

1998年那珂川流域における豪雨・洪水災害について

宝 馨・今本博健・林 泰一・中北英一・市川 温・端野典平*・中村行雄
* 京都大学大学院工学研究科

要 旨

本論文は、1998年8月下旬に生じた那珂川流域の豪雨・洪水災害について若干の考察を行ったものである。災害発生直後の9月上旬から3月上旬までの間に現地調査・資料収集などを行うとともに、豪雨データのDAD解析、それに基づく流出解析によって起こりうる極大な流量の推定を行った。今回の事象は、これまでの当該地域の豪雨・洪水の記録を更新する未曾有のものであることが明らかになった。

キーワード：那珂川、超過洪水、レーダ雨量計、DAD解析、流出解析

1. はじめに

1998年（平成10年）は、国内外においていくつもの風水害が発生した。8月上旬の新潟における豪雨災害（武藤ら、1999）を皮切りに10月中旬の10号台風による氾濫・土砂災害まで、死者65名を数えた（日本河川協会、1999）。

8月26日から31日にかけて、本州南方太平洋沖に停滞した台風4号によってもたらされた暖かく湿った空気が、日本列島に停滞していた前線に入り込み、南東北・北関東を中心に発生した豪雨によって引き起こされた。福島県内で死者11名、栃木県内では死者5名、行方不明者2名にのぼり、洪水流量・氾濫の規模、道路・鉄道・農地等の被害も甚大なものであった。筆者らは、水戸市・那須町・西郷村など現地に赴き、その実態を目の当たりにするとともに、住民・行政に対するヒアリング、洪水時の空撮ビデオ、写真、新聞やテレビ等の報道情報、各種水文・気象データ等を収集し、調査研究を行なっている。本報では、その調査の概要と、那珂川上流域の豪雨・洪水について若干の解析を行なった結果を報告する。

2. 調査及び災害の概要

防災研究所の調査第一陣として、1998年9月7日から10日にかけて今本、林、宝、市川が現地に赴いた。7日夕方京都を発ち、翌8日未明、茨城県水戸市に到着した。早朝から水戸市内水府橋付近を予備的に調査し、その後、常陸太田市へ移動して、建設省関東地建常陸工事事務所を訪問し、空撮ビデオ等を交えて災害の概要説明を受けた。午後、水戸市へ戻り、水府橋周辺を再度調査した。さらに、茨城県庁土木部河川課を訪問し、災害の概要説明を受け、資料収集を行なった。その後那珂川に沿って那須町方面へ移動し、294号線余笹橋、寺子橋周辺を調査した。

9日は、国道4号線余笹橋付近を調査した後、福島県西郷村へ移動した。西郷村では最初に、村役場を訪問し、空撮ビデオを見ながら災害の説明を受けた。ビデオを見ている最中、役場の人がつぎつぎと集まって来て、災害時の状況を事細かに話してくれるのが非常に印象的であった。その後、総合福祉施設太陽の国へ移動し、土石流災害現場を調査した。施設敷地内では、いたるところで山腹斜面の崩壊が発生しており、また、5名の方が亡くなられたか

Table 1 Situation of precipitation (The data with * are provided by Nasu Town Fire Union)

Name of Station	Total rainfall (mm)
Nasu	1253
Happougahara	931
Otawara	578
Kuroiso	636
Kuroiso Fire Station*	612
Osawa	1091
Yumoto Branch*	1087
Itamuro	741
Itamuro Branch*	552
Kurotahara	787
Kurotahara Branch*	699
Shiobara	773
Takabayashi	981
Karasuyama	238
Mito	109

らまつ荘の内部には、泥が天井にまで達した形跡が残っており、土砂災害の恐ろしさをあらためて痛感した。午後、那須町役場にて資料収集を行なったのち、那珂川支川黒川の落橋現場や JR 豊原駅線路脇斜面崩落現場、那須スイミングドーム前の河川公園流失現場を調査した。夕方、現地を出発し、10 日深夜京都に到着した。

第二陣以降は、9 月下旬、12 月上旬にそれぞれ中北、中川らが現地を訪問し、調査・資料収集等を行った。さらに、平成 11 年 3 月 5 日～6 日、宝、市川が那珂川流域を再び訪問し、その後の復旧状況などについて調査を行った。9 月及び 3 月の調査で訪れた主要地点を Fig. 1 に示す。この間、建設省の協力を得て、流域内の時間単位雨量及び水位・流量データ、赤城山レーダ雨量計データなどの収集を行っている。

被害の概要については、すでに多数の災害調査報告書（土木学会緊急災害調査団, 1998; 土木研究所福島県・栃木県豪雨災害現地調査団, 1998; 牛山, 1998a), 建設省のパンフレット（建設省関東地方建設局 常陸工事事務所, 1998), www ページ（福島県, 1998; 栃木県, 1998; 土木学会緊急災害調査団, 1998; 牛山, 1998b) 等で報じられているところであるが、ここでもう一度まとめておく。

2.1 降雨状況

8 月 26 日から 31 日にかけて、栃木県・福島県を中心に記録的な豪雨が発生した。とくに、栃木県那須町では、最大時間雨量が 90 mm に達し、また連続雨量が年間平均降水量の 3 分の 2 を超えるなど、記録的な豪雨となった。その要因としては、25 日ごろから関東・東北地方にかけて前線が停滞し、そこに台風 4 号が接近してきたこととともない、南から湿った風が吹き込んだこと（土木学会緊急災害調査団, 1998; 牛山, 1998a), また、その南風が栃木県北部の山地にぶつかり、上昇気流が発生して強い雨を降らせたこと（土木学会緊急災害調査団, 1998; 建設省関東地方建設局 常陸工事事務所, 1998) などが報告されている。今回の豪雨は 300 年確率程度という「超過的」な豪雨であったという土木研究所の試算（西郷村の真船地点の年最大日降水量に一般化極値 (GEV) 分布を適用) もある（土木研究所福島県・栃木県豪雨災害現地調査団, 1998)。

Fig. 2 に流域の概要と、雨量観測所及び水位観測所の位置を示す。Fig. 3 は、那珂川流域を含む領域における 8 月 26 日から 31 日までのアメダス総降水量分布と那須で観測された時間雨量の時系列データを示している（牛山, 1998a)。また、Table 1 は、那珂川流域で観測された、8 月 26 日降り始めから 31 日降り終わりまでの総雨量をまとめたものである。広範囲に強い雨が継続して降ったことがよくわかる。

2.2 那珂川下流域における河川出水・浸水状況

上述の集中豪雨によって那珂川は急激に増水し、多くの水位観測所で警戒水位を超えた。水戸市水府橋水位観測所では、8 月 27 日 16 時に警戒水位の 4 m を超える 4.20 m に達し、さらに 28 日 10 時 30 分には 8 m を、11 時 30 分には計画高水位 8.15 m を超えて、14 時には最高水位 8.43 m を記録した。8 月 29 日 13 時には一旦警戒水位を下回ったものの、ふたたび水位が上昇し、30 日 20 時 30 分には 8.20 m となって、計画高水位を二度にわたって超える洪水となった。

Fig. 4 は、水府橋水位観測所で観測された水位のハイドログラフである。実線が今回の出水のもので、点線は昭和 61 年 8 月の洪水時の水位である。実線の矢印は洪水警報が出された時刻、点線の矢印は洪水注意報が出された時刻を示している。今回の出水が昭和 61 年の洪水と比較して特徴的なのは、水位のピークが二つあることである。一回目の出水で水位が 4.5 m を超えた 28 日の 0 時 40 分には、「那

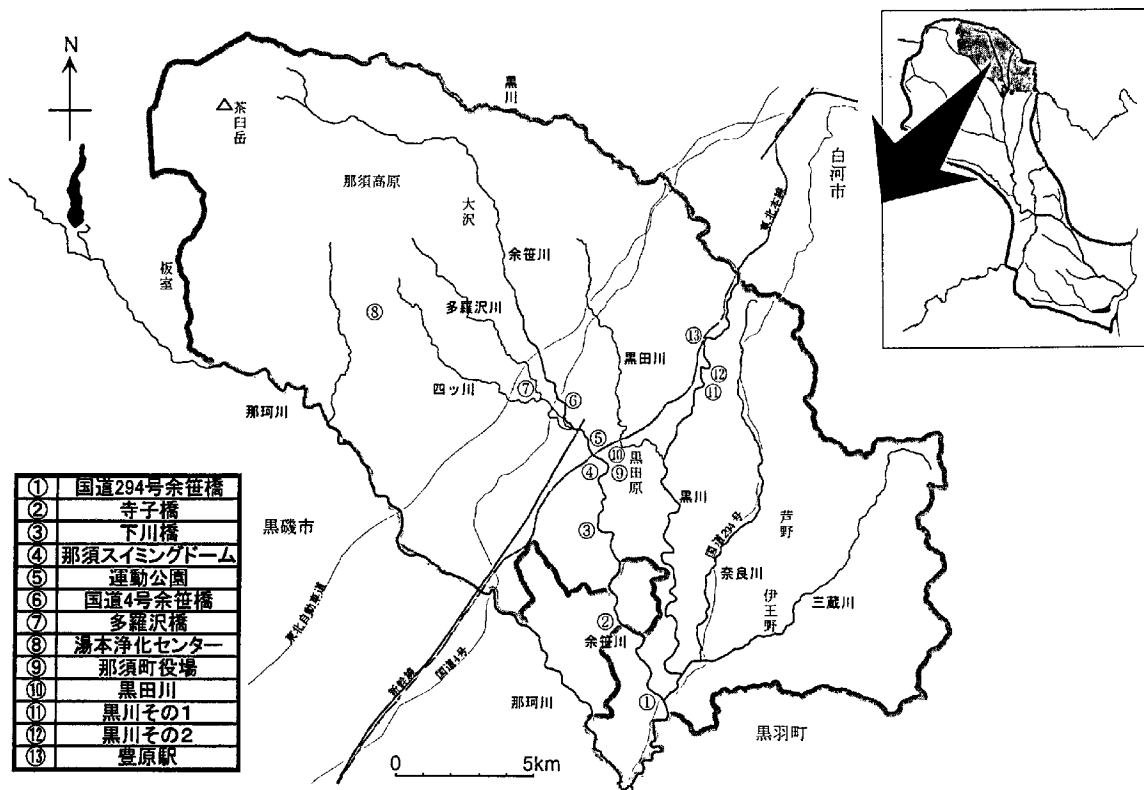


Fig. 1 Locations visited by the authors

珂川の水府橋の水位は28日6時頃には8.0～8.5 mの水位が予想されます。」という警報が出され、4時30分には水戸市によって約39,400人に対して避難勧告が出された。この避難勧告は、29日10時にはいったん解除されたが、二回目の出水時には30日の午前8時15分に「那珂川の水府橋の水位は30日15時頃には8.0mを超える水位が予想されます。」という内容の警報が出されたあと、10時30分に再び避難勧告が出され、13時には避難指示に強められた。さらに20時50分には「那珂川の水府橋の水位はピークに近づきつつあり、30日22時頃には8.4 m程度の水位で水位すると予想されます。」という三度目の警報が出された。この二つ目のピーク前後には、かなりの緊迫感があったことが窺われる。

Table 2 は、浸水被害をまとめたものである。浸水面積の[]内の数字は、昭和61年8月の出水時のものである。今回の出水による浸水被害は、昭和61年の出水時に比べれば小さいものの、かなり広い範囲にわたっている。

2.3 那珂川上流域における被害状況

那珂川流域の最上流部是那須町である。平成10年9月9日午前8時現在の那須町の資料によれば、人的被害として、死者3名、行方不明2名、負傷者

19名、建物被害として、住家の全壊11棟、半壊14棟、流失13棟、床上浸水177棟、床下浸水381棟、非住家被害696棟（うち公共施設5）、がとりまとめられている。耕地（田畑）の被害は、流失・土砂流入が457 ha、冠水が461 ha、道路損壊が266箇所、橋梁損壊・流失が43箇所、堤防決壊2箇所、山（崖）崩れ44箇所、鉄軌道被害2箇所であった。JR東北本線の黒田原－豊原間で大規模な斜面崩壊が発生して9月25日まで不通となった。被災世帯数は759世帯、被災者数は2,716人であって、那須町人口約27,600の10分の1が被災したことになる。

3. 豪雨のDAD解析

3.1 雨量データについて

DAD解析は、最大雨量の面的時間的広がり进行を明らかにするものである。桑原は、対象地域において、面積と降雨時間を指定した場合に起こりうる最大面積雨量を推定する技術としてDAD解析を行っている（桑原，1988）。そこで、空間的広がり进行を推定する手段として雨量の空間的分布を電力値として観測できるレーダー雨量計を用いることが考えられる。本研究では、現段階で利用できる平成10年8月末の豪雨のレーダーデータを解析対象とした。

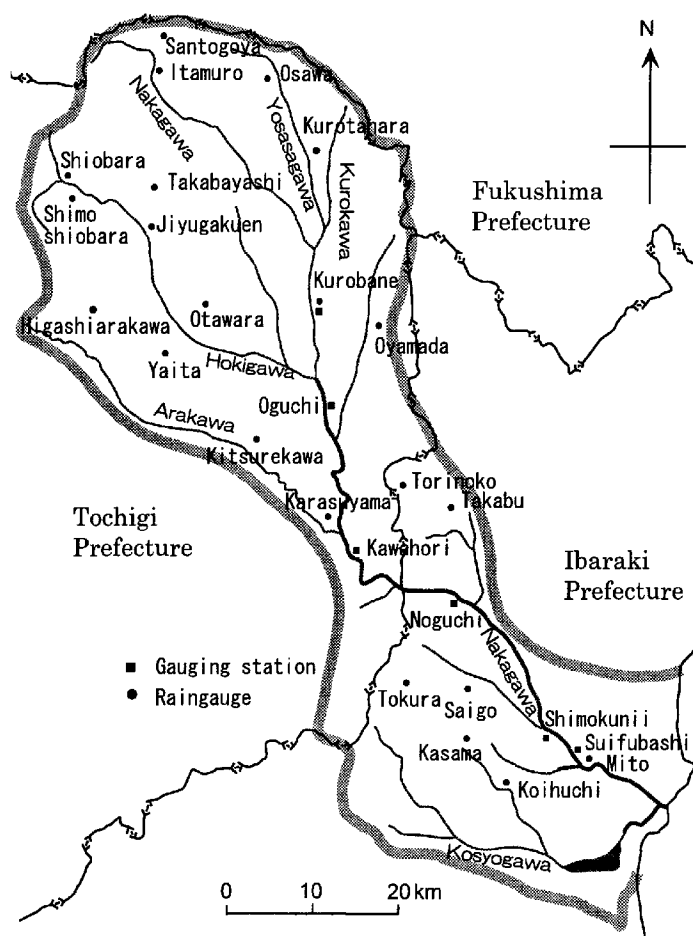


Fig. 2 The Nakagawa river system

筆者らは、過去 20 年程度の雨量年表を調べ、那珂川流域において豪雨の発生した時期を 10 期間抽出した (Table 3)。

この期間について、Fig. 2 に示した 22 地点の建設省地上雨量計で観測された時間雨量系列を収集し、豪雨記録の更新状況を取りまとめた。Table 3 より、1 時間雨量、3 時間雨量、1 か月雨量、年降水量が、年を経るにしたがって次々と更新されていることがわかる。ここでは豪雨の DAD 関係を、以下の 2 つの方法を用いて求める。

(A) 地上雨量を用いる方法：建設省と、地元の消防組合と湯本浄化センターの雨量観測所で記録された雨量値を用い DD 解析を行う。DA 解析の際には対象地点から最も近い観測所の雨量を対象地点の雨量とする最近隣法を用いて面積雨量を決める。

(B) レーダー雨量を用いる方法：受信電力値からレーダー反射因子 Z_e が求まる。本研究では Z_e と降雨強度の関係を示す $B-\beta$ 法 ($Z = B \cdot R^\beta$) を

用いる。 B 、 β を以下に示す方法で決定し、空間的に分布した雨量値を得る。

3.2 レーダー雨量の補正について

建設省の赤城山レーダーの、PPI (1) (仰角+0.2 度) データを利用する。那珂川流域はレーダー中心から東北東の方向に位置し、定量範囲 120km にかろうじて含まれる。本研究では $B-\beta$ 法を用いてレーダー雨量を推定する。

B 、 β は、対応する地上雨量とレーダー雨量の誤差二乗和が最小になるように最適化する。

$$f(B, \beta) = \sum_i^n (R_{Ri} - R_{Gi})^2 \rightarrow \min$$

ここで、地点番号 i の観測所における地上雨量を R_{Gi} 、その観測所に対応するレーダー雨量を R_{Ri} とした。その計算方法としては、まず適当な B 、 β の

Table 2 Situation of inundation damage (Hitachi Work Office, Kanto Regional Construction Bureau, Ministry of Construction,1998)

	Inundated area (ha)		Above the floor level houses	below the floor level houses	Total houses
Mito city	709	[1934]	285	344	629
Hitachinaka city	211	[803]	83	140	223
Gozenyama village	148	[257]	23	15	38
Naka town	140	[121]	1	12	13
Jyohoku town	41	[67]	3	18	21
Oarai town	41	[134]	0	1	1
Omiya town	16	[106]	0	0	0
Katsura village	73	[92]	0	0	0
Motegi town	39	[100]	9	11	20
Karasuyama town	305	[369]	32	34	66
Bato town	1	[45]	0	0	0
Ogawa town	1	[89]	0	0	0
Total	1724	[4117]	436	575	1011

* The numerals in the brackets are recorded on 1986 food

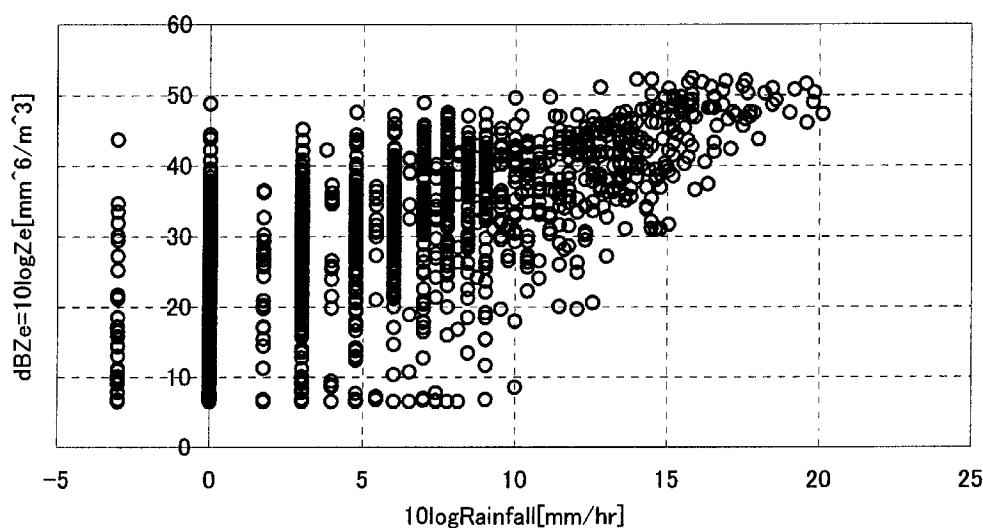


Fig. 5 Scatter diagram of Z_e and rainfall on the ground

ダーの標準値 $B = 300$, $\beta = 1.56$ に固定してレーダー雨量を求める。

Case 2 流域全体で同一の B , β を逐次補正する。那珂川流域内の地上雨量計 23 地点（1998 年豪雨時に稼働中だったもの）すべてを用いて補正を行なって得た B , β によってレーダー雨量を求める。

まず、全流域における毎時刻の最大値を地上雨量、Case 1, Case 2 それぞれについて求めた (Fig. 6)。

地上雨量と Case 1 を比較すると、27 日 1 時から 6 時頃までの強い雨が地上雨量よりも約 20mm/hr 過小評価されている。次に地上雨量と Case 2 を比較すると、上の時間帯において Case 1 より大きい雨量を推定している。さらに全流域における毎時刻の地上雨量とレーダー雨量との RMSE（平方根平均二乗誤差）をそれぞれの場合について求めた (Fig. 7)。全ての時間で Case 1 より Case 2 の方が RMSE が小さくなっているのがわかる。

Table 3 Main heavy rainfall events in the Nakagawa basin from 1978 to 1996

Time period of heavy rainfall	Station	Duration	Rainfall in the duration (mm)
1978/7/7 ~ 12	Itamuro	1 hr	45.5
1981/8/21 ~ 23	Shiobara	1 day	314.5
1981/10/21 ~ 22	Torinoko	3 hr	84.0
1982/8/24 ~ 31	Yaita	1 hr	89.0
1986/8/2 ~ 4	Otawara	1 day	293.0
	Torinoko	1 day	269.3
	Takabayashi	1 day	192.7
	Itamuro	1 day	315.0
	Itamuro	3 hr	110.0
1989/7/24 ~ 8/2	Itamuro	1 hr	60.5
	Torinoko	1 year	1882.2
	Itamuro	3 hr	120.5
1991/8/2 ~ 4	Itamuro	1 month	889.0
	Itamuro	1 day	366.0
	Itamuro	3 hr	133.0
	Yaita	1 month	505.0
	Takabayashi	1 month	531.0
1992/8/26 ~ 29	Otawara	1 hr	81.0
1994/9	Torinoko	1 month	510.2
1995/7/8 ~ 19	Torinoko	1 hr	54.0

全流域における毎時刻のレーダー雨量と地上雨量との相関係数を Fig. 8 に示す。ほとんどの時間帯において Case 2 の相関係数が Case 1 を上回っている。以上から、地上雨量をそのグリッドセルでの真値とすると Case 1 より Case 2 の方がよい推定値を与えるといえる。ゆえに以下では、Case 2 のレーダー雨量を用いる。

3.3 DD 解析

DD 曲線とは降雨時間 (Duration) と最大地点雨量 (Depth) の関係を示すものである。DD 式として以下のものを用いた。

$$I = \frac{a}{t^c} \quad \text{Sherman (1904)} \quad (1)$$

定数 c は日本の最大地点雨量観測値の包絡線 (宝, 1997) より、 $c = 0.532$ とした。定数 a の値は、観測値を包絡するように決める。

3.1 に示した地上雨量を用いる方法 (A) において、1978 年から 1996 年までのデータセット (Fig. 2 の建設省の雨量観測所 22 地点) を用いた解析結果と 1998 年のデータセット (22 地点に消防組合 4 地

点と湯本浄化センターをあわせた計 27 地点) を用いた解析結果との比較する。Fig. 9 に、各降雨継続時間ごとに求めた最大値をプロットした (1978 年から 1996 年：三角印, 1998 年：丸印)。今回の豪雨が、すべての継続時間において記録を塗り替えたことがわかる。平成 10 年を含む解析結果により得られた曲線の定数 $a=174.4$ は、湯本浄化センターにおける 27 日午前 1 時から午前 6 時までの 5 時間雨量 370.5mm により定まった。この値は 1 時間に 174.4mm 降り得ることを示唆している。

次に上で求めた (A) の結果と、レーダー雨量を用いる方法 (B) (3.1 参照) の場合の比較をおこなう。Fig. 10 は 1998 年の雨量値について先と同様に、方法 (A) の結果得られた最大値を丸印、方法 (B) の結果は四角印でプロットしたものである。方法 (B) の場合、定数 $a=187.7$ の値を決定したのは、湯本浄化センターから北に 6km、東に 3km の地点における 27 日午前 2 時から午前 5 時までの 3 時間雨量 313.9mm である。これは 1 時間に 187.7mm 降り得ることを示している。

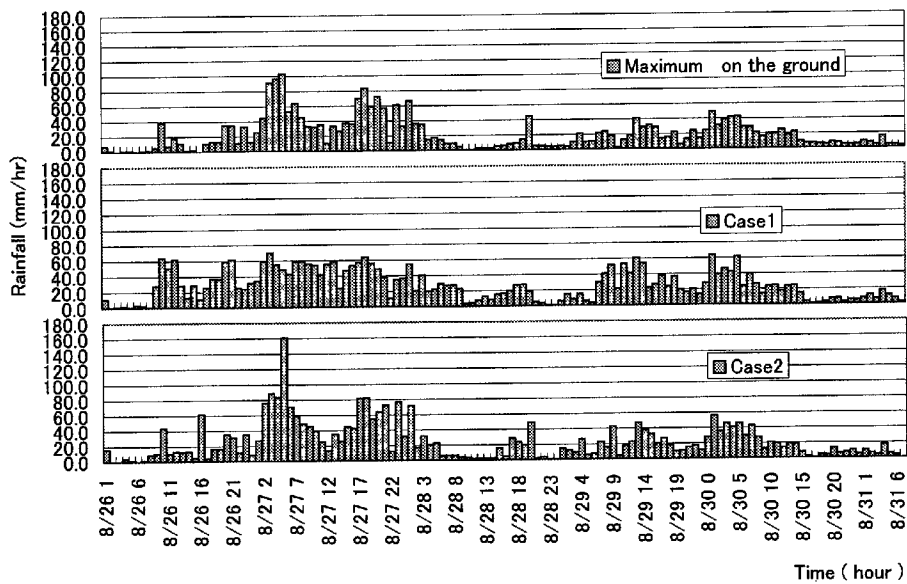


Fig. 6 Comparison of maximum hourly rainfall at each time

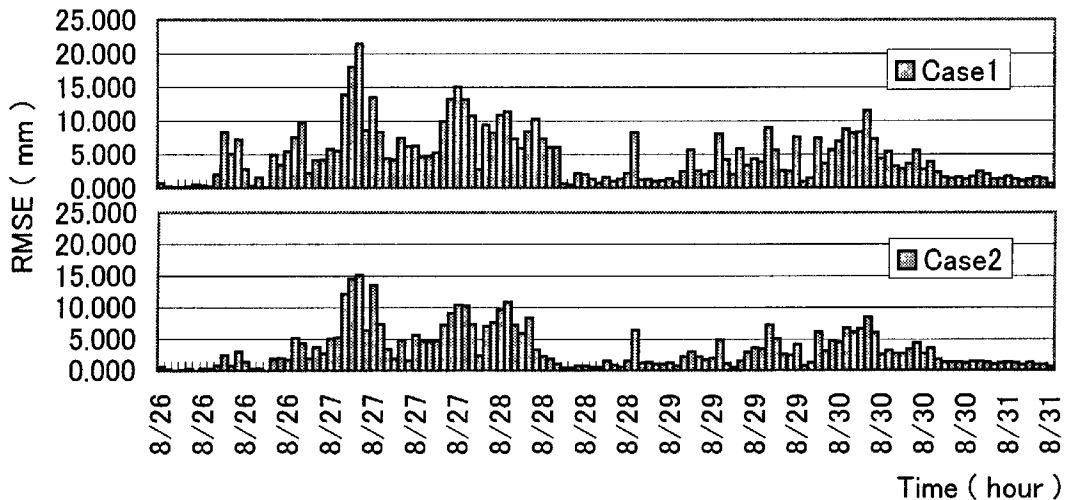


Fig. 7 Comparison of RMSE between the rainfall intensities by raingages and by radar (Case 1 and Case 2)

レーダー雨量を用いる際、地上雨量観測所上のグリッドセルにおいてもレーダー雨量の値を用いた。ゆえに推定誤差のため方法 (A) の雨量値が方法 (B) の雨量値を超えている部分がある。しかしレーダー雨量を用いることで、Fig. 10 の継続時間 2 時間以内では DD 曲線により近い値が得られた。地上雨量観測所では捕らえることができなかった短期的な豪雨をレーダー雨量計で捕らえることができたといえる。

ここで収集した 1978 年から 1996 年の時間雨量系列に対して得られる包絡線は、 $P_o = 96.4t^{0.468}$ となる。1998 年の豪雨については方法 (A) の場合、 $P_o =$

$174.4t^{0.468}$ ，方法 (B) の場合、 $P_o = 187.7t^{0.468}$ となった。

3.4 DA 関係の求め方について

本節では、豪雨の面的な広がり方を考慮する。DA 曲線とは、降雨面積 (Area) とその最大平均面積雨量 (Depth) の関係を示すものである。

従来は面積と雨量の関係を求める方法として、各流域分割部分の面積雨量を順次連結したり、流域平均雨量と面積の関係から、特定の選定面積に対する平均雨量を求めていた。このとき、一つの流域分割部分が大きくなると Horton 式に必要とされる、雨

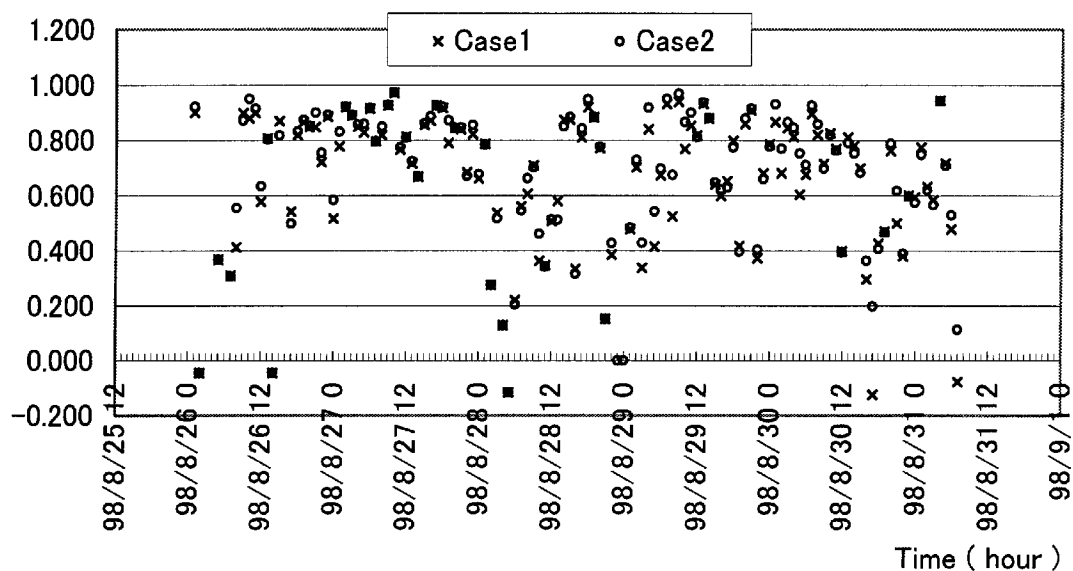


Fig. 8 Comparison of correlation coefficient between the rainfall intensities by rain gauges and by radar (Case 1 and Case 2)

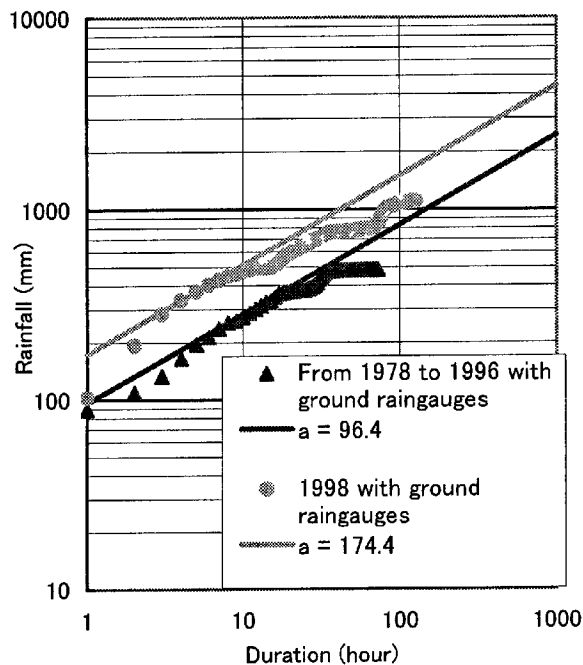


Fig. 9 Comparison of maximum data in 1998 and before 1997 in DD analysis

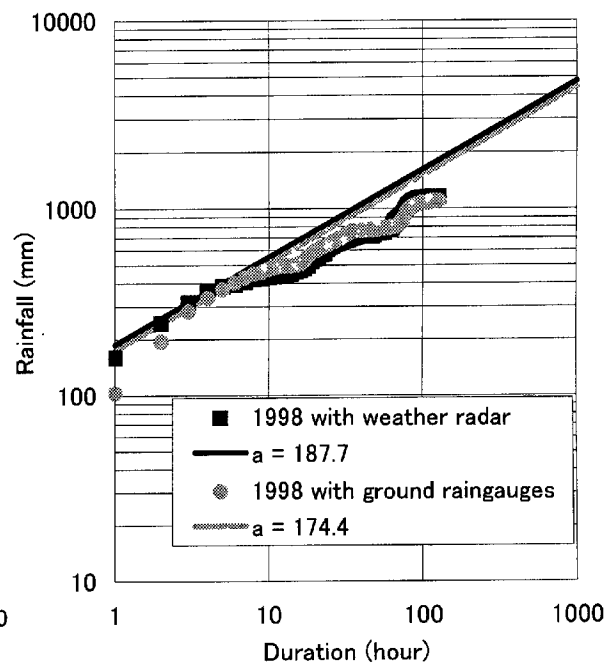


Fig. 10 Comparison of maximum data in 1998 in DD analysis using weather radar and ground rain gauges

域中心位置の考慮が難しくなるという問題点がある。そこで本研究では、次のような方法を提案する。一つはある面積一定の図形を全流域内で動かして、図形の面積と雨量の関係を求める方法である。この方法を面積固定法（または円形 DA モデル）と呼ぶことにする。もう一つは、雨量強度をある値に固定してその値を持つ面積と雨量との関係を求める方法であり、雨量強度固定法と呼ぶことにする。すなわち、

(1) 面積固定法（円形 DA モデル）：対象流域を

覆う間隔 L の格子を考え、各格子点に雨量を与える。面積一定（半径 R ）の円（Fig. 11）を全流域にわたって移動させる。そして、円と重なるグリッドセル上の格子点における雨量値を用いて、円に含まれる領域の面積雨量を求めてゆく。次に面積を変え、同様にする。このようにして円の面積に対応する最大面積雨量値を求める。

(2) 雨量強度固定法（不定形モデル）：上と同様

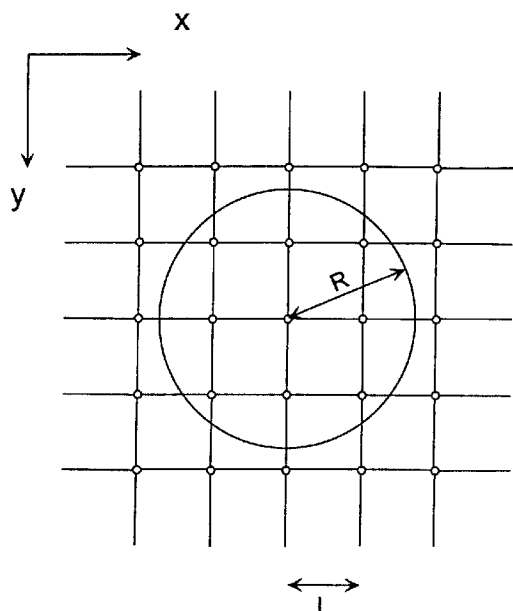


Fig. 11 Constant area method

に対象流域を覆う間隔 L の格子を考え、各格子点に雨量を与える。そして対象流域を底面とし、雨量値を標高とする地形を考える。ある標高（つまり雨量）をとおる平面で山をきり、その断面積と断面より上部の山の体積（断面積に対する総雨量）を求める。そして、最大面積雨量とそのときの面積との関係を求める。ただし本研究では山の頂上を雨量中心と考え、一つの山には一つの頂上があると仮定した。これは、一つの雨域には最大雨量点があると仮定したことに対応している。

3.5 DAD 解析

以上の方法で求めた DA 曲線が、降雨の継続時間によって大きく異なるので、本研究では経験式である Horton 式の係数 α を時間 t の関数とした拡張 Horton 式を用いる。そして P_a （降雨中心における最大地点雨量）に上で求めた DD 式を代入することで DAD 曲線を表す DAD 式を推定する（桑原，1988）。ここに、 P_a ：面積 A に対する面積雨量の最大値である。

$$P_a = a \cdot t^{1-c} \exp(-u \cdot t^{-v} \cdot A^n) \quad (2)$$

最初に面積固定法を用い、雨量を (A)、(B) の方法で与えた場合の比較を行なう。Fig. 12 をみると、(B) の曲線は (A) の曲線よりも面積 A が小さいときの減少する割合が大きい。これはレーダー雨量計が局所的豪雨を捕らえているためである。また

Table 4 Area of nearest regions (1998 Flood)

Station	Area (km ²)
Santogoya (abolished)	0.0
Itamuro	113.7
Osawa	81.9
Kurotahara	46.5
Takabayashi	118.8
Shiobara (abolished)	0.0
Shimoshiobara	150.8
Jiyugakuen (abolished)	0.0
Higashiarakawa	112.9
Otawara	126.3
Kurobane	183.5
Yaita	137.9
Oyamada	127.0
Kitsurekawa	146.4
Takabu (abolished)	0.0
Torinoko	223.9
Karasuyama	175.4
Tokura	243.8
Saigo	165.1
Kasama	88.2
Koihichi	222.2
Mito	271.8
Yumoto purification plant	47.5
Kuroiso fire station	116.7
Kurotahara branch	179.8
Yumoto branch	47.3
Itamuro branch	81.4

DAD 曲線に対して、(A) の方法で得た点は比較的ばらつきがある事が分かる。Table 4 に (A) の方法において、1つの地上雨量計が代表する面積を示す。このように地上雨量計が密でない地域では局所的豪雨は捕らえられにくい。捕らえられない場合には、特に継続時間と降雨面積の小さいときに過小評価する恐れがある。しかし、面積と継続時間が大きくなるにつれて方法 (B) の曲線に近づき、最近隣法で面積雨量を推定する場合にもよい結果が得られそうである。次に (B) の場合における面積固定法と雨量強度固定法の比較を行なう。上と同様に継続時間と面積が小さいところでは、面積固定法の値を上回っている (Fig. 13)。原因としては以下のことが考えられる。面積固定法の場合、その面積内で雨量の小さい格子が含まれるとその分だけ面積雨量

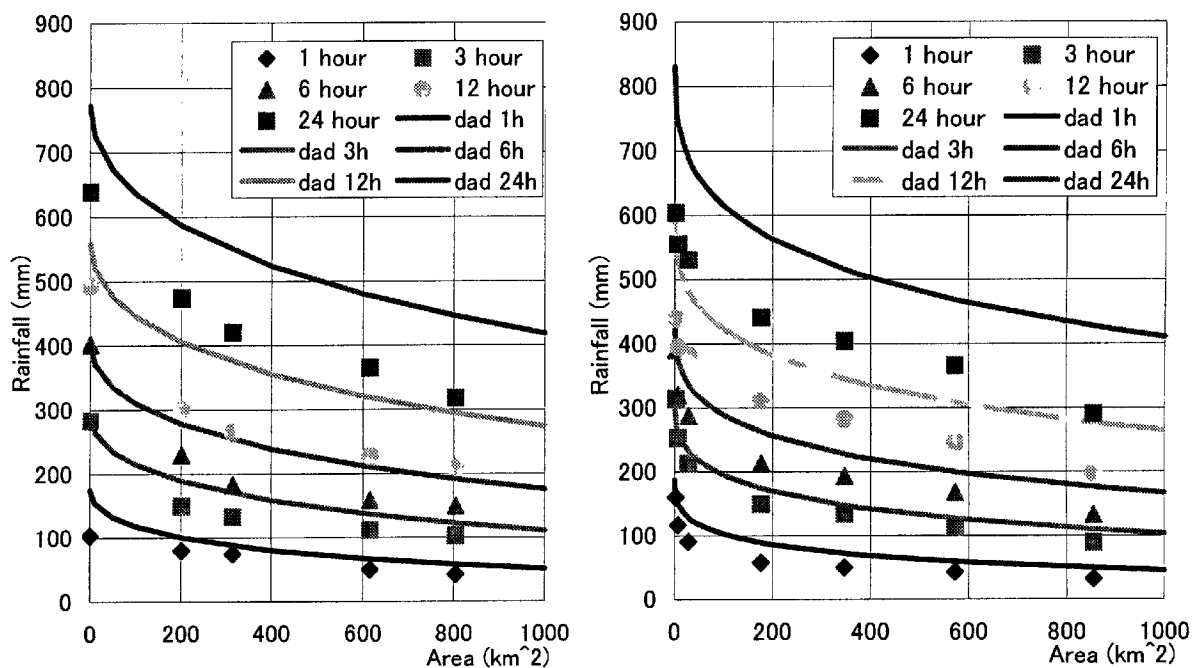


Fig. 12 DAD analysis using constant area method (left : with ground raingages , right : with weather radar)

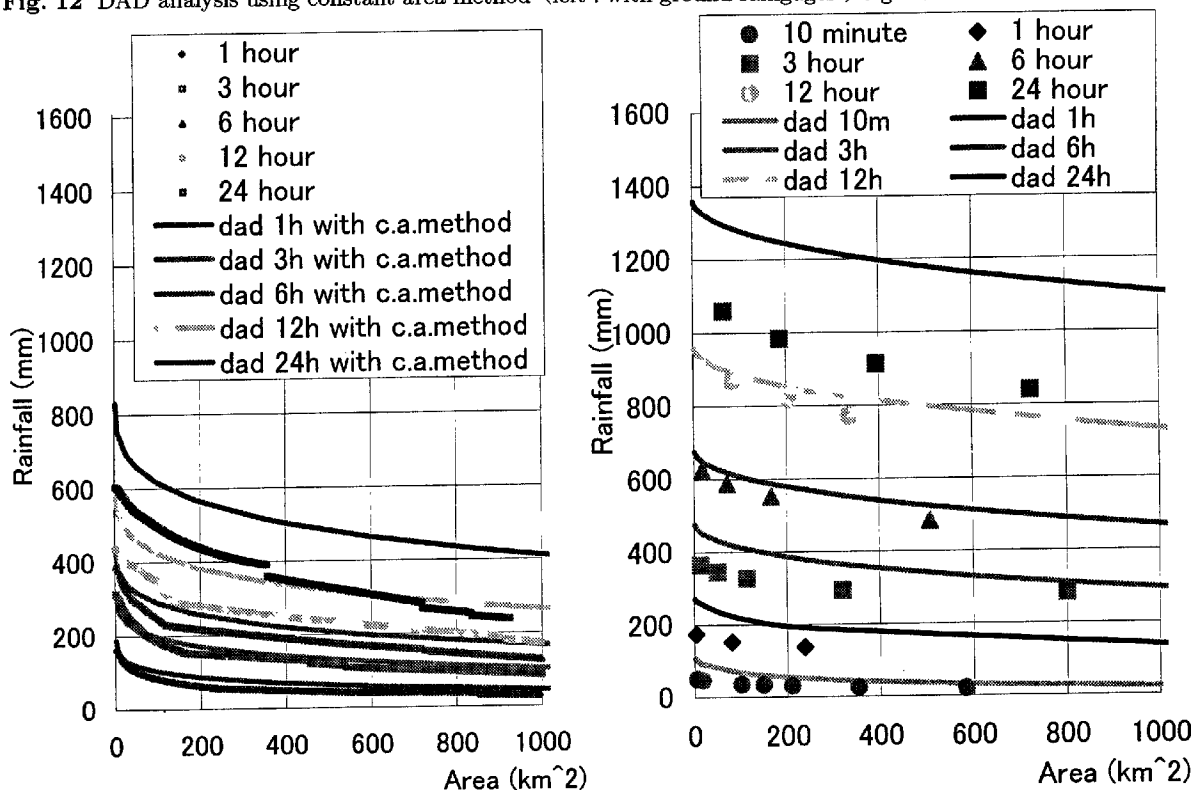


Fig. 13 DAD analysis (left : using constant rainfall method , right : in all Japan)

が下がることになる。ところが雨量強度固定法の場合には、等雨量線毎に柔軟に面積を変えて雨量を計算できるため、与えられた雨量図における最大値を計算することができる。また、この方法では降雨中

心の位置と降雨域を考慮してDAD 関係を求めることができる。ゆえに可能最大降雨の時空間特性を求める際に有効である。この図では急激に雨量が減少している部分があるが、その原因としては上で述べ

たようにレーダー雨量のデータ不足ということが考えられる。

那珂川水系と全日本での解析結果を比較すると (Fig. 13), 今回の那珂川の豪雨は, この地域としては確かに記録破りではあったけれども, 日本の他の地域では十分に起こり得るものであったといえる。これらの DAD 曲線式は以下のものである。

那珂川流域 (A) 面積固定法:

$$P_a = 174.4 \cdot t^{0.468} \cdot \exp(-0.039 \cdot t^{-0.22} \cdot A^{0.5}) \quad (3)$$

那珂川流域 (B) 雨量強度固定法:

$$P_a = 187.7 \cdot t^{0.468} \cdot \exp(-0.11 \cdot t^{-0.22} \cdot A^{0.37}) \quad (4)$$

日本全国:

$$P_a = 279 \cdot t^{0.5} \cdot \exp(-0.0248 \cdot t^{-0.414} \cdot A^{0.500}) \quad (5)$$

4. 空間分布情報を用いた流出解析

4.1 セル分布型流出モデルの概要

本研究では, 次のような分布型流出モデル (児島ら, 1998) を用いる。これにより, 任意の地点で流量が得られる。

- DEM の標高値の周囲を, DEM の分解能に合わせた正方形の領域を一つの部分流域 (セル) と考え, 流域全体が正方形の部分流域 (セル) が多数集まってできているとする。
- DEM から流域の落水線図を作成し, 一つのセルからの流出は, 落水線の流下方向のもう一つのセルへのみ起こるとする。
- 各セルでは, セル内で一様な有効降雨を入力とし, 上流側セルからの流出を合計して上流端流入量とし, kinematic wave 法によって流出量を計算する。
- 8つの流下方向のうち, 上下左右方向へ流出するセルでは, 斜面長, 斜面幅ともに分解能と同じ dm とし, 斜め方向へ流出するセルでは, 斜面長は $\sqrt{2}dm$ とし, 斜面幅は $d/\sqrt{2}m$ とする。

kinematic wave 法の基礎式を Lax-Wendroff 型の差分スキームで解き, kinematic wave 理論に基づく流出現象を忠実に計算する。このような, 正方形の部分流域 (セル) によって流域を構成する流出モデルをセル分布型流出モデルと呼んでいる。

4.2 落水線図の作成

落水線図は DEM から作成される。その際, 実際の河道を正確に形成するために, 実河道の位置デー

タを入力する。実河道の位置データは, 建設省国土地理院が提供している国土数値情報 ks 272 を用いた。しかし得られた実河道位置データは, DEM のグリッド交点と必ずしも一致しない。そこで, 実河道の位置データをそれに最も近いグリッド交点で置き換える。このようにして生成された近似河道データは, 落水線図を作成するときや, 流域の土地利用を決定する際に使用する。

落水線図は DEM と近似河道データを用いて, 以下のルールに基づいて作成する。

- DEM の標高値の周囲 8 方向のうちの最急勾配方向を求め, その方向に落水線を描く。
- 最急勾配線が複数ある場合, 周囲 8 方向の先の領域内のグリッド交点の平均標高値が最も低い方向へ落水線を描く。
- 標高値が周囲の 8 点のすべてより低いとき, すなわち窪地となっているグリッド交点では, 周囲 24 点のなかで最も低いグリッド交点の方向へ落水線を描く。
- 近似河道データにおいて河道とされたセルでは, 必ず河道の流下方向へ落水洗が描かれる。

本研究では, DEM データに, 国土地理院が発行している数値地図 50m メッシュ (標高) を用いる。数値地図 50m メッシュ (標高) は, 1/25,000 の地形図に緯線・経線に沿って引いたグリッドの交点の標高を読みとって作成されたものなので, 正確に 50m×50m の分解能ではない。そのため, UTM 平面直角座標系上で正確に分解能 50m×50m の DEM を作成し, その分解能 50m の DEM を基に分解能 250m の DEM を作成した。その 250m の DEM から生成した, 川堀より上流の落水線図を Fig. 14 に示す。

4.3 モデル定数の決定

各セルの等価粗度 N は土地利用によって決定されるものとする。土地利用情報は, 建設省国土地理院が提供している細密数値情報 ks-202-1 を用いる。緯度経度における格子点を上で作成した DEM と同じ UTM 平面直角座標系に変換し, 最尤分類法を用いて水田 (Paddy), 畑 (Field), 果樹園 (Orchard), 森林 (Forest), 荒地 (Barren land), 都市域 (Residence), 水域 (Water) の 7 クラスに土地被覆分類した。また, 近似河道データにおいて河道とされているセルは, 河川 (River) というクラスに分類する。

斜面勾配 I は DEM から求める。セル i における標高値 z_i (m) と, 落水線図を描くときに求めた, そのセルの流出が流入するセルの標高値 z_j (m),

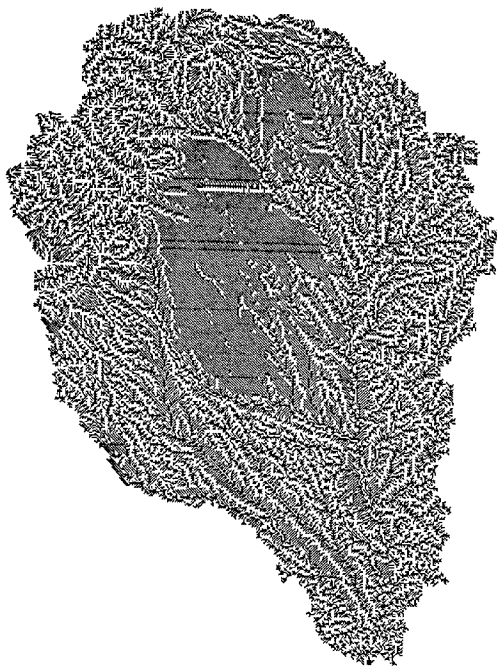


Fig. 14 Flow direction map with a 250-m resolution

Table 5 Percentage of land use

Class	Percentage
River	6.9
Paddy	18.6
Field	4.8
Orchard	0.37
Forest	63.7
Barren land	1.86
Residence	3.84
Water	0.04

セル i, j の中心間の距離から、セル i における斜面勾配 I_i は次式で求められる。

$$I_i = \frac{z_i - z_j}{\sqrt{(z_i - z_j)^2 + d^2}}$$

ただし、落水線作成時の窪地の処理の際に、勾配が負になっている落水線が存在する。そのようなときには、数値地図 50m メッシュ (標高) での標高値の最小単位が 10cm なので、標高差 10cm として勾配を求めた。

河道幅は、1/50,000 の地形図から那珂川の川幅を求め、標高ごとにモデル化した。支流はその半分

とした。

ところで、河道付近のセル流出計算は他と多少異なる。河道幅が、分解能より狭いセルでは、そのセルへの降雨はすぐに河道に入るものとする。すなわち、分解能 50 m、河道幅 5 m のセルでは、斜面幅 5 m、斜面長 50 m の斜面を仮定し、その斜面への入力、他のセルへの入力と同じ量の降雨があるとする。(あるステップの降雨量が 10 mm/h としたら、分解能 50 m、河道幅 5 m のセルへは、 $10 \times 50 / 5$ mm/h の降雨が入力となる。) 河道幅が、分解能より広いセルでは、そのセルには分解能と同じ面積への降雨だけが入力される。すなわち、分解能 50 m、河道幅 75 m のセルでは、斜面幅 75 m、斜面長 50 m の斜面を仮定し、その斜面への入力、他のセルへの入力と同じ量の降雨があるとする。(あるステップの降雨量が 10 mm/h としたら、分解能 50 m、河道幅 75 m のセルへは、 $10 \times 50 / 75$ mm/h の降雨が入力となる。)

4.4 流出解析

上に述べたセル分布型流出モデルを用いて 1998 年 8 月 26 日から 9 月 1 日にかけての降雨を対象として流出計算を行った。入力する降雨は上で推定したレーダー雨量である。川堀より上流域での総雨量とハイドログラフより求めた総直接流出量から、全時間全流域一定率の流出係数 $F_r = 0.54$ を求め、レーダー雨量にそれをかけて有効雨量とした。セルの等価粗度は土地利用ごとに一定として、洪水流量評価地点を川堀 (集水面積約 1,900 km²) として、試算によりその地点でのハイドログラフが再現できるように決めた。この際、次に述べる可能極洪水流量の推定を行なうことを念頭に置き、最大ピーク流量を再現できることを重視した。

その結果、川堀とそれより上流にある小口と黒羽のそれぞれについて Fig. 15, Fig. 16, そして Fig. 17 のような再現ハイドログラフを得た。ただし小口と川堀で観測流量は、一部欠測していたので点で表している。またそれぞれのグラフの上部に、観測地点より上流部での平均面積雨量を示している。

5. 可能極大洪水流量の推定

今回の豪雨によって生じた洪水は、最下流の水戸市水府橋地点で計画高水位を 2 度も超過したという意味で、明らかに「超過洪水」である。下流側の茨城県内の雨量があまり多くなかったのに超過洪水

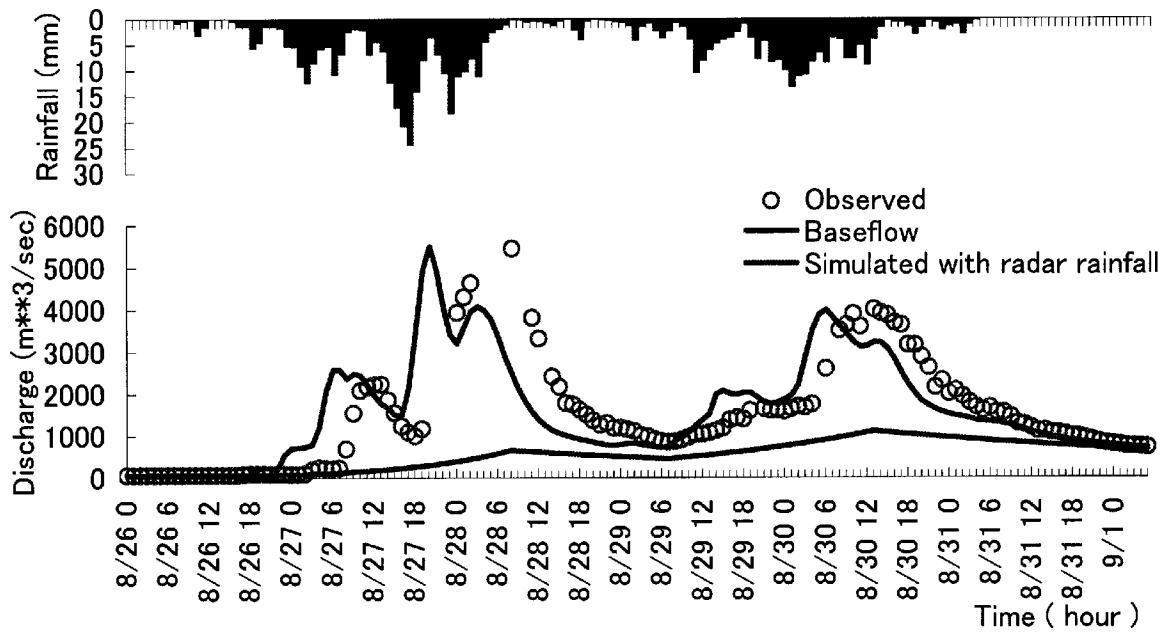


Fig. 15 Observed and Simulated hydrograph at Kawahori (1998 Flood)

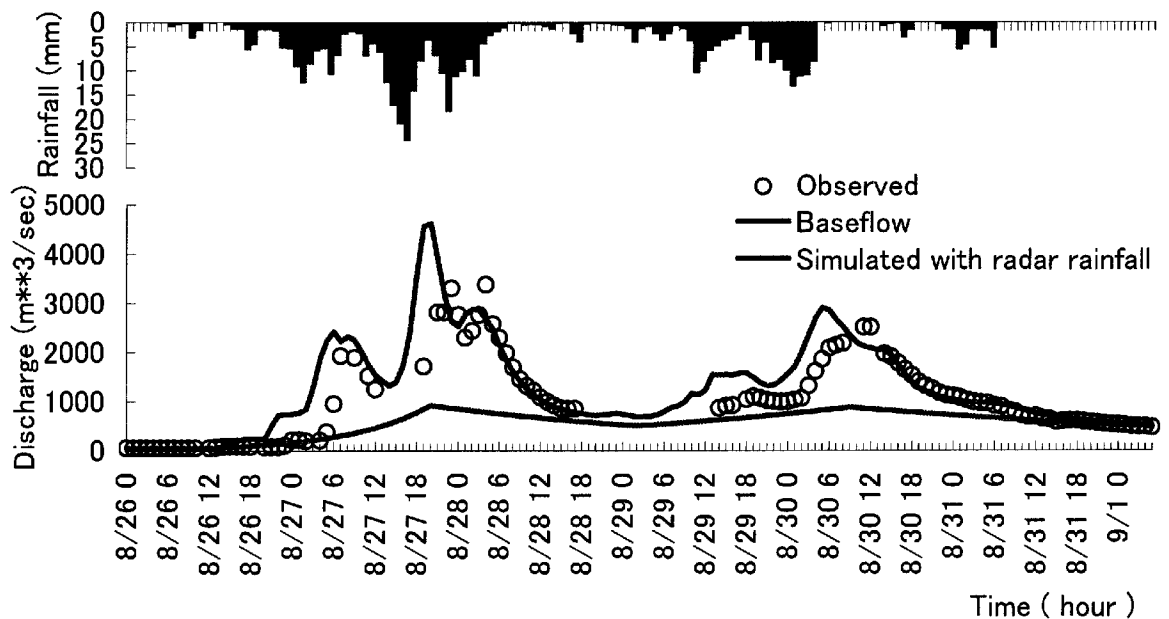


Fig. 16 Observed and Simulated hydrograph at Oguchi (1998 Flood)

となったのは、栃木県内で上述のように記録破りの豪雨であったことによる。那珂川の最上流支川で被害の大きかった余笹川や黒川では、明らかに「超過洪水」が生起したと言って差し支えない。まさに、

未曾有の豪雨による未曾有の洪水が発生したのである。

通常の洪水防御計画では対応できないこのような超過洪水に対してどのように対処するかを考えるに

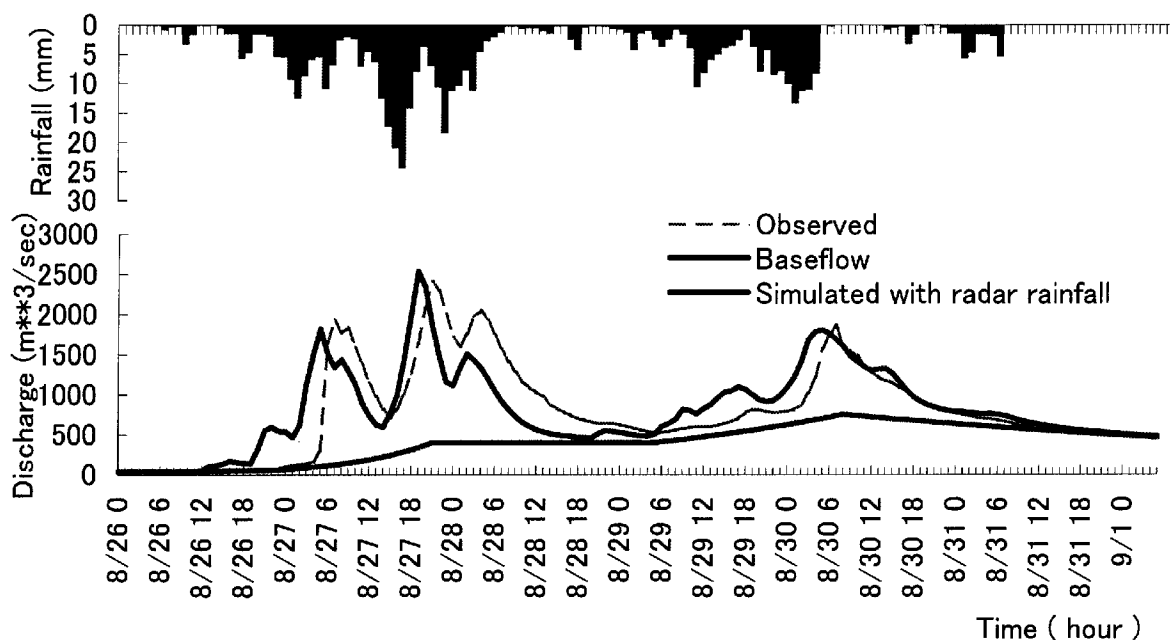


Fig. 17 Observed and Simulated hydrograph at Kurobane (1998 Flood)

あたっては、まず、どのような規模の超過洪水が起こり得るのかを知る必要がある。そこで、前項で求めた DAD 曲線が起こりうる最大の降水量（可能最大降水 PMP (probable maximum precipitation)）を表すものとして、この PMP を洪水流出モデルに入力して得られる最大ピーク流量を求めることとした。ここでは、これを「可能極大洪水流量」と呼ぶことにする。「可能最大洪水 PMP (probable maximum flood)」と呼びたいところであるが、ここでは降雨の空間分布、雨域の移動の効果、流域開発による流域条件の変貌などを考慮していないため、「最大」とは言い難いので、とりあえず「可能極大」という表現にとどめた。

可能極大洪水流量を求めるために、川堀上流域に対して妥当と思われる降雨継続時間を 12 hr と設定し、降雨の時空間分布パターンとして以下の 2 通りを考えた。

本研究では、1 時間ごとの流量観測と雨量観測により流出モデルのキャリブレーションを行ったので、与える降雨も 1 時間一定で与える。1 時間一定の降雨強度は上で求めた DAD 式を用いて、次の簡単な式から求まる。

$$I_1 = P_1 \quad (6)$$

$$I_i = P_i - P_{i-1} \quad (i = 2, \dots, D) \quad (7)$$

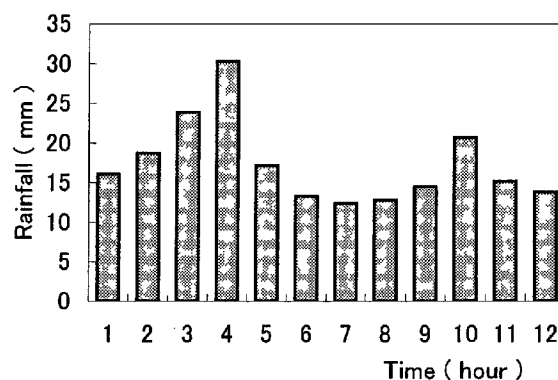


Fig. 18 Probable maximum rainfall event derived from DAD curve

ここに D は、降雨時間 (hour), I_i は、 i 時間目の降雨強度 (mm/hour) そして P_i は、継続時間 i と流域面積を DAD 式に代入して得られる最大面積平均雨量 (mm) である。

この D 個の降雨強度の組み合わせにより DAD 曲線に反しない D 時間最大級豪雨のハイトグラフが D の階乗個できる。本研究では時間分布の形状として平成 10 年 8 月 27 日 15 時から 28 日 3 時を選んだ (Fig. 18)。これは、この豪雨時に川堀上流部で最大面積平均時間雨量を記録したものである。そして、空間分布として次の二つの Case を考えた。Case 1 は、空間分布を対象流域で一定とした場合である。そして Case 2 は、まず上の期間の

1 時間毎の空間分布をレーダー雨量より求め、1 時間毎の平均面積雨量が Fig. 18 の降雨強度にそれぞれ一致するように引き伸ばした場合である。

流出係数として上の流出計算の際に用いた 0.54, ある程度損失するとした場合の 0.7, そしてすべての降雨が直接流出するという仮想的な場合の 1.0 の 3 通りを考えた。

Fig. 19, Fig. 20, そして Fig. 21 は、与えた降雨の時間分布とその結果得られた上の 3 地点、川堀、小口そして黒羽におけるハイドログラフを示している。川堀では Case 1 と Case 2 でほとんど差がないが、観測地点が上流になる（対象流域面積が小さくなる）にしたがって Case 1 のピークが大きくなり、Case 2 に対して変動が大きくなっている。対象流域面積が小さくなるにしたがって雨量の空間分布と地形による影響が相対的に大きくなっていく。

もっとも大きなピーク流量は、すべて Case 1 の場合であり、それぞれ約 12,500 m³/s, 9,500 m³/s, 5,600 m³/s になった。水府橋で最高水位を記録した昭和 61 年 8 月上旬の洪水時には、川堀の上流の小口地点で約 3,700 m³/s, 川堀の下流の野口地点で約 6,800 m³/s という試算（上記（財）国土開発技術研究センター田中茂信氏の資料）があるので、川堀地点での可能極大洪水流量として 12,500 m³/s というのは妥当な値と言える。

ここで簡単な試算を行なう。落水線から野口、川堀、小口そして黒羽より上流部の面積はそれぞれ、およそ 2,200, 1,900, 1,700 そして 1,300 km² である。ゆえに野口での基本高水流量は 8,500 m³/s であることから、面積比より川堀、小口、そして黒羽での基本高水流量はおおよそ 7,700, 6,700, 5,000 m³/s であるとする。上の結果はいずれもこれらを超過している。

なお、比流量に直すと、 $q = 12,500/1,900 = 6.6$ m³/s/km² である。ちなみに、これを、下津（1986）が、DAD 解析に基づいて九州地方で求めた比流量曲線などと比較してみると：

$$\begin{aligned} \text{長崎豪雨} &: \\ q &= 59A^{-0.13} \exp(-0.01A^{0.51}) \\ &= 13.8 \quad \text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{諫早豪雨} &: \\ q &= 47A^{-0.06} \exp(-0.01A^{0.57}) \\ &= 14.3 \quad \text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{角屋・永井式} &: \\ q &= 49A^{-0.06} \exp(-0.04A^{0.45}) \end{aligned}$$

$$= 9.4 \quad \text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2 \quad (10)$$

建設省提示式：

$$\begin{aligned} q &= 56A^{A^{-0.05}-1} \\ &= 5.2 \quad \text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2 \end{aligned} \quad (11)$$

となる。日本最大級の豪雨の生起する九州と比べると半分以下の比流量になっており、ここでの簡単な試算が、川堀地点での超過洪水の極大流量の推定値としてオーダー的に良い値を与えていると言ってよいのではなかろうか。

6. おわりに

過去の豪雨資料を収集し、今回の豪雨との比較を行ったところ、今回の豪雨はこれまでの記録を大きく塗り替えるような未曾有の豪雨であった。その結果として生じた洪水流出は、河道の疎通能力を遙かに超えるものであったので、河道を大きく変形させ、多数の橋梁や道路を損壊させるとともに、河川近傍の人家や施設、農地にも大きな損害を与えた。

計画規模を超えるこのような超過洪水は、他の流域においても当然起こる可能性がある。従来、特に下流域での大破堤氾濫を想定して高規格堤防の整備や水害に強い町づくりなどの超過洪水対策が検討されてきた。しかしながら、強い豪雨が生じる可能性がより高いのはもっと上流域であり、近年、上流域において土砂流出災害や洪水災害が頻発している。

どの程度の規模の洪水が生じうるのかを、当該流域において上流から下流まで一貫して承知しておくことが必要である。こうした観点から、前節では、豪雨の DAD 解析とそれに基づく可能極大洪水流量の試算を行った。ここで示した DAD 関係は地上雨量計のデータのみならず、降雨の空間分布状況を把握できるレーダー雨量計データを併用したもので、降雨の空間分布をより詳細に取り扱うことができた。

ここ数十年大雨があまりなく、河道やその周辺が安定しているように見える河川であっても今回のような記録破りの豪雨・洪水によって河道や氾濫原の様子が一変する。そのような場合に被害を受けないために、

- 古い記録（古文書など）・歴史を再点検する。
- 気象、地形、地質、河川、土地利用、植生などを総合的にとらえる。
- 他地域での極大な事象を参考にする。
- 計画超過豪雨・洪水が起こるとどのような災害になりうるのか検討しておく（可能極大（最大）洪水、河床・護岸の侵食、河川構造物の強度・

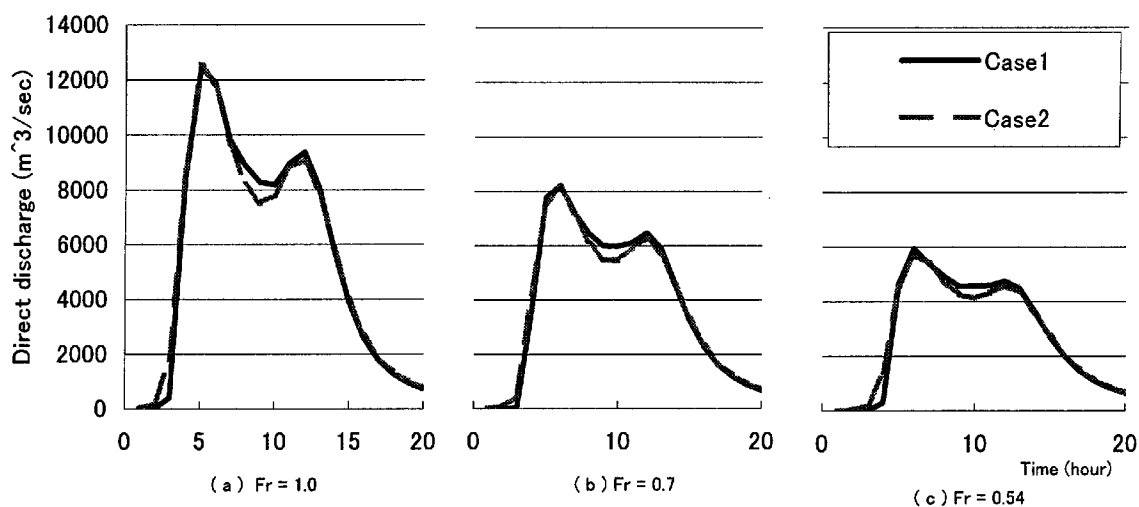


Fig. 19 Extreme maximum flood at Kawahori

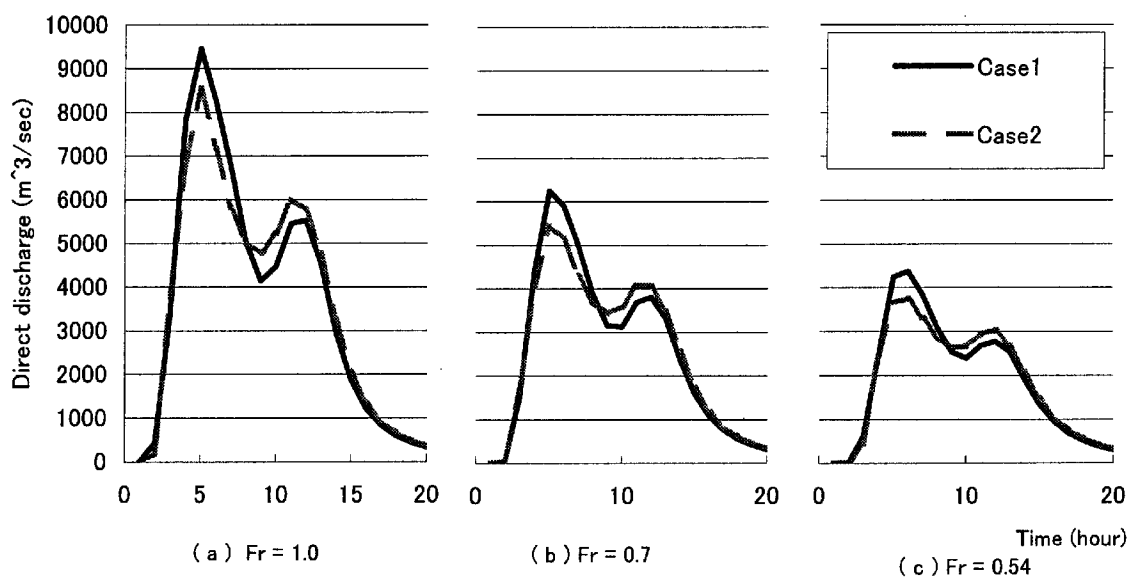


Fig. 20 Extreme maximum flood at Oguchi

耐侵食性、流木の影響なども含めて)。

- 既存の河川構造物、家屋、土地利用などが上記の事柄を十分考慮したものかどうか再検討する。

などを重要な事項として挙げることができよう。

謝 辞：

今回の調査にあたっては、災害直後の極めて御多忙な中、筆者らに対する状況説明や資料提供など、

建設省関東地方建設局河川部河川管理課、建設省関東地方建設局常陸工事事務所、茨城県生活環境部消防防災課、水戸プラザホテル、那須町役場、那須町立図書館、西郷村教育委員会、福島県社会福祉事業団の各位に多大な御協力をいただいた。ここに記して、深甚なる謝意を表する。

最後に、今回の豪雨・洪水災害によって被災された方々に謹んでお見舞い申し上げる次第である。

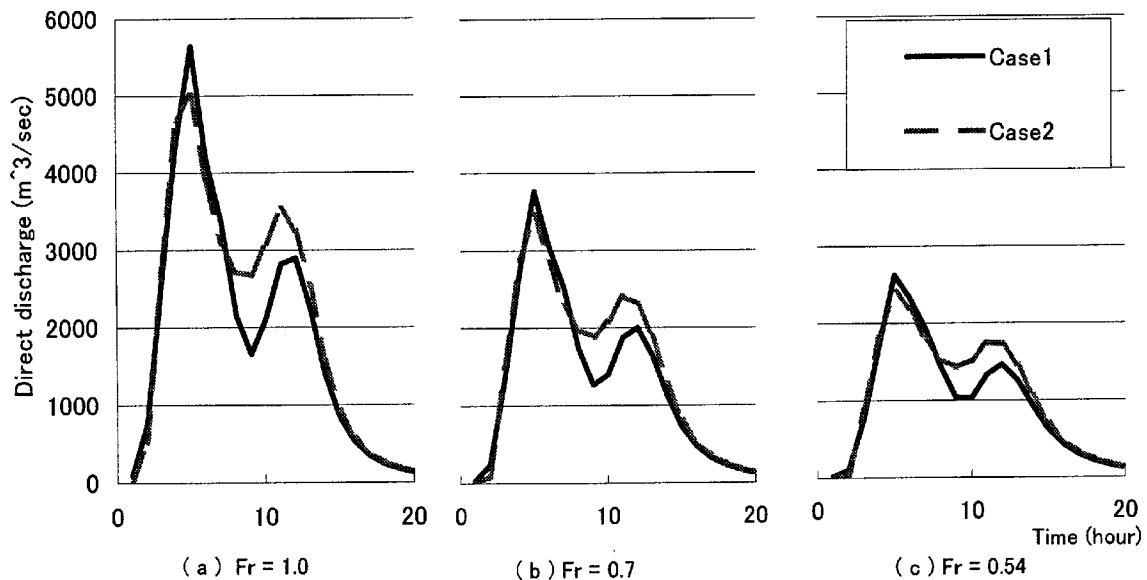


Fig. 21 Extreme maximum flood at Kurobane

参考文献

- 牛山 素行：1998 年 8 月 26 日～31 日に栃木・福島県で発生した豪雨災害の特徴，自然災害科学，17-3，pp. 237-243，1998a.
- 牛山 素行：1998 年 8 月栃木・福島県豪雨災害 研究関連情報，<http://www.comp.metro-u.ac.jp/~ushiushi/9808d/>，1998b.
- 桑原英夫：日本における最大級豪雨の時間的空間的集中特性に関する実証的研究，東京大学学位論文，173 pp.，1988.
- 建設省関東地方建設局 常陸工事事務所：平成 10 年 8 月末豪雨による那珂川流域の浸水（パンフレット），1998.
- 児島利治・宝 馨・岡 太郎・千歳知礼：ラスタ型空間情報の分解能が洪水流出解析結果に及ぼす影響，水工学論文集，土木学会水理委員会，第 42 巻，pp. 157-162，1998.
- 下津昌司：九州中西部地域に発生する豪雨の DAD 特性と出水特性，昭和 60 年度文部省科学研究費補助金・総合研究（A）研究成果報告書「洪水濁水比流量の地域特性に関する研究」（代表：角屋 睦），pp. 209-220，1986.
- 宝 馨：異常降雨記録，水文・水資源ハンドブック，水文・水資源学会（編集），第 7 章，水文リスク解析，p. 230，1997.
- 栃木県：栃木県ホームページ 平成 10 年 8 月末豪雨による災害（栃木県）の概要，<http://www.pref.tochigi.jp/saigai/gaiyou.html>，1998.
- 土木学会緊急災害調査団：福島・栃木・茨城水害関係緊急災害調査報告，<http://wwwsoc.nacsis.ac.jp/jsce2/sokuho/index.html>，1998a.
- 土木学会緊急災害調査団：1998 年南東北・北関東の集中豪雨に伴う水害調査報告書，1998b.
- 土木研究所福島県・栃木県豪雨災害現地調査団：平成 10 年 8 月末豪雨による福島県・栃木県・河川・道路災害現地調査報告，土木技術資料，40-11，pp. 38-45，1998b.
- 中北英一・池淵周一・矢神卓也：東北豪雨の生起・伝搬特性，文部省科学研究費補助金・基盤研究（B）（1）「南東北・北関東の集中豪雨災害に関する調査研究」研究成果報告書，代表：東北大学・真野 明，1999.
- 日本河川協会：特集平成 10 年の水害，河川，No. 631，11/2，82 pp.
- 福島県：福島県ホームページ 集中豪雨・台風被害状況，<http://www.pref.fukushima.jp/list/saigai/saigai827.html>，1998.
- 武藤裕則・中川 一・戸田圭一・市川 温・川池健司：1998 年 8 月新潟下越豪雨災害に関する調査研究，京都大学防災研究所年報，第 42 号 B-2，1999.

Storm and Flood Disaster in the Nakagawa Basin in 1998

Kaoru TAKARA, Hirotake IMAMOTO, Taiichi HAYASHI, Eiichi NAKAKITA, Yutaka ICHIKAWA, Tempei HASHINO* and Yukio NAKAMURA

*** Graduate School of Engineering, Kyoto University**

Synopsis

Based on field investigation, this paper describes the outline of storm and flood disaster that has occurred in the Nakagawa basin in August 1998. The flooding in the Yosasagawa River and the Kurokawa River, the upper reaches of the Nakagawa was brought by a record-breaking severe storm. The resultant flooding was one that exceeds design flood. Using ground-based rainfalls at more than twenty locations and radar raingauge data, the authors have conducted the DAD analysis and derived the probable maximum precipitation (PMP) in the basin. On the basis of the DAD analysis, hydrological simulation using the grid-cell based distributed runoff model has given the probable extreme (plausible maximum) flood.

Keywords: the Nakagawa River; excess flood; radar raingauge; DAD analysis; rainfall-runoff analysis