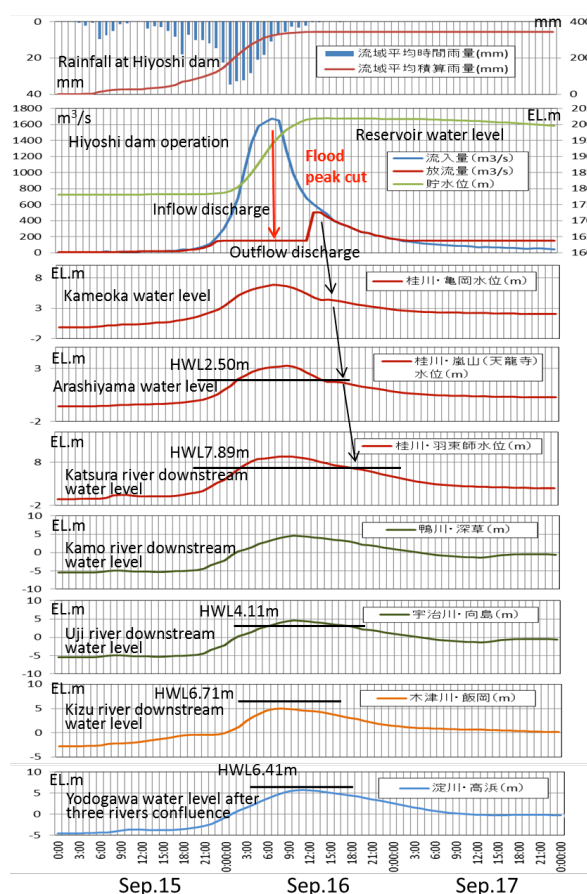


Fig. 24 Relationship of flood control of Hiyoshi dam and downstream water levels.

(1) 亀岡

従来より浸水常襲地域であり、河道整備とともに保津峡の開削が要望されてきた地域である。今回の日吉ダムの洪水調節により浸水深が1m以上軽減されたことで、浸水が生じたエリアにおいてもその影響度が大きく異なったことが想定される。特に、ホーム直下まで浸水した亀岡駅（Photo 8）やその周辺地区では、さらに水位が上昇することで、家屋においては床上浸水の増加、鉄道や商業施設では電気系統の障害などが大きく発生し、復旧に長時間を要していた可能性がある。

(2) 嵐山

嵐山地点では、現在、「桂川嵐山地区河川整備検討委員会」が組織され、治水目的の河道改修（河床掘削、河道拡幅、堤防嵩上げに加えて、固定堰の改築や撤去）と、景観の両立を図るべく検討が進められてきている。今回の洪水はこうした議論に大きな影響をもたらすと考えられる。国土交通省から発表されているように、今回の日吉ダムの洪水軽減効果により約0.5mの水位低下があったものと推定されている。今回の洪水では、渡月橋の桁下にまで水位上昇しているのが確認されており、ダムが無ければ河川水位が上昇して桁に水面が当たることで急激に上流水位が上昇し、渡月橋上流の左右岸から大きく越流し、今回は被害が限定的であった嵐山の中心地区である左岸側にも大きな影響が出ていたことが想定される。

また、Photo 7に示したように、日吉ダムには例年の処理量の約40倍に相当する約13,500m³もの大量の流木が捕捉されたことが報告されている。日吉ダム下流には、亀岡までの区間に、複数の道路橋やJR山陰線の鉄道橋梁が存在し、さらに下流には、嵐山のシンボルである渡月橋があり、仮にこれら大量の流木が洪水とともに下流に流れ、これらの橋梁に集積することで、洪水位のさらなる上昇をもたらすとともに、最悪の場合にはこれら橋梁が大きく損傷していた可能性も否定できない。

(3) 桂川下流

桂川下流では、計画高水位を10時間も上回る高水位が長時間発生し、特に桂川右岸（羽束師地点）では9/16、9時30分ごろには400m区間で堤防から越水が生じ、重点的な水防活動が行われるとともに、広範囲に避難指示が出された。この地区で破堤氾濫が生じると1,300戸近い床上・床下浸水と約1.2兆円の経済損失が生じる可能性があったと報告されている。日吉ダムがなければ、堤防からの越流量が増大し、大規模な破堤氾濫による甚大な被害が生じていた可能性も否定できない。この区間では、これまで引堤と掘削による河



Photo 8 Kameoka station flooded just under platform home (Photo: Prof. Tomoharu Hori).

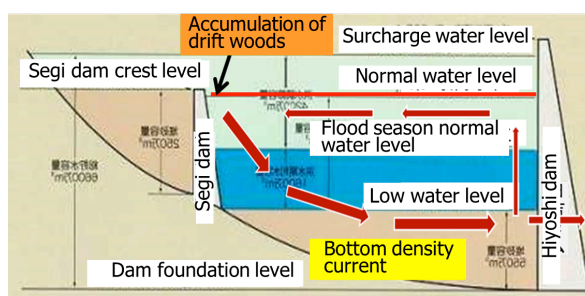


Fig. 25 Relationship of water current and drift wood accumulation in Hiyooshi dam reservoir.

川改修が行われてきていたが、これらの効果に加えて日吉ダムの洪水調節効果によって危機的な状況が回避されたと考えられる。

6.4 流木について

前述のように、今回の洪水では大量の流木が日吉ダムに流れ込み捕捉され、下流のさらなる洪水災害を未然に防止したと考えられる。

特に、これらの流木は日吉ダムの特徴であるダム湖の中に残された関西電力側の世木ダムの直下に集積しており、これを洪水前後で比較したものをPhoto 9に示す。これらの流木が世木ダム下流に集積した理由として、日吉ダム貯水池内にFig. 25に示すような流れが発生していたことが推測される。この流れの起動力は、世木ダムを越えて日吉ダム貯水池の中～下層に流れ込んだ洪水時の高濁度流（高密度流）であり、その補償流として貯水池表層に上流向きの流れが形成され、その流れが世木ダムからの越流水と合流して潜り込む領域（潜り点）に流木が長期間捕捉されたものと考えられる (Morris and Fan, 2010)。

次に、これらの流木がどこから来たかを考える。日吉ダム管理所では洪水前からダム上流河道の定点写真を記録しており、この分析によれば、Photo 10に示すように、河道内や河岸沿いの樹林化していた樹木の一部が久しぶりの洪水で倒伏して下流のダム湖に流入したことが推測される。このような記録は極めて貴重



Photo 9 Accumulated drift woods in Hiyoshi dam reservoir just downstream of Segi dam (The Japan Water Agency).

であり、今後のダム管理において、上流河道の定期的な記録の重要性を示唆している。

最後に、洪水氾濫の拡大の観点から見た、日吉ダムによる流木災害の防止について整理する。このような流木によって洪水被害が拡大する事例は、平成16年の福井豪雨などでも顕著であり、上流ダム群が流木を捕捉することによる効果（副次的効果）は、この福井豪雨時の九頭竜川水系真名川ダムや東海（恵南）豪雨時の矢作ダムなどでも指摘されている（角・谷崎，2007）。一方、今回も日吉ダム上流の河道で見られたように、久しぶりの大きな洪水がダム下流の河道を流下することに伴う河道内や河岸沿いからの新たな流木の発生が懸念される。日吉ダムの調節がなければ、ピーク時には最大 $1,700\text{m}^3/\text{s}$ もの洪水流量がダム下流の河道を流下していた可能性があり、この流量によって、下流河道からも新たな流木が発生していたことが懸念される。

これら一連の流木災害に伴う洪水氾濫の拡大防止効果を図示したものがFig. 26であり、ダムには「①ダム湖による流木の捕捉・流下軽減（直接的効果）、②洪水ピークカットに伴う下流河道からの追加的な流木発生の防止（間接的効果）」の両面の効果があるものと考えられる。今後、ダムの役割と効果について、流木災害と洪水氾濫の関係からも検証が必要と考えられる。

謝 辞

降水量分布図の元データは、XバンドMPレーダに関する技術開発コンソーシアムを通じて提供頂いた。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。



Photo 10 Fallen and discharged trees at upstream river channel before and after flood (The Japan Water Agency).

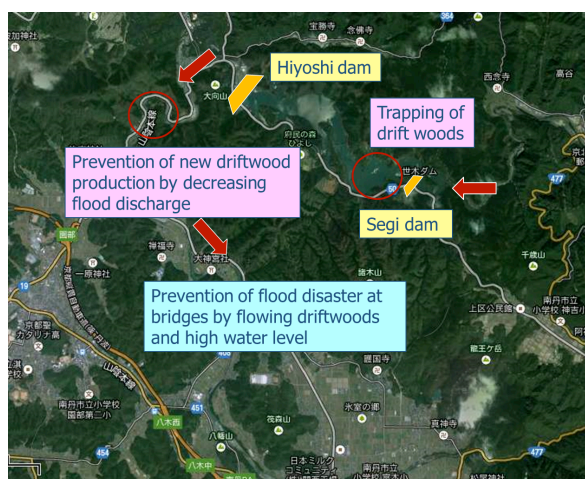


Fig. 26 Estimated prevention effects of drift wood driven flood disaster by Hiyoshi dam.

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，pp. 143-152.
- 国土交通省気象庁（2005）：異常気象レポート，http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/climate_change/2005/pdf/2005_all.pdf.
- 国土交通省気象庁（2013）：台風第18号による大雨，2013.
- 国土交通省気象庁（2014a）：日本近海日別海面水温，

- 気象庁ホームページ http://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/db/kaikyo/daily/sst_jp.html (2014.6.4参照) .
- 国土交通省気象庁 (2014b) : 過去の気象データ検索, 気象庁ホームページ, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2014.6.4参照) .
- 国土交通省気象庁大阪管区气象台 (2013) : 平成25年台風18号による大雨と暴風について (第2報) .
- 国土交通省気象庁気象研究所 (2013) : 平成25年台風第18号の発達とそれに伴う近畿地方の大雨の発生要因.
- 国土交通省近畿地方整備局河川部 (2014) : 平成25年9月台風18号洪水の概要, http://www.kkr.mlit.go.jp/river/saigai/20130916_typhoon18/saigaihoukoku04.pdf.
- 角哲也・谷崎 保 (2007) : 2004年福井豪雨における九頭竜川上流ダム群の洪水調節効果, 大ダム, p. 198.
- 総務省消防庁 (2013) : 台風第18号による被害状況等について (第11報) .
- Gregory L. Morris・Jiahua Fan著／角 哲也・岡野眞久監修 (2010) : 貯水池土砂管理ハンドブック, 技報堂.
- (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.

(論文受理日 : 2014年7月4日)