

Ⅲ 1998年8月26日～31日那珂川流域の豪雨による洪水流出

中根和郎*

Flash Flood along the Nakagawa River Basin Caused by Torrential Rainfall on August 26 to 31, 1998

By

Kazurou NAKANE

*Continental Hydrology Laboratory, Atmospheric and Hydrospheric Science Division
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan*

Abstract

Japan's weather in the summer of 1998 was quite unusual. An anticyclone above the Ohotsuku Sea to the northeast of Hokkaido was very strong, and an anticyclone above the Pacific Ocean south of Japan was very weak. These conditions caused a Baiu front to occur over a long period extending from the Hokuriku District to the Tohoku District. Accordingly, the end of the rainy season in this region was not officially announced in 1998, another unusual occurrence. Under such conditions, Typhoon No.4 occurred on August 25 in the sea to the south of Japan. The typhoon changed course to the north on August 27, and approached Japan. With the typhoon moving northwards, high-temperatures and a humid air mass above the warm sea to the south of Japan flowed into the Kanto District over a long period, and the Baiu front stagnating in the north of the Kanto District became active. Therefore, heavy rain fell intermittently from the morning of August 26 to the evening of 30, which caused a severe flood disaster in the Nakagawa River basin. Specifically, record-breaking severe rain fell locally. The maximum hourly amount of which was 90mm to 100mm was pouring down over the upstream area of the Nakagawa River basin, where the rainfall amount for a single 3-hour period peaked at between 200mm to 280mm. The rainfall generated an enormous flash flood, causing 6 fatalities and 50 houses along the river were washed away or destroyed. In this paper, the correlation between heavy rainfall and water levels at some stations in the Nakagawa River basin was analyzed and flash flood simulation was carried out using the Tank Model. The storm runoff situation caused by

* 防災科学技術研究所 気圏・水圏地球科学技術研究部 陸域水循環研究室

the prolonged heavy rainfall is also described. As a result, the following facts became clear.

(1) The time change of the moving average rainfall became similar to the hydrograph at each station when the period of the moving average rainfall in each catchment basin was appropriate.

(2) The infiltration rate to the amount of rain water was very small in the each basin of the Nittahashi station in the Kurokawa River, the Kutsukake station in the Yosasagawa River and the Kuroiso station in the Nakagawa River. The largest calculated run-off rate became 22mm/h, while the maximum hourly average rainfall in the Kurokawa River basin and the Yosasa River basin was 45mm to 48mm. The total run-off rate in a 7 day period was calculated to be 94% to 97% of the total rainfall amount in these basins.

(3) Most of the rain water in the each basin of the Ohtawara station in the Kumagawa River, the Ohtawara station in the Sabigawa River and the Yuzugami station in the Hokigawa River, all of which are located in the middle section of the Nakagawa River basin and include an alluvial fan covered with a deep sand gravel layer, flowed into the ground in the central alluvial fan and into springs in the lower section. The largest run-off rate of the each basin was 8mm/h in the Kumagawa River, 12mm/h in the Sabigawa River and 14mm/h in the Hokigawa River, respectively, while the maximum hourly average rainfall amount in these basins was between 47mm/h to 59mm/h. The total run-off rate in a 7 day period to the total rainfall amount in these basins was calculated to be 58 % in the Kumagawa River basin, 73 % in the Sabigawa River basin and 76% in the Hokigawa River basin, respectively.

(4) The parameters of the Tank Model at the Koguchi station, the Noguchi station and the Suifubashi station in the middle and lower sections of the Nakagawa River basin respectively were reflected from the run-off characteristics of the geology covering the upper and middle sections of the basin, where loam, sand gravel or unconsolidation pyroclastic layers pile up deeply above the geological base having minimal permeability. The largest calculated run-off rate at the Koguchi station in the middle section of the Nakagawa River basin was 11mm/h, while the maximum hourly average rainfall in the basin was 32mm/h. At the Noguchi station and the Suifubashi station in the lower section of the basin, the largest calculated run-off rates were 6.7mm/h and 5.3mm/h, with the maximum hourly average rainfall in these basins being 25mm/h and 20mm/h, respectively. The total run-off rate in a 7 day period to total rainfall amount in these basins was calculated to be 77 % at the Koguchi station, 63 % at the Noguchi station and 68% at the Suifubashi station, respectively.

The AMeDAS observation network with about 17km interval between the stations was insufficient to monitor the such severe local rainfall. In this study, the water level at each station was estimated using the Tank Model utilizing high-density observation rainfall

data from the Local Meteorological Observatory of the ex-Meteorology Agency, the ex-Ministry of Construction, the Prefectural Construction Office, etc., with fairly good results. It was shown that the on-line system of high-density rainfall observation combining different organizations is necessary for flood simulation in small and medium-size rivers.

Key words : Flood disasters, Flash floods, Yosasagawa River, Tributary of the Nakagawa River, Main stream of the Nakagawa River

キーワード : 洪水災害, 洪水, 余笹川, 那珂川支川, 那珂川本川

1. はじめに

1998年は前年の4月頃から続いていたエルニーニョが終息した年に当たり、世界各地で干ばつ、大洪水が発生した天候不順な年であった。日本でも夏の天候が不順であった。例年になく、北東のオホーツク高気圧が強く張り出し、その一方で、太平洋高気圧の張り出しが弱かったため、梅雨前線が長期間、北陸から東北地方に停滞し、この地域の梅雨明けが特定できないという異例な年であった。こうした状況下で日本の南海上に8月25日台風4号が発生した。当時の気圧配置は図1に示すように、日本の南海上とシベリアのバイカル湖付近に高気圧があり、日本列島は気圧の谷となっており、梅雨前線が北海道東岸から三陸沿岸を通り、関東地方から紀伊半島南部に横たわっていた。一方、台風4号は図2に示すように発達しながら東進し、8月27日頃から進路を北に変えて、ゆっくりと北上した。これに伴って、南海上から高温多湿な気塊が長期間関東地方の南に流れ込み、前述した梅雨前線の活動が活発となった。この間、関東地方の南に有った梅雨前線は北陸地方へと北上している。渡辺(1999)は当時、関東山地付近には局地的な前線が停滞していて、豪雨をもたらした人參状のレーダーエコーは北西からの相対的に寒冷・乾燥の大気と南又は南東からの暖湿な大気の収束場に形成されており、風の水平Shearや温度傾度が大きく、かつ水蒸気傾度も大きい領域で発達したと分析している。このため、栃木と福島の間境付近の那珂川上流域では8月26日18時頃から雷を伴った激しい大雨となった。強い雨域は図3に示すように那須岳から高原山にかけて南東山麓斜面で観測されている。大雨は8月26日18時から8月30日10時にかけて断続的に降っており、特に、26日18時から27日10時、27日14時から28日3時、29日15時から30日9時の3度にわたって豪雨が観測されている。元気象庁の那須岳アメダス観測点では最大時間雨量90 mm、最大3時間雨量205 mm、最大24時間雨量640 mm、元建設省大沢観測所でも最大時間雨量103 mm、最大3時間雨量274 mm、最大24時間雨量640 mmが観測された。また、8月26日17時から31日24時までの総雨量はそれぞれ1,228 mm、1,058 mmに達する記録的な豪雨となった。これはこの地域の年間降水量の65～75%に達するものであった。この豪雨により、那珂川及び阿武隈川の上流域では3度にわたって河川水位が上昇し、河川の越水・破堤を伴う大きな洪水災害が発生した。同河川の中下流部では2度にわたって河川水位が上昇し、河川沿い低地で大きな浸水被害が発生した。当時、この豪雨に対して、宇都宮、福島及び水戸の各地方気象台は大雨洪水警報、記録的短時間雨量情報等を的確に発表し、各県の県庁及びテレビ等のマスメディアに伝達していた。こうした情報の中で伝えられる実況雨量と予想雨量がどの

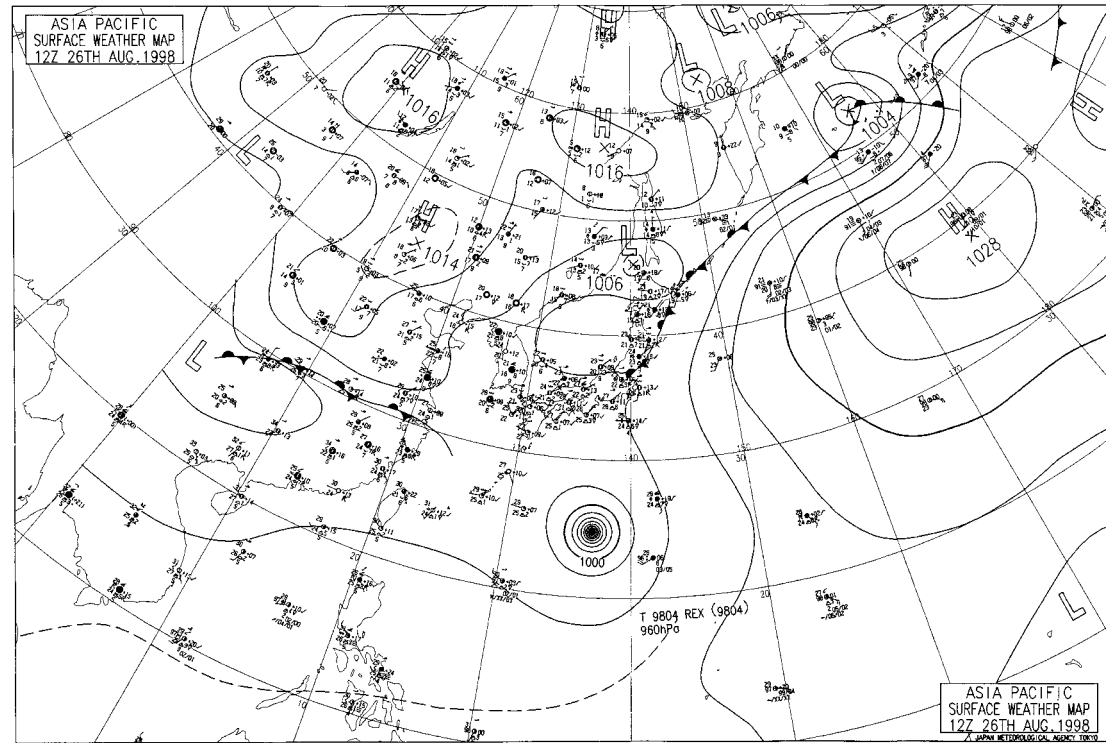


図1 アジア太平洋地表天気図，2100 JST Aug. 26, 1998 (水戸地方気象台，1998)
 Fig. 1 Asia-Pacific Surface Weather map at 2100 JST Aug. 26, 1998 (source: Mito Local Meteorological Observatory, 1998).

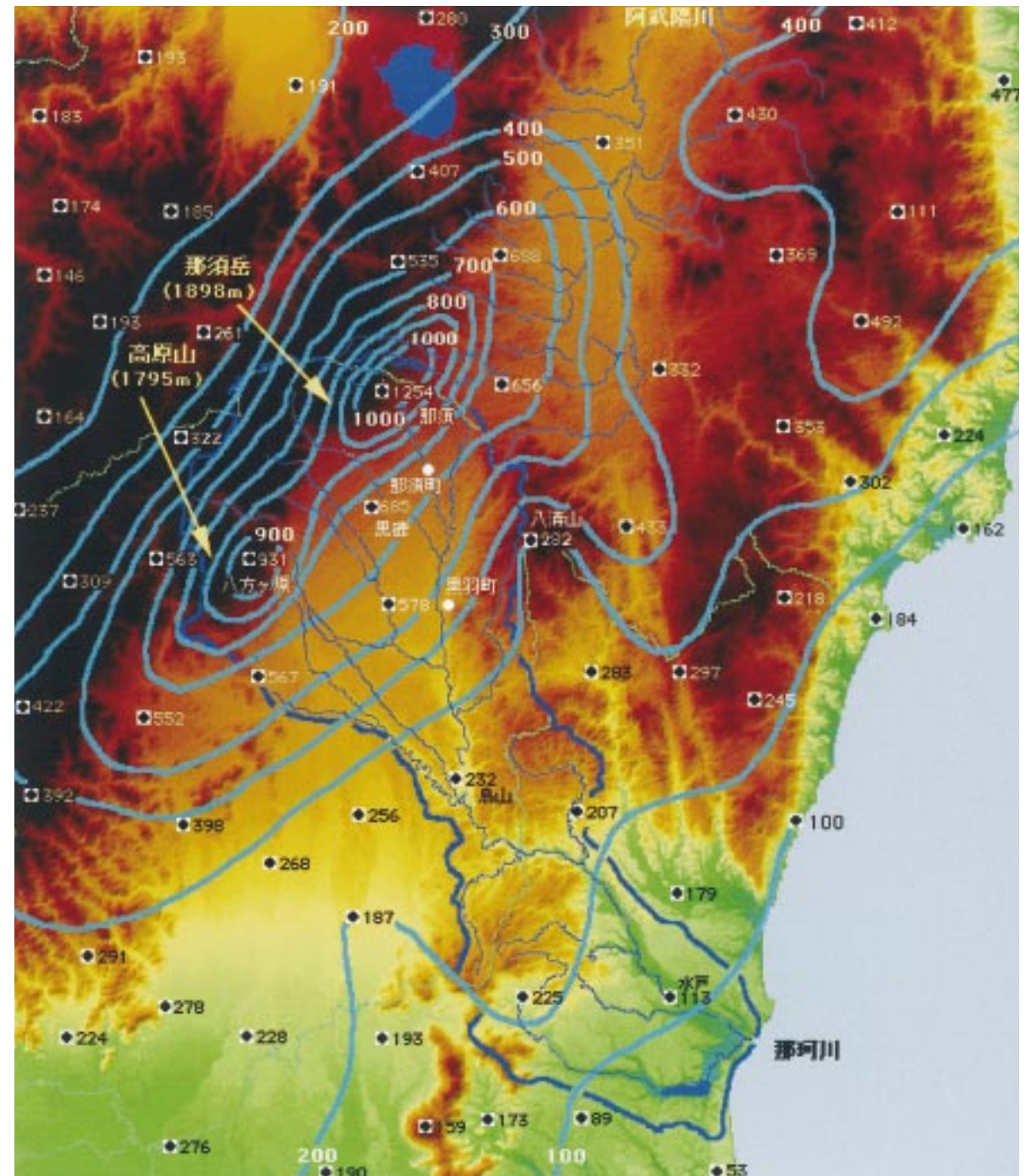


図3 総降水量分布図，8月26日～31日 (水戸地方気象台，1998より編集)
 Fig. 3 Rainfall distribution from 26 through Aug. 31, 1998 (source: Mito Local Meteorological Observatory, 1998).

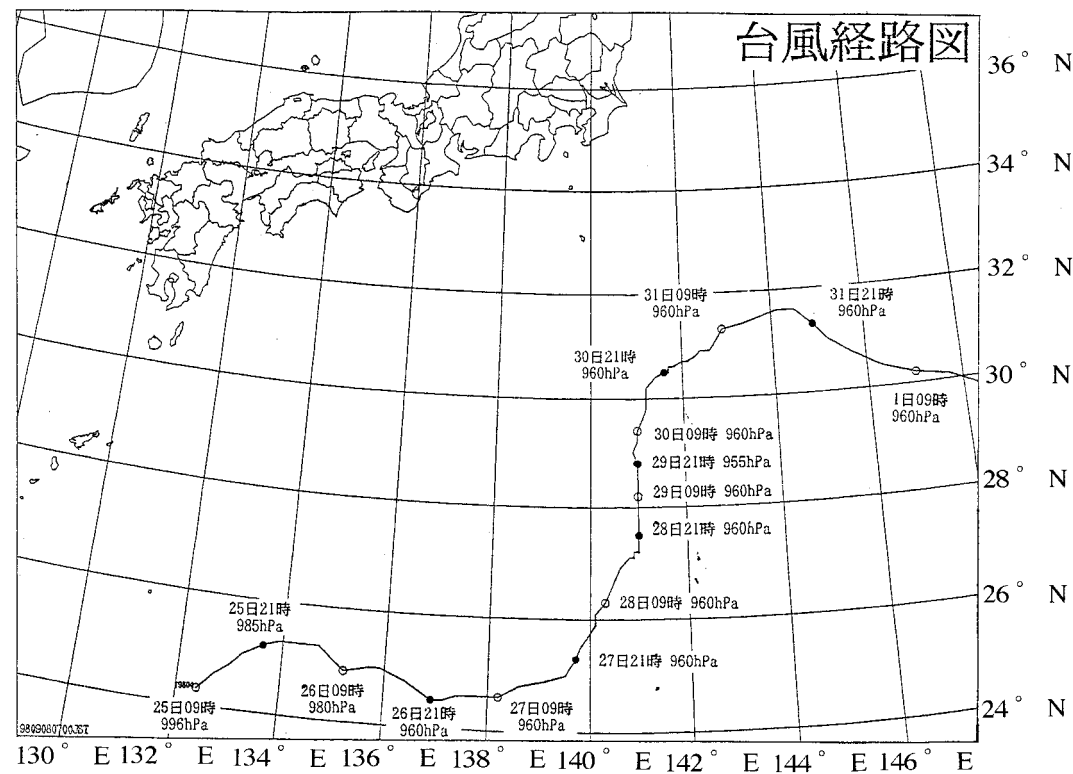


図2 台風第4号の経路図，900 JST Aug. 25 ~ 900 JST Sep. 1, 1998 (水戸地方気象台，1998)
 Fig. 2 Route of Typhoon No.4 from 900 JST Aug. 25 to 900 JST Sep. 1, 1998 (source: Mito Local Meteorological Observatory, 1998).

程度の規模の災害を発生させるのかという具体的な防災情報として、必ずしも防災担当者に認識されていないと思われる。今回の豪雨では豪雨発生当初、同一町村でも時間雨量 90 mm 以上の雨が降っているところとほとんど降っていないところがあった。市町村役場ではさほど強い雨は降ってなかったため、防災担当者は当初その異常さを感じていなかった。このように狭い範囲に発生する豪雨はアメダス観測網ではその詳細を量的に把握できない場合があり、このような時に、各機関が個別に観測している雨量データが豪雨時のみでも町村役場又は消防本部に伝えられ、雨量レーダ情報と重ね合わせて、時々刻々変わる強雨域の量的且つ面的な雨量分布を把握し、それに基づく各支川の洪水水位予想、おおよその被害予想が行われ、避難、救助等の防災活動の初動に活用されることが望まれる。そこで、本論文では流域内で観測されている密な雨量観測データを用いて、那珂川の各支川の豪雨時の洪水流出予測の可能性を検証した。以下にその結果と当時の洪水流出状況について述べる。

2. 那珂川流域の概要

那珂川流域は栃木と福島の間境付近の那須火山^{おおきび}、大佐飛山地を水源とし、茨城県的那珂湊^{なかもと}に至る幹川流路延長 150 km、流域幅 25 ~ 45 km、流域面積 3,270 km²の細長い流域である。図 4 は国土地理院の 50 m 標高データを用いて、高度別に色分けして作成した那珂川流域の鳥瞰図であり、流域全体の地形の様相が良く分かる。流域の北端には那須火山 (1,800 m ~ 1,900 m)、白河丘陵 (400 m ~ 600 m) があり、その東側は八溝山地 (600 m ~ 1,000 m)、鷲ノ子山地 (600 m ~ 700 m) が南北に連なる。更に、その南東に那珂丘陵、那珂台地が連なっている。流域の西側には大佐飛山地 (1,400 m ~ 1,900 m)、高原火山 (1,700 m ~ 1,800 m)、塩谷山地 (600 m ~ 900 m) が南北に連なる。更に、南東方向に高原火山麓、塩那丘陵 (200 m ~ 300 m)、鷄足山地 (300 m ~ 500 m)、鷄足丘陵、東茨城台地が連なっている。図 5、図 6 および図 7 は福島県、栃木県及び茨城県の土地利用分類図 (経済企画庁、1960) を基に、那珂川流域の地形分類、表層地質および表層地質柱状図を表したものである。これによると、那須火山の東側には火山噴出物に厚く覆われた那須火山麓があり、その東側に高久丘陵^{たかく}が広がっている。この地域は火山麓が著しく開析^{注1}されており、山麓の面影を留めず丘陵地形を成すことからこの名が付けられている。ここを余笹川、黒川等の那珂川左支川が流れている。この地域は流域の大部分が不透水性基盤に覆われていることから地下水は乏しく、普段の河川水も少ない。この地域に前述したように集中豪雨がもたらされ、激しい洪水災害が発生した。高久丘陵の南には那珂川本流を挟んで複合扇状地が広がっている。この扇状地は大佐飛山地、高原火山から流れ出る熊川、蛇尾川、^{ほらき} 箒川によって形成されたものであり、河川沿い低地を除いて那須野ヶ原台地と呼ばれている。また、北の高久丘陵、西の大佐飛山地と南の塩那丘陵とに囲まれていることから那須盆地とも呼ばれている。この地域は厚い砂礫層に覆われているため、河川水が伏流し、扇中央部の熊川、蛇尾川は普段水のない無水河川となっている。他方、標高 200 m の扇端付近では湧泉帯があり、古くから水田に利用されている。箒川はこの台地の南端を流れ、熊川、蛇尾川等の扇状地河川を合流して那珂川に注いでいる。那須野ヶ原台地の南には高原火山麓、塩那丘陵が広がっている。この地域は関東ローム層の下に火砕岩、砂礫層が分布し、更に、その下部には難透水性基盤があり、地下水の比較的少ない地域になっている。この丘陵を荒川、江川等が流れており、河川の蛇行が著しく、谷底平野は比較的広く水田に利用されている。塩那丘陵の南東には古期堆積岩を基岩とする鷄足山地、鷄足丘陵があり、その南東に

注 1：開析とは丘陵地等の谷に雨水が集まり、それが長期にわたって河岸や河床をより深く、広く浸食する自然の作用をいう。

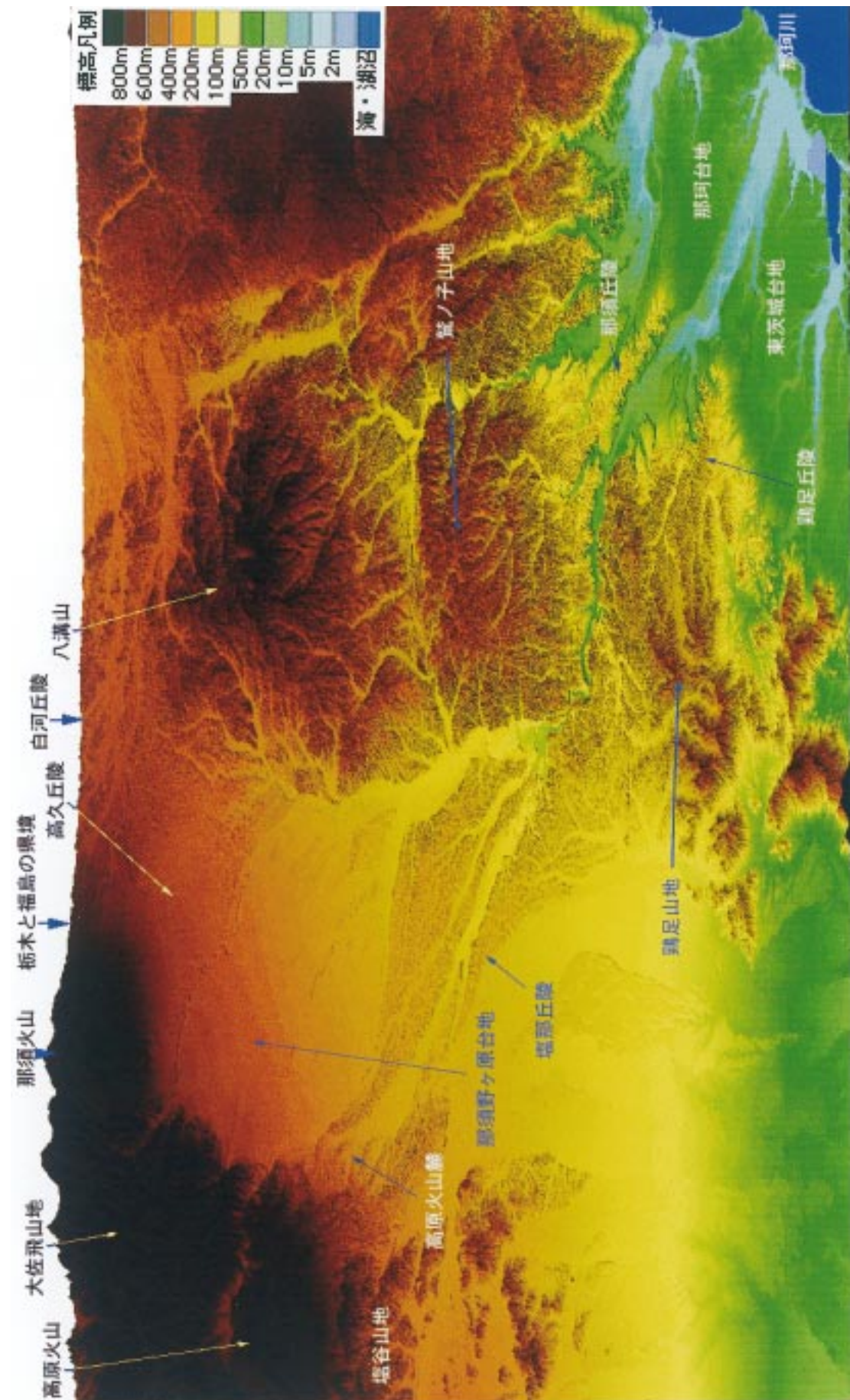


図 4 那珂川流域鳥瞰図
Fig. 4 Bird's-eye view of the whole Nakagawa River basin, which was made from digital elevation data with 50m resolution.



写真1 扇状地河川の熊川，黒磯市箕輪地区付近，1998年11月12日撮影
 Photo 1 Kumagawa River on the alluvial fan near the Minowa District, Kuroiso City taken on Nov. 12, 1998 .



写真2 扇端部の湧泉帯からの流出，黒羽町松木沢地区付近（栃木県庁提供）
 Photo 2 Return flow from the spring zone on the lower section of the alluvial fan near the Hinokisawa District , Kurohane Town (courtesy of the Tochigi Prefectural Office).

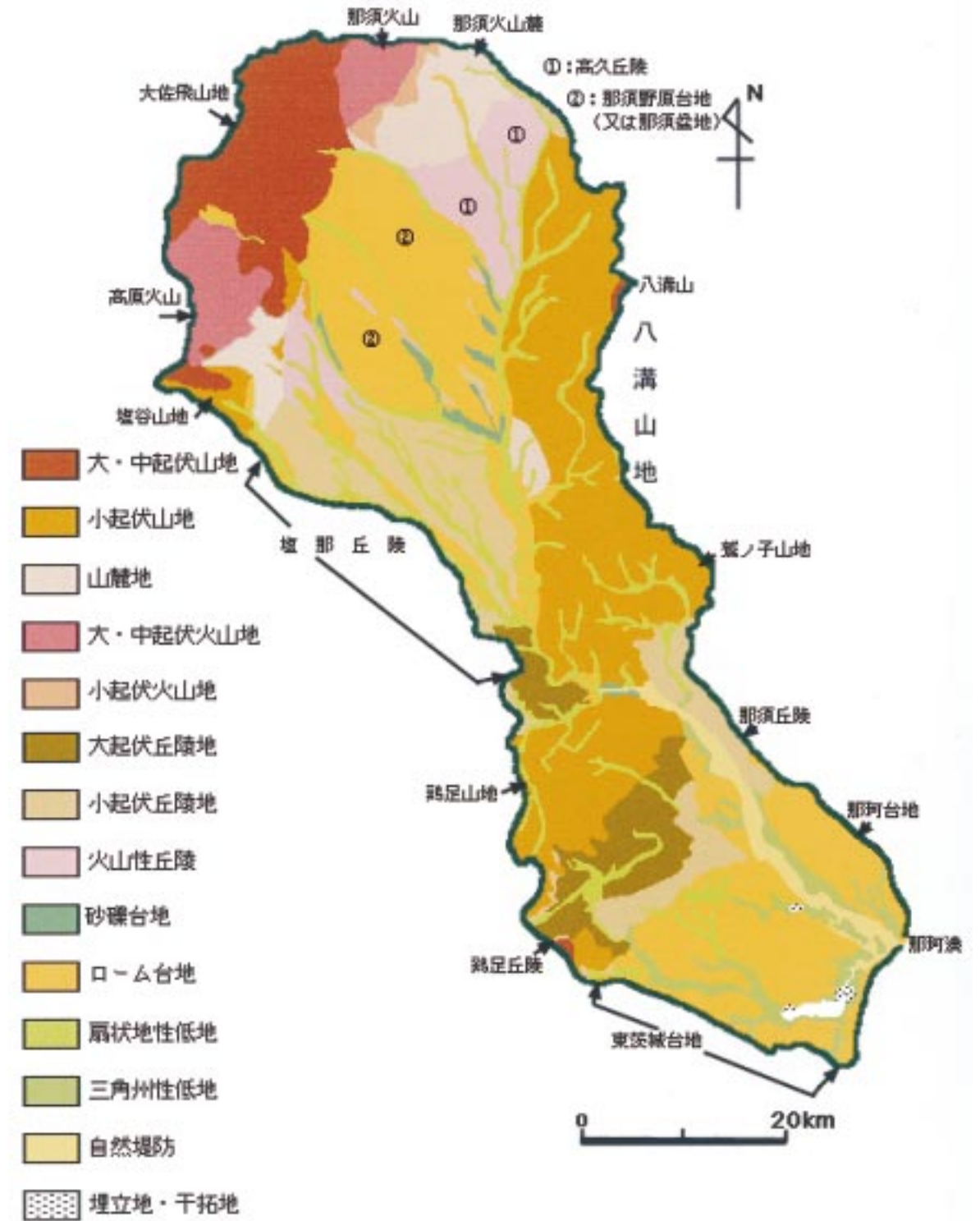


図5 那珂川流域地形分類図（経済企画庁，1972，1973及び1974より編集）
 Fig. 5 Landform classification map over the Nakagawa River basin, which was edited from the landform classification maps of the Economic Planning Agency (1972, 1973 and 1974).

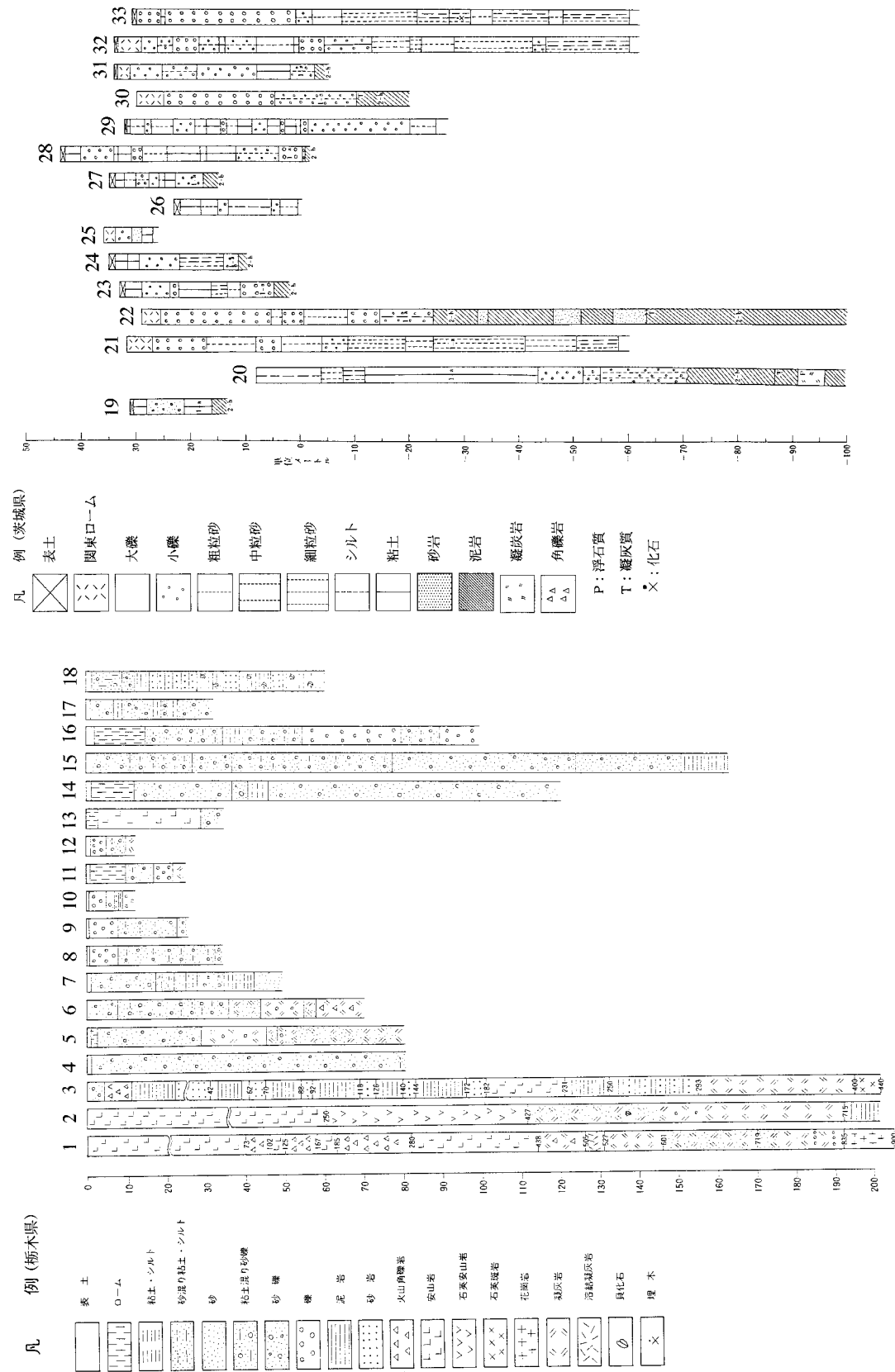


図7 那珂川流域表層地質柱状図 (経済企画庁, 1973及び1974より編集)
Fig. 7 Geological surface layer column in the Nakagawa River basin, which was edited from the landform classification maps of the Economic Planning Agency (1973 and 1974).

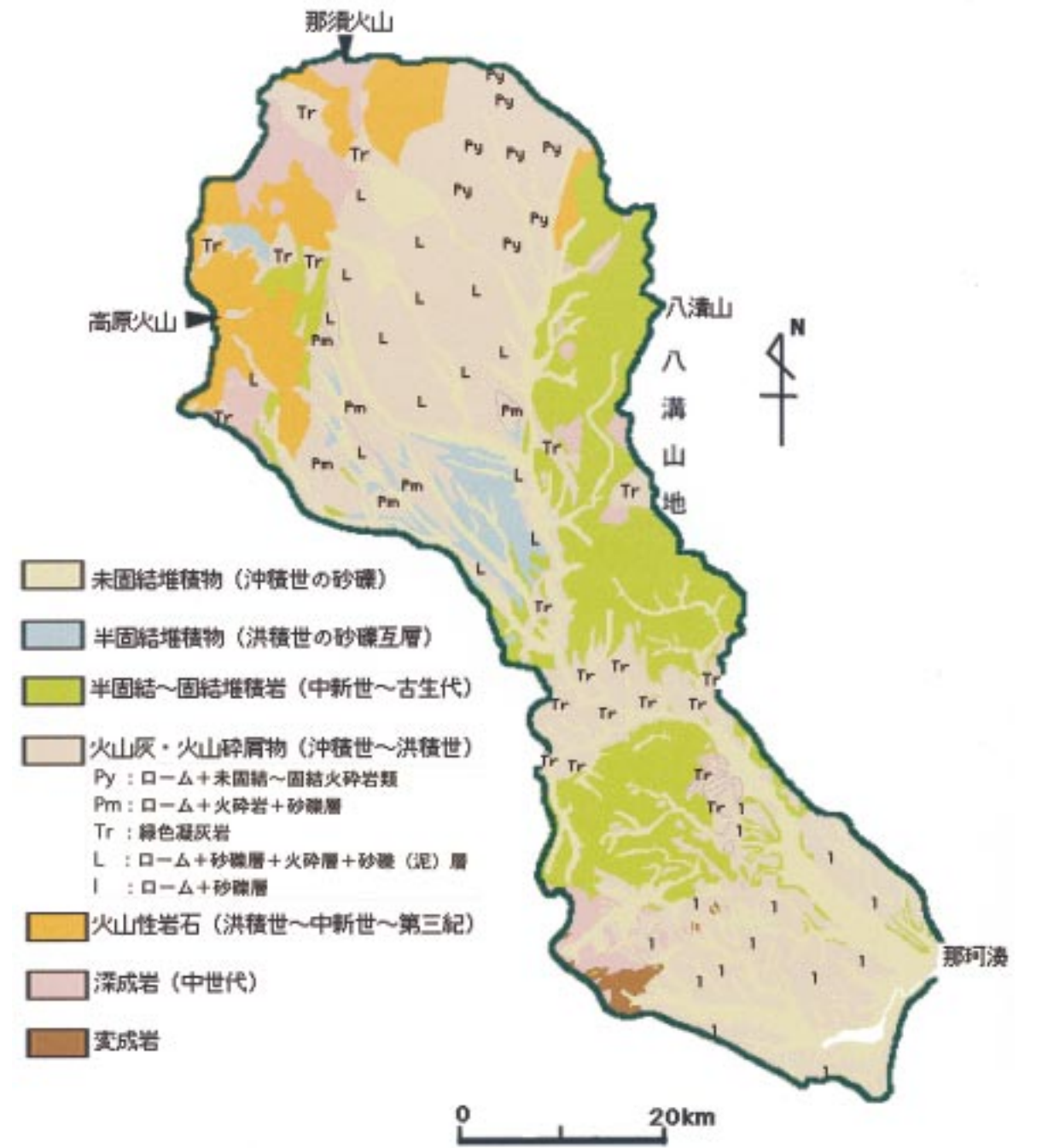


図6 那珂川流域表層地質図 (経済企画庁, 1972, 1973及び1974より編集)
Fig. 6 Geological map for the surface layer over the Nakagawa River basin, which was edited from the surface layer geological maps of the Economic Planning Agency (1972, 1973 and 1974).

は関東ローム層の下に砂礫層の広がる東茨城台地がある。那珂川の東側には部分的に花崗岩の分布する古期堆積岩を基岩とした八溝山地があり、その西側斜面を松葉川、武茂川、緒川等比較的小規模な河川が流れている。これら河川は谷が深く、樹枝状の河川形状をしている。その南東には古期堆積岩と凝灰岩が分布する那珂丘陵と関東ローム層の下に砂礫層の広がる那珂台地がある。

図8は那珂川上流域、中流域および下流域のそれぞれの地形的な特徴を現すために、国土地理院の50m標高データを高度別に色分けして表示したものである。図4および図8の鳥瞰図が示すように、那珂川上流域の高久丘陵を流れる余笹川、黒川等の下流部は水浸食が著しく、地形開析が進んでいる。一方、那須野ヶ原台地にはなだらかな扇状地が広がっている様子が同図から良く分かる。八溝山地は開析が著しく、樹枝状河川が分布している様子も同様に良く分かる。中流域では塩那丘陵の開析の著しさ、河川沿い低地の広さが分かる。この低地を荒川、内川、江川等の支川が著しく蛇行して流れている。また、鷲ノ子山地及び鶏足山地の樹枝状河川の発達状況も良く分かる。下流域では那珂丘陵、那珂台地と鶏足丘陵、東茨城台地の間に発達した河岸段丘と那珂川低地の様子が良く分かる。今回の下流域の浸水被害の多くは幅約2～3kmの川沿い低地で発生した。この谷底平野には周囲より微高な自然堤防があり、比較的水害には安全な場所として古くから集落や畑に利用されていた。また、低地の多くは洪水時の流水の被害から水田を守るため、霞堤が幾つも作られていた。霞堤は洪水の貯水機能も持っているが、近年、それらは連続堤に変わってきている。また、堤防、ポンプ排水機場等の治水対策に先行して、低地に住宅地等が進出してきているところが幾つか見られる。

3. 那珂川流域の洪水流出状況

那珂川流域の1956年から1985年の30年間の統計（常陸五十年史，1986）によると、流域平均年降水量は1,480mm、平均の年流出高^{注2}は野口地点（流域面積2,182km²）で1,034mmとなっている。また、平均湧水流量（年間の日流量を大きい順に並べたときの355番目の日流量）は23.9m³/sであり、100km²当たりの流出高に換算した比流量で表すと1.19m³/s/100km²となる。流域降水量はやや少ないが、河川流出量は比較的多く、流況の比較的良好な流域である。表1は常陸五十年史および気象月報（宇都宮地方気象台および水戸地方気象台）より作成した過去の主な洪水における那珂川流域内各地点の2日雨量、那珂川野口地点の上流域平均2日雨量、最高水位および最大流量、および水府橋地点の最高水位を表したものであり、図9は常陸五十年史および気象要覧（中央気象台及び気象庁）より作成した那珂川流域の過去の主な洪水の雨量分布を表したものである。これによると過去の主な洪水では那須岳、高原山地等の那珂川上流部の雨は常に多く、那珂川下流部では雨の多い場合と少ない場合が見られる。これら雨量分布と図3に示した今回の大雨の雨量分布を比較すると、昭和16年（1941年）7月と昭和22年（1947年）9月の雨量分布が類似している。昭和22年の場合は下流域でも300mmの大雨が降っており、野口地点の最大流量は過去最大の6,800m³/sとなった。昭和61年（1986年）8月の洪水では雨量分布は今回の場合と異なるが、上流域で300mm、下流域で230mmの大雨が降ったため野口地点の最大流量は6,200m³/sに達し、水府橋地点の最高水位は9.15mにも達した。図10-1および図10-2には常陸工事事務所（1998）が作成した昭和36年6月、昭和57年9月、昭和61年8月及び今回の平成10年8月洪水による那珂川流域の浸水区域を示すと共に、水府橋地点の各洪水の水位時間変化、平成10年9月洪水の各地浸水面積および浸水状況を載せている。このように那珂川沿いの低地では過去幾度となく大きな浸水被害が発生している。表1に示すように過

注2：年流出高は1年間の総河川流量を当該の流量観測地点上流域面積で割ったもので単位面積当たりの総流出量を水深に換算してmmで表したものである。

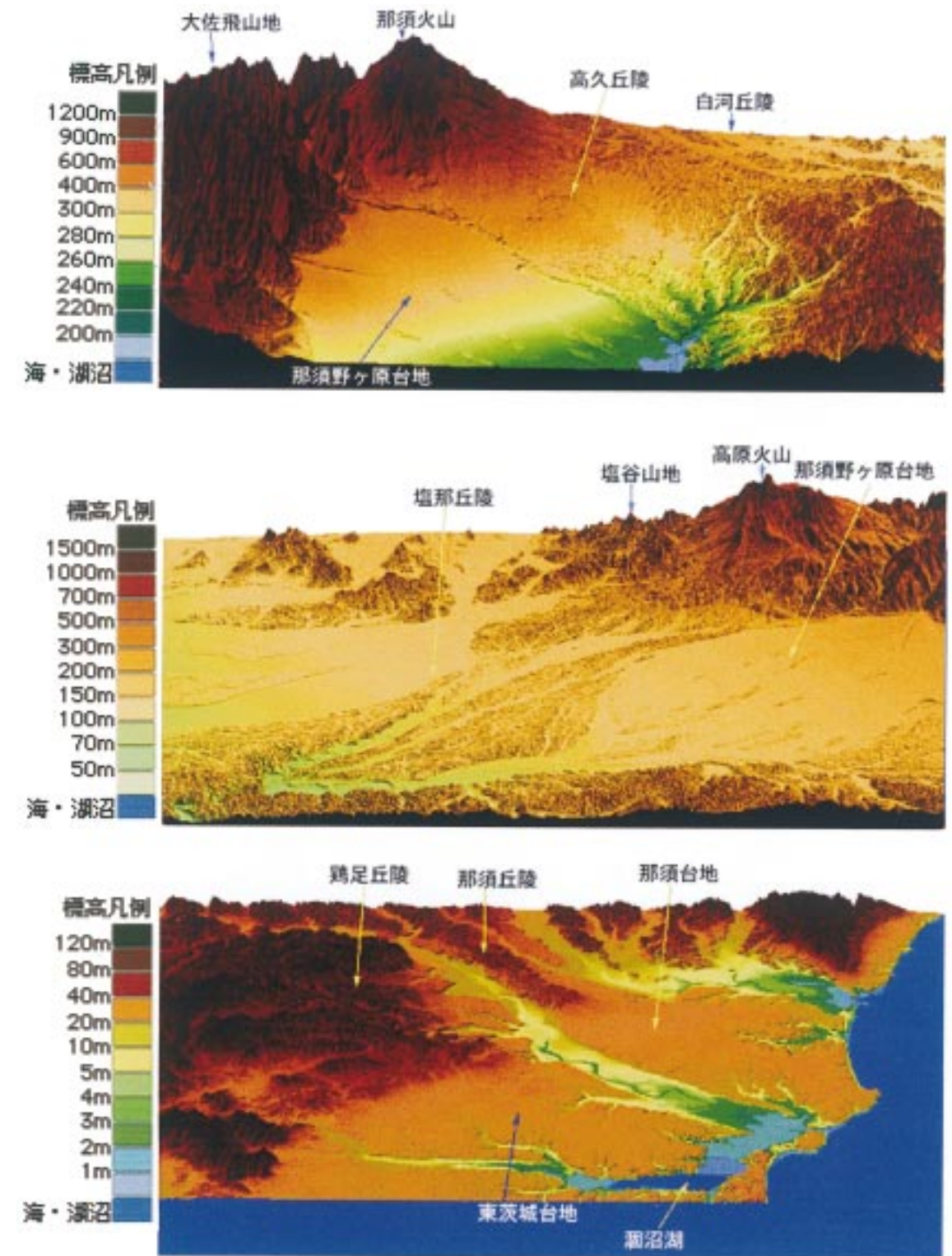


図8 那珂川上・中・下流域鳥瞰図
Fig. 8 Bird's-eye views of the upper section, the middle section and the lower section of the Nakagawa River basin, which were made from digital elevation data with 50m resolution.

表1 主な既往洪水の各地の降雨量および最高水位

Table 1 Rainfall amount and maximum water levels for major floods in the Nakagawa River basin in the past.

項目 豪雨の誘因	那珂川流域各地点の2日雨量, mm								平均2日雨量	那珂川上流野口	那珂川下流部				
	那須	八方ヶ原	黒磯	大田原	八溝山	塩谷	高根沢	鳥山			小瀬	笠間	水戸	野口	最高水位, m
昭和16年(1941)7月台風29号	221	432 ¹	270	261 ²	*	*	234 ³	257	253	269	209	286	(4100) ^{ml/s}	*	
昭和22年(1947)9月キヤスリン台風	250	500 ¹	277	282 ²	*	*	235 ³	*	*	*	292	238	7.37(6800)	8.66	
昭和33年(1958)7月台風11号	237	*	*	179 ²	*	*	*	*	*	*	81	201	5.74(3930)	7.35	
昭和36年(1961)6月梅雨前線	*	*	*	265 ²	*	*	*	*	*	*	309	204	4.62(3800)	7.06	
昭和41年(1966)6月台風4号	206	220 ¹	195	150	139	159	138 ³	181	249	229	229	182	4.35(3510)	7.10	
昭和41年(1966)9月台風26号	212	226 ¹	151	140	104	144	127 ³	87	93	60	60	153	4.90(3540)	7.18	
昭和57年(1982)9月台風18号	150	266	140	145	132	181	188	144	101	128	128	159	4.00(2500)	7.05	
昭和61年(1986)8月台風10号	305	310	262	288	237	222	332	303	280	288	288	253	5.98(6200)	9.15	
平成10年(1998)8月台風4号と停滞前線	757	547	412	295	168	296	155	122	142	84	84	552	5.05	8.43	

注) 添字1: 塩原観測点, 2: 埼玉観測点, 3: 喜連川観測点

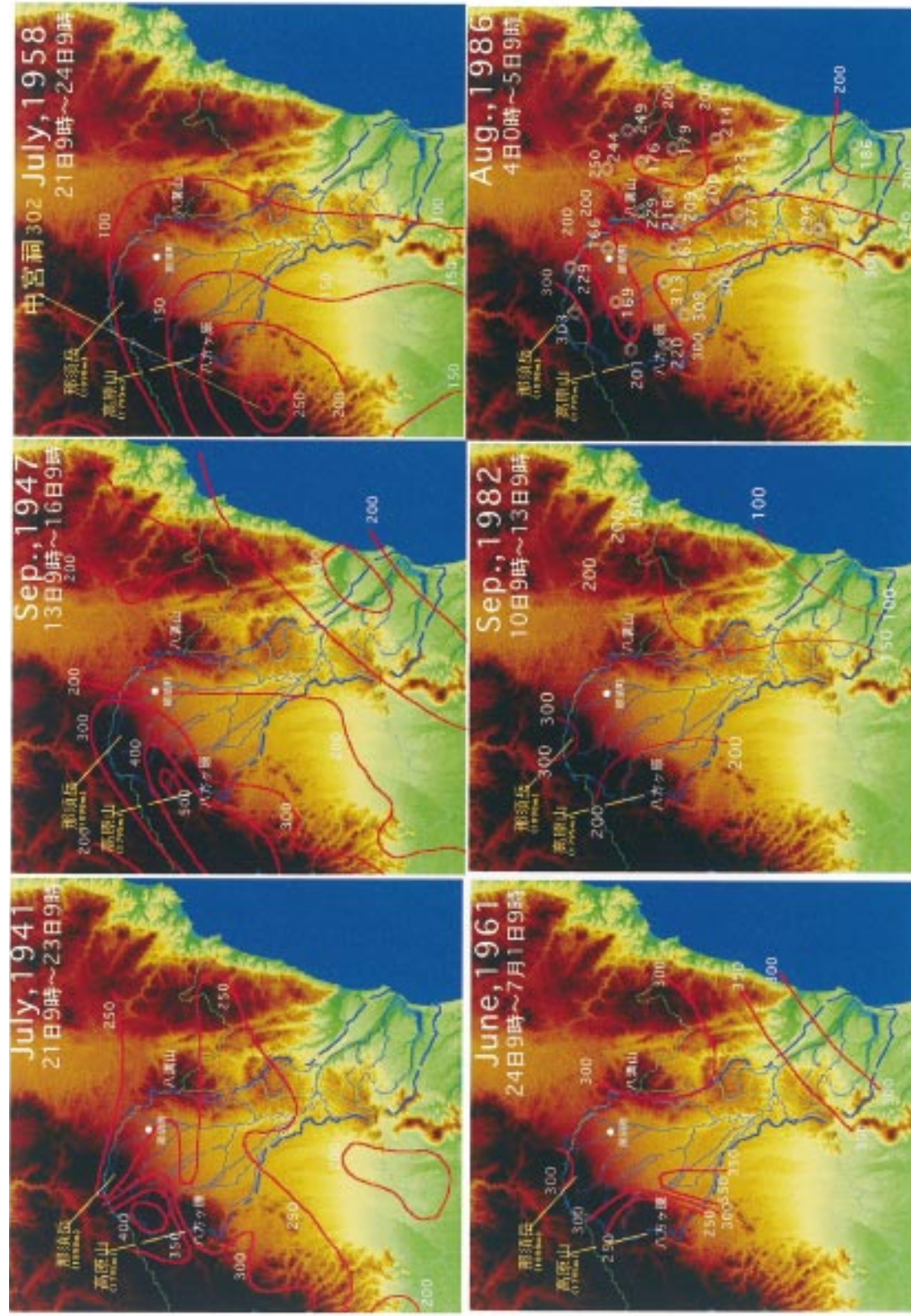


図9 那珂川流域の主な既往洪水の降雨分布
Fig. 9 Rainfall distribution for major floods that have occurred in the Nakagawa River basin in the past.

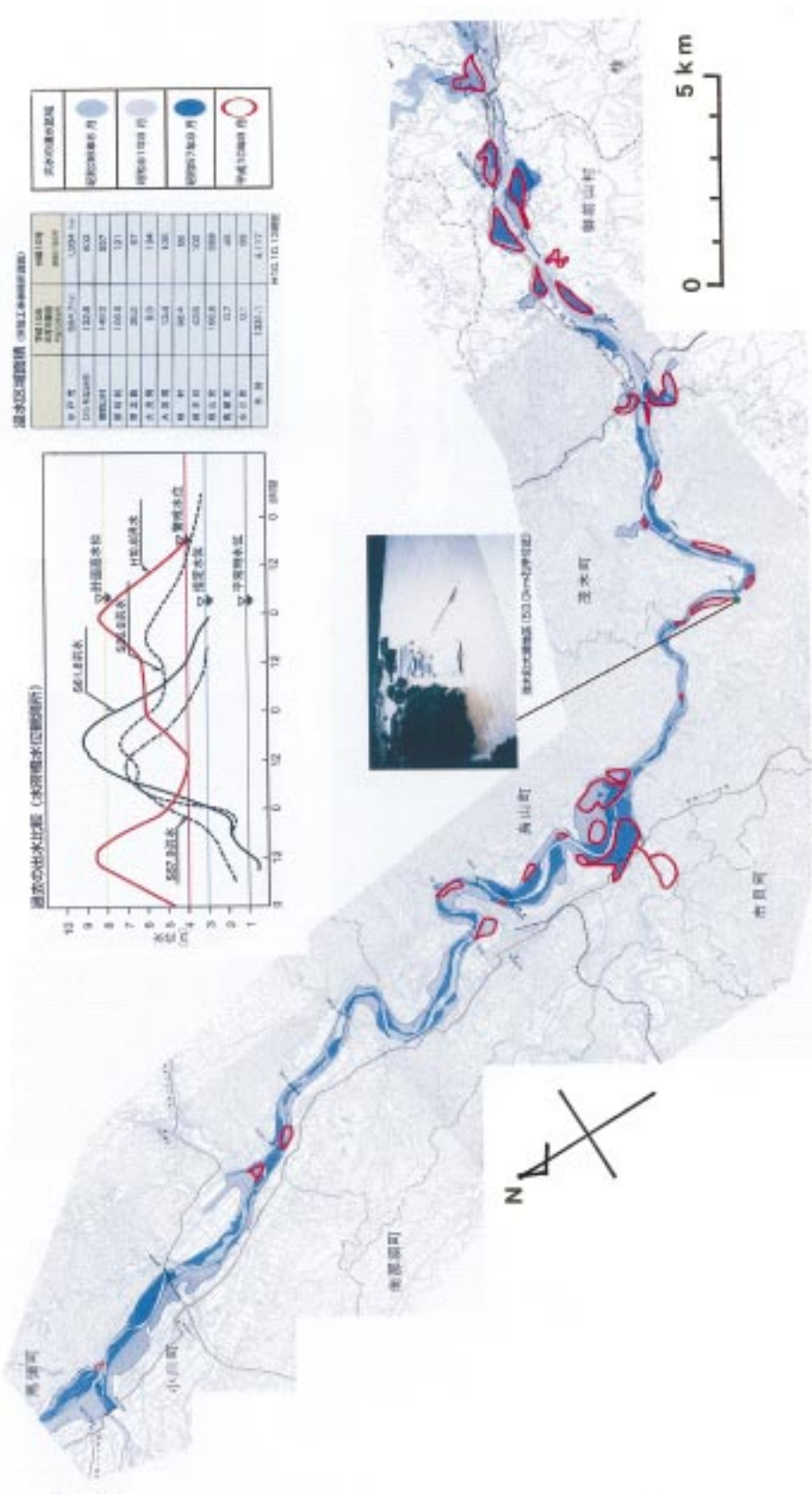


図10・1 那珂川馬頭町～御前山村間の主な洪水氾濫実績図（常陸工事事務所，1998より編集）
 Fig. 10・1 Flood map from Bato Town to Gozenyama Town for major floods in the past (source: the Hitachi Construction Work Office, Ministry of Construction, 1998).

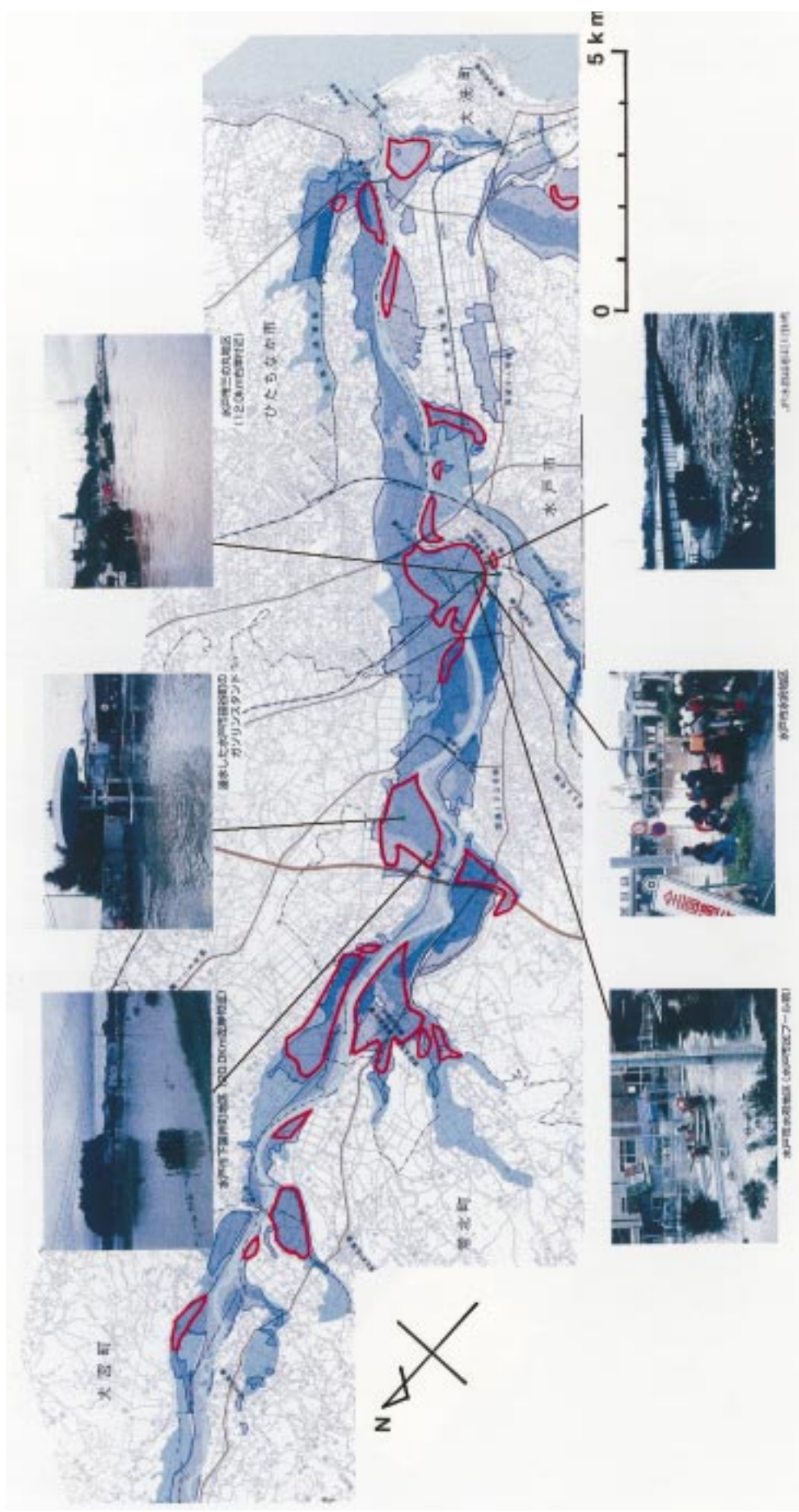


図10・2 那珂川大宮町～那珂湊間の主な洪水氾濫実績図（常陸工事事務所，1998より編集）
 Fig. 10・2 Flood map from Ohmiya Town to Nakaminato City for major floods in the past (source: the Hitachi Construction Work Office, Ministry of Construction, 1998).

去の大洪水の多くは台風に起因する大雨によるものであり、今回の豪雨も台風4号に起因するものであった。特に今回の大雨は那珂川上流部に1,000 mmを越える記録的な豪雨もたらされた。それに対して、下流部では幸いにして100～150 mmの雨に留まったため、昭和22年や昭和61年のような大洪水を免れたが、それでも図10-1及び図10-2に示すように各地の河川沿い低地で浸水被害が発生した。今回の洪水では野口地点より上流域の平均2日雨量は過去最高の552 mm、野口及び水府橋の最高水位は5.05 m及び8.43 mに達した。以下に那珂川上流域、中流域および下流域に分けて洪水流出状況を述べる。

那珂川上流域では前述したように26日18時から27日10時、27日14時から28日3時及び29日15時から30日9時の3度に亘って豪雨もたらされた。27日1時54分に那須町湯本で小川が氾濫したという119番の第1報が入り、その後、2時半頃から那須高原（那須火山麓）の湯本、高久乙の守子、高久丙の広谷地、北条、大沢、池田等々の地域で救助の要請があいついだ。4時頃には東北自動車道路より北の余笹川及び黒川流域の高久丘陵地域では大部分の道路が濁流で通行不能となっていた。その後、洪水被害は余笹川、黒川の中下流部へ拡大した。4時25分に余笹川沿いの低地の寺子地区に洪水の危険を知らせるサイレンが鳴らされ、5時16分に砂の目地区からの救助要請、6時11分に沼野井地区で救助活動が開始されている。黒川沿い低地でも、4時58分に成沢地区から床上浸水との通報があり、5時2分に水原地区が床上浸水し、救助の要請があった。6時台には河川沿いの家屋の流出があいついだ。黒磯市寺子の住民の話では水が4時30分頃来て、避難するのがやっとだったと言う。この洪水により、那珂川上流流域で、6名の方が洪水で亡くなり、川沿いの家50棟が全半壊または流出した。多くの死傷者が出た余笹川では洪水が幅20～50 mの河道の側方を浸食し、その幅を2～3倍に広げる（須賀ら、1999）と共に、幅400～1,000 mの谷底平野を網状に流れた。国土地理院の洪水痕跡調査（1998）によると、浸水深は場所によって異なるがおおよそ0.4～1.9 mであった。中には2.7 mも浸水した家屋も見られた。図11に那珂川上流域の降雨量の時間変化、図12に黒川新田橋、余笹川沓掛および那珂川黒磯の各地点の河川水位の時間変化を示す。これによると8月26日20時から28日6時の間に3つの降雨ピークと河川水位のピークがあり、両者は類似の時系列パターンを示していることが分かる。ここで、注意しておきたい点は降雨パターンは各地で類似しているが降雨強度は場所によって大きく異なっていることである。27日1時から7時頃にかけての記録的な豪雨により、河川水位が急激に上昇し、それに伴っていたところが河原となるような洪水が発生したことがこれら観測データからも推測される。第2波の強雨は8月29日12時から30日18時にかけて発生しており、このときも降雨と河川水位の類似の時系列パターンが見られる。

那珂川中流部では流域の東側の八溝山地は幸いにして大雨はなかったが、西側の那須野ヶ原台地では上流域ほどではないが時間雨量20 mmを越える強雨が数回にわたってもたらされた。このため那須疏水が山麓からの出水と那珂川からの洪水流入により、27日5時17分に黒磯市の青木地区で氾濫した。その後、那珂川からの取り入れ口の水門が閉められた。扇状地を流れ、普段は水の無い熊川、蛇尾川も大洪水となった。28日3時2分に黒磯市上郷屋地区、3時44分に島方地区で熊川が堤防決壊し、6時14分には黒磯市上中野地区で蛇尾川が堤防決壊した。図13に那珂川中流域の降雨量の時間変化、図14に熊川大田原、蛇尾川大田原、箒川湯津上、荒川烏山および武茂川馬頭の各地点の河川水位の時間変化を示す。これによると8月27日4時から28日10時の間に2つの降雨ピークと1つの河川水位のピークがあり、最初の降雨程度では河川水位はあまり上昇していない。第2波の雨は8月29日1時から30日18時にかけて断続的に降っており、この時も同様に2つの降雨ピークが見られ

るが、河川水位の方は始めの水位上昇は小さく1つのピークを持つ河川水位変化を示している。ただし、八溝山地の武茂川は2つのピークを持つ河川水位パターンを示しており、これは薄い風化土層を持つ堆積岩地域の河川の流出特性を反映したものとされる。この点については次項の「各流域の降雨と洪水流出の関係」においても述べている。

那珂川下流域ではそれほど雨は強く降らなかったが、上流からの激しい洪水が下流まで達し、水戸の水府橋で100年確率の計画高水位^{注3}（8.15 m）を33 cm上回る洪水となった。洪水のピークは28日14時と30日の20時30分の2回発生した。このため、堤防の未整備区域での越水と水門および排水ポンプの無い支川での本川からの逆流等により岩根町、上国井町、田谷町、水府町、青柳町等で浸水被害が発生した。各地点の洪水痕跡によると那珂川の寿橋上流右岸の城東地区の雑貨店では道路上90 cmと152 mの高さに2つの洪水痕跡があり、低い方は今回の洪水によるもので高い方は1986年8月の洪水によるものと思われる。那珂川の水府橋右岸の市民プールの側壁には地盤上171 cmの洪水痕跡が見られた。那珂川支川藤井川の旧河道沿いの自然堤防上にある建物の側壁には地盤上75 cmと135 cmの高さに2つの洪水痕跡が有った。高い方は同様に1986年8月の洪水によるものと推測される。更に、藤井川支川西田川左岸の前河原地区の道路沿い民家では地盤上90 cmと140 cmの高さに2つの洪水痕跡が有った。高い方は同様に1986年8月の洪水によるものと推測される。このように河川沿い低地では場所によって異なるが、浸水位は1～1.7 mに達していた。また、各地で2つの高さに洪水痕跡が有りその差は50～60 cmであった。那珂川水府橋地点の今回の洪水と1986年8月洪水の最高水位はそれぞれ8.43 mと9.15 mで有り、その差72 cmは2つの洪水痕跡高の差に近い値になっていたことは河川水位と低平地の浸水位の関係を知るのに興味深いデータである。図15に那珂川下流域の降雨量の時間変化、図16に那珂川の小口、野口及び水府橋の河川水位の時間変化を示す。これによると降雨は4回にわたって降っているが降雨強度は上・中流域に比べて小さい。河川水位は前段に小規模なこぶのある2つのピークを持つ洪水波形となっている。今回の洪水では下流域に大雨が降っていないので下流域支川からの洪水流出による洪水波形の変形は少ないと考えられることから、上流部の洪水波形のピークはそのまま伝搬し下流のピークを形成したと仮定して、洪水ピーク発生時刻の差と流下距離から平均的な洪水ピークの伝搬速度を求めた。これによると小口・野口間では約9 km/時、野口・水府橋間では約7 km/時となった。

注3：100年確率の計画高水位とは、100年に1度の確率で発生が予想される大雨によって引き起こされる洪水の最大流量（基本高水という）を計算し、それからダム等による洪水流量調節分を差し引いた流量（計画高水流量という）を河川に流したときに発生する最大高水位をいう。この計画高水位は安全な堤防を作る基準となっていると共に、この水位を洪水が超えた時、堤防が極めて危険な状態になる。

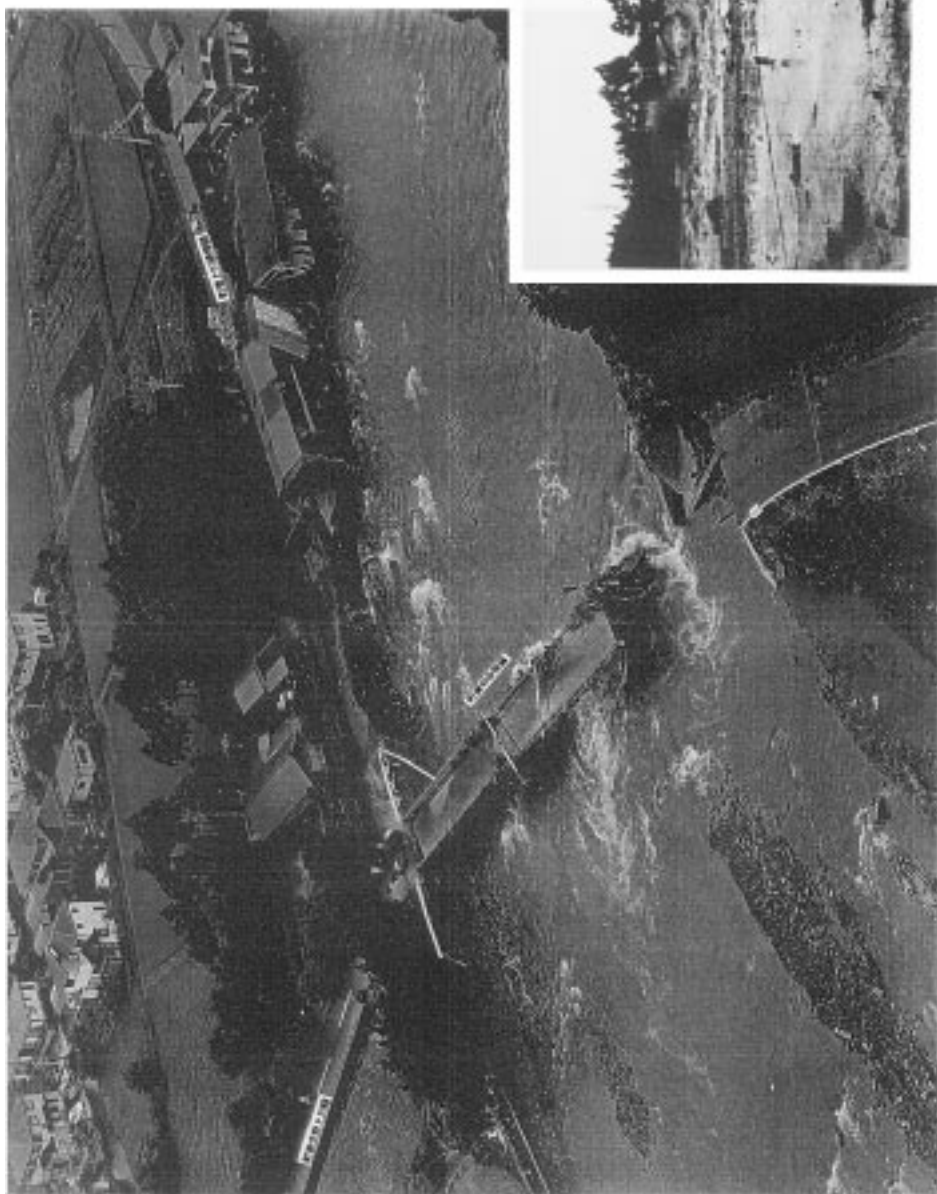


写真3 余笹川被災状況，那須町寺乙地区の町道立岩川上線中余笹橋，右上図は同一地点の洪水時の状況（栃木県提供，1998年8月30日撮影）

Photo 3 Flood disaster along the Yosasagawa River at the Nakayosa Bridge on the Tateiwa-kawakami route of the town road in the Terako-otsu District, Nasu Town taken on Aug. 30, 1998. The picture in the upper right hand corner shows the same area during the flooding taken on Aug. 27, 1998 (courtesy of the Tochigi Prefectural Office).

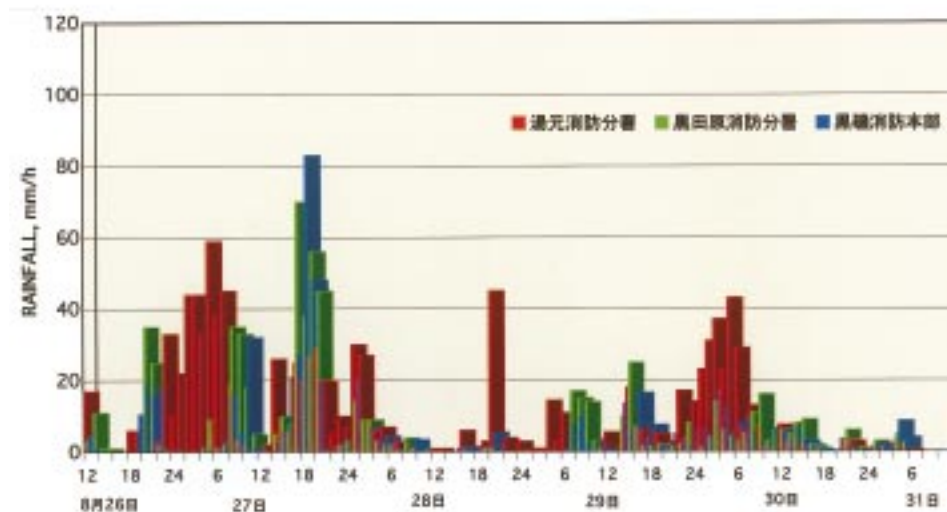
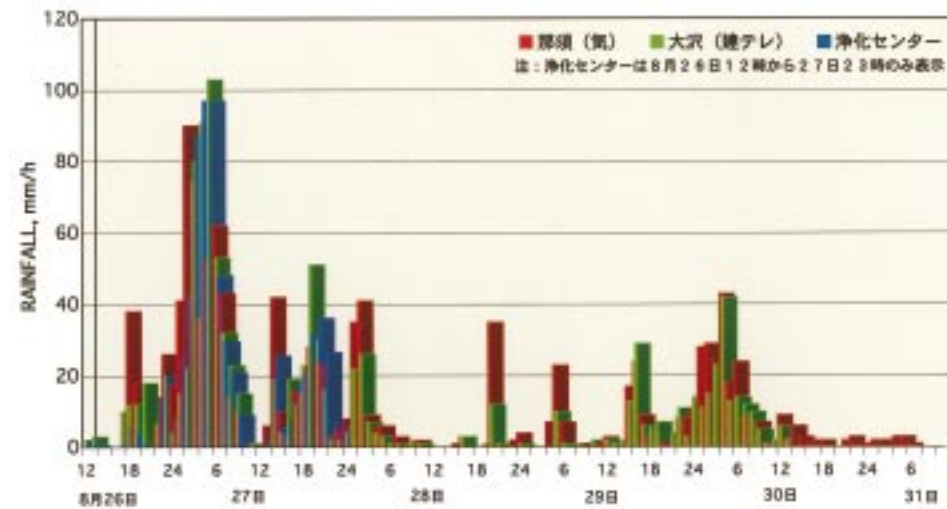


図11 那珂川上流域の降雨時間変化
Fig. 11 Hourly rainfalls in the upper section of the Nakagawa River basin.

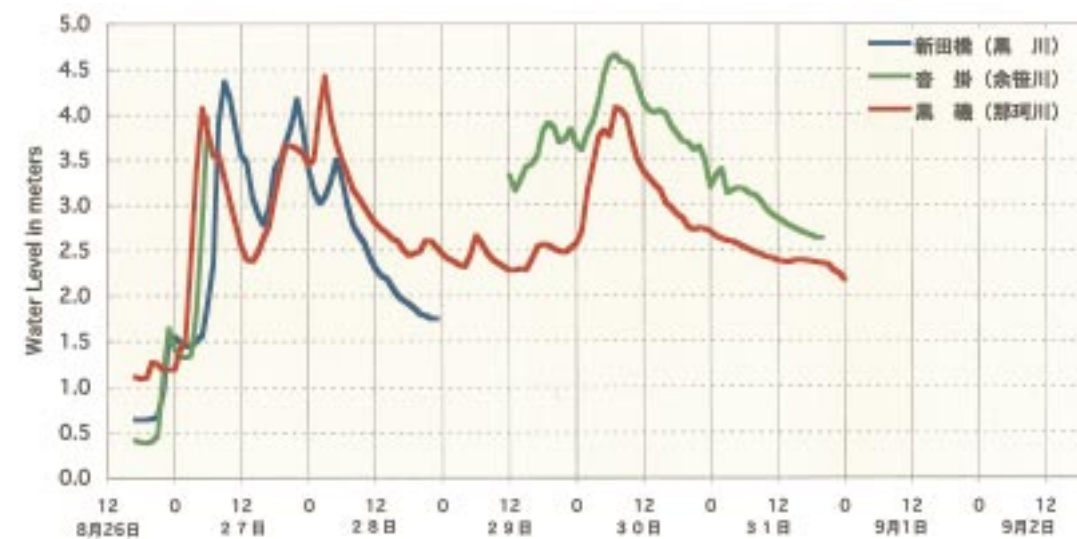


図12 那珂川上流域の河川水位時間変化
Fig. 12 Hourly changes of river water levels in the upper section of the Nakagawa River basin.

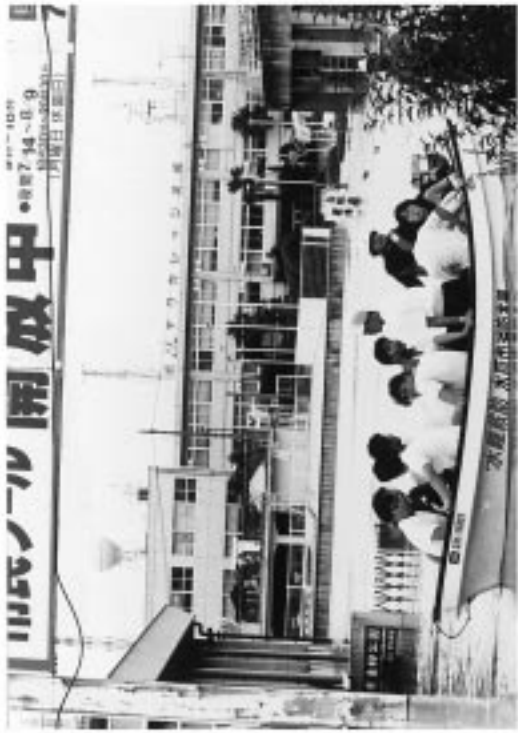


写真 5 那珂川右岸の水戸市水府町浸水状況（茨城県提供，1998年8月30日撮影）

Photo 5 Flooding on the right hand bank of the Nakagawa River in Suifu Town, Mito City taken on Aug. 30, 1998 (courtesy of the Ibaraki Prefectural Office).

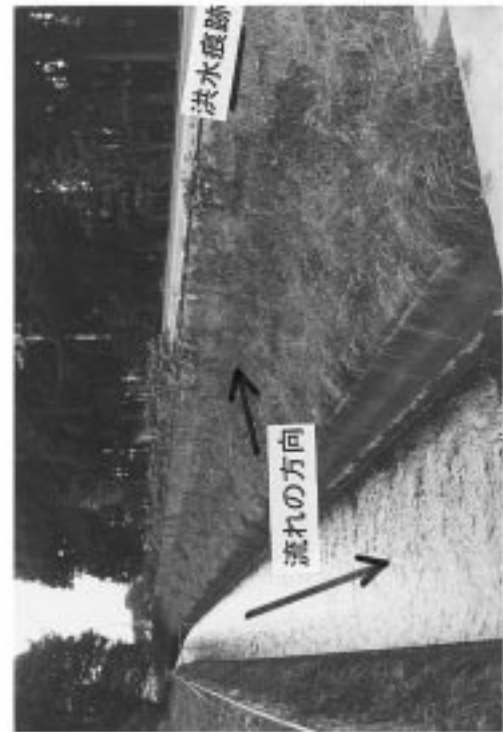


写真 4 黒磯市青木地区の那須疎水の洪水痕跡，1998年11月12日撮影
Photo 4 Flood marks on the Nasu water supply canal in the Aoki District, Kuroiso City on Nov. 12, 1998.

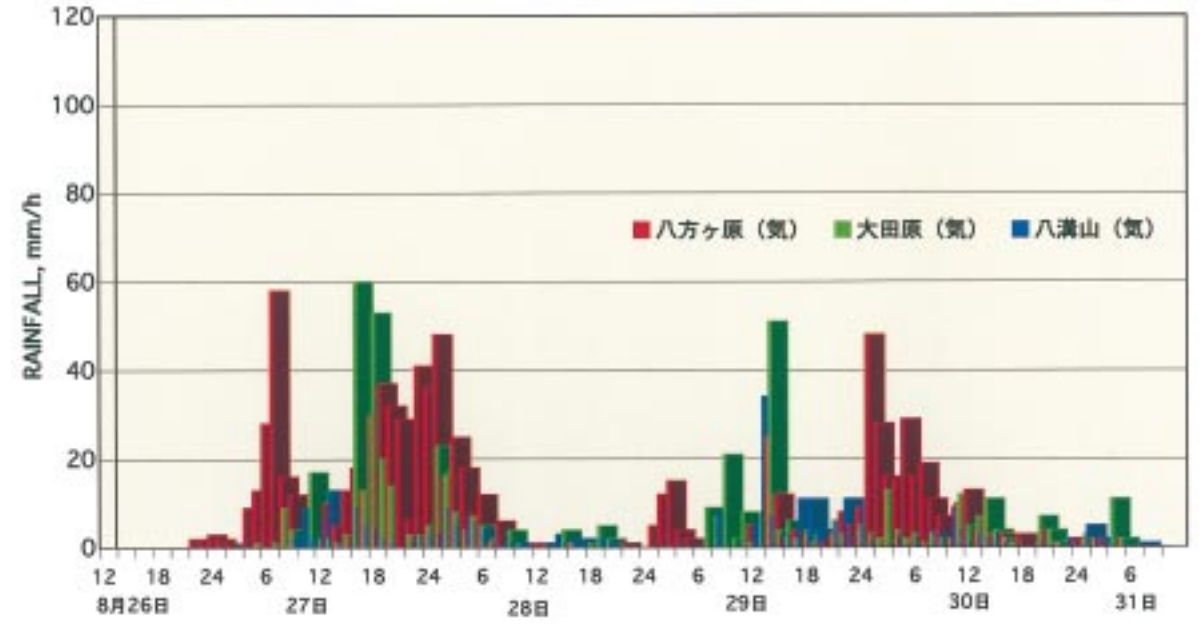


図 13 那珂川中流域の降雨時間変化
Fig. 13 Hourly rainfalls in the middle section of the Nakagawa River basin.

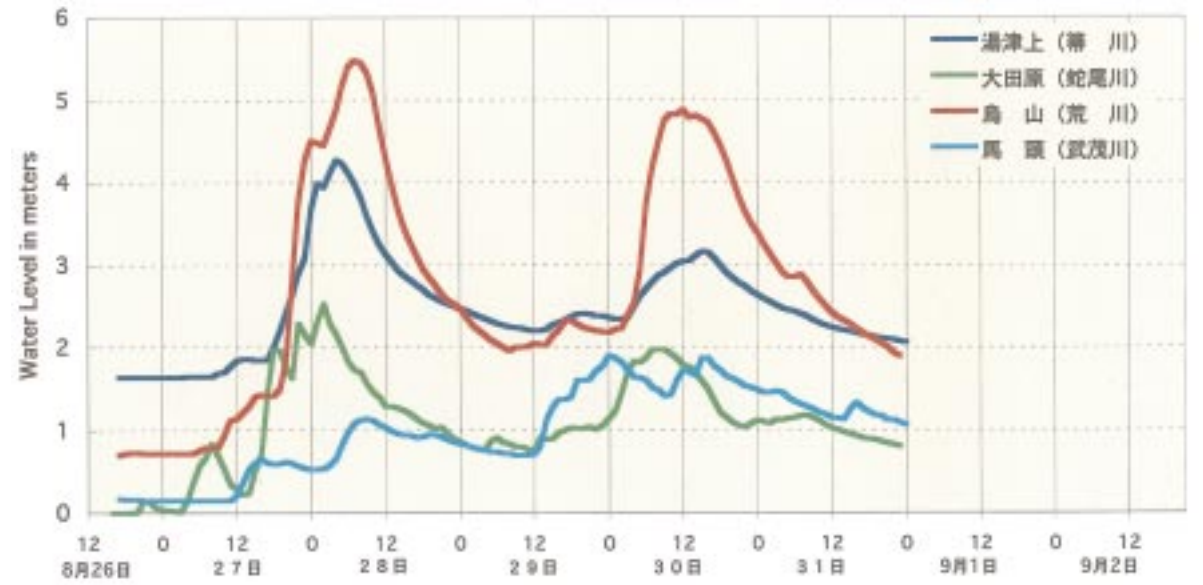


図 14 那珂川中流域の河川水位時間変化
Fig. 14 Hourly changes of river water levels in the middle section of the Nakagawa River basin.

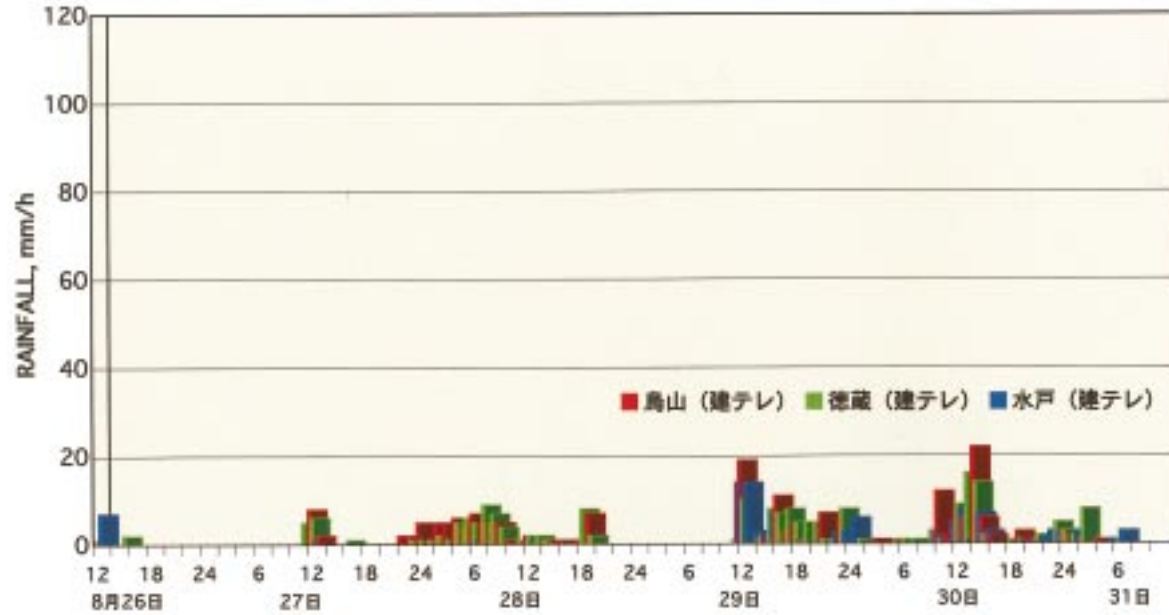


図15 那珂川本川中・下流域の降雨時間変化
Fig. 15 Hourly rainfalls in the middle and lower sections of the Nakagawa River basin.

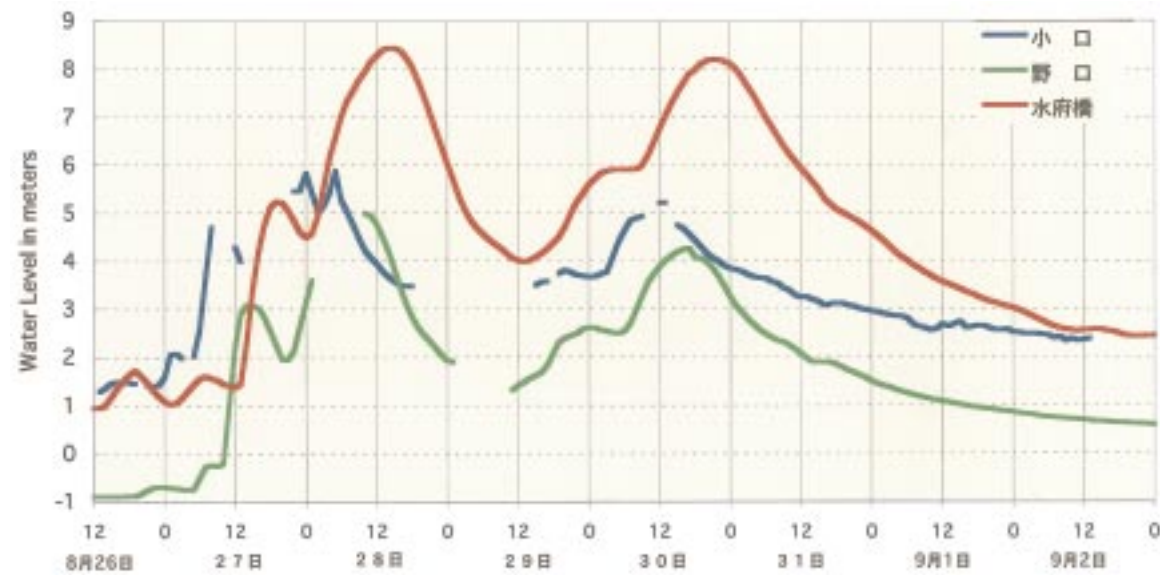


図16 那珂川本川中・下流域の河川水位時間変化
Fig. 16 Hourly changes of river water levels in the middle and lower sections of the Nakagawa River basin.

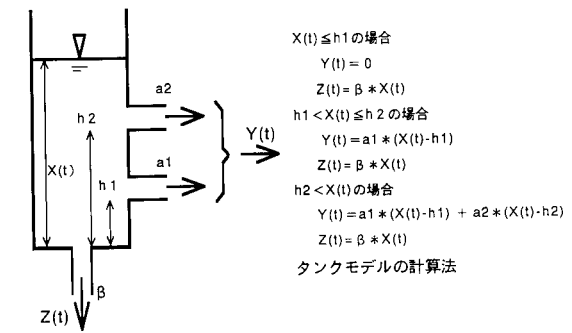
4. 各流域の降雨と洪水流出の関係

異常洪水をもたらすような豪雨時の降雨と洪水流出との関係を調べておくことは河川の洪水水位を少しでも早く予測し、被害軽減を図るために必要なことである。そこで、ここでは那珂川の上流域、中流域及び下流域本川に分けて、元気象庁、元建設省、県等で観測している密な雨量観測データと元建設省および県の水位観測データに基づいて、降雨と洪水水位の相関解析およびタンクモデルによる洪水水位の推定を行った。豪雨時の降雨と流出量の関係を流域全体としてマクロ的に見ると、初期の降雨により流域の表層土壌が十分濡れた状態になった後、強雨が降り続くとその強雨の大部分は河川に短時間に流出するようになり、それらは洪水の主要部を形成する。このような状態の時に、流域に降った雨が水位観測地点まで達するのに要する時間を洪水到達時間とし、この時間で降雨量を移動平均するとそれは洪水波形に似たものとなる。この性質を利用すると簡易に当該地点の洪水流量が推測でき、更に、その地点の水位・流量曲線式を仮定するならば河川水位も容易に推定できる。これらは現場での水防活動に有用な情報となり得ることから、ここでは降雨と洪水水位の移動平均解析を行った。その結果、上流域、中流域および下流域において、それぞれの地点に適した時間の移動平均降雨量を求めると、それらは洪水水位と類似した時系列変化を示すことが分かった。表2に各水位観測点上流域の最大時間雨量、最大3時間雨量および適切な移動平均時間とその平均降雨量を示す。より詳細に降雨と洪水流出との関係を見ると、降雨初期の状態では洪水流出の大部分は雨水浸透しない地域に降った雨がそのまま流出する部分で占められ、それら雨水の流下速度は速く、また、雨水浸透しない地域の面積は小さいため雨に対する洪水流出の割合は小さい。降雨が長く継続すると、これまで雨水を貯留していた地域でも雨水が表層附近に貯えられなくなり、それらが河川に流出するようになる。このような状態では流下速度の異なる様々な雨水流下経路が出現するようになり結果として、雨水の流下速度は相対的に遅くなり、雨水流出する区域が大きくなるため降雨に対する流出割合は大きくなる。また、降雨強度が大きくなる程、雨水の流出割合は大きくなり、雨水流下速度も速くなる。このような複雑な流出現象を巧みに表現したのがタンクモデルである。タンクモデルとは図17に示すように側面に流出穴、底面に浸透穴を持ったタンクを直列に並べた構造をしており、降雨量から流出量を計算するものである。計算法は同図に示すように極めて簡単である。より詳しい計算法と直列4段タンクモデルの各タンクからの流出量の計算結果を巻末の参考資料に載せている。このモデルは洪水時の水収支の観点から、流域全体をマクロ的に見て、降った雨がどの程度地中に一時的に貯留され、それが時間の経過と共にどのように河川に流れ出るか、また、地中の貯水量の増加に伴って、流出量がどのように変化するかを計算する。前述したように那珂川流域には元気象庁、元建設省、県等で観測している密な時間雨量データが有り、本解析ではこれら取得できた全ての雨量データを用いて各地の時間単位の洪水水位を予測することとし、図18に示すように各地点雨量をそれぞれ同一のパラメータを持つタンクモデルに入力し、流出量を計算した。ただし、各流域の洪水の再現性を良くするためそれぞれの流域毎に適切なタンクの係数を設定している。次に、各計算流出量に一定の遅れ時間を与え、それらを荷重平均して流域全体の流出量を計算した。更に、仮想的に設定した水位・流量関係式を用いて当該地点の計算流量から洪水水位を計算した。ここで、洪水の遅れ時間は解析対象水位観測所から各雨量観測点までの河川沿い距離を測り、10 kmあたり1時間の遅れを見込んで時間単位の遅れ時間を設定した。また、雨量荷重係数は観測点が密な地域は0.5程度、近傍の流域外観測点は0.2程度、観測点の少ない地域は2程度とし、ほぼ平均的に雨量観測点が分布する区域は1とした。それらの設定値を表3に示す。計算に使用した観測点と解析対象水位観測点は図19に示す通りである。

この手法により各流域の洪水水位は良好に予測することができた。また、凝灰岩等の難透水性地層の上に火山灰、砂礫層が堆積している地域と武茂川流域のように花崗岩が点在する堆積岩地域の流出特性の違いをタンクモデルの係数によって特徴付けることができた。以下に各流域の解析結果について述べる。

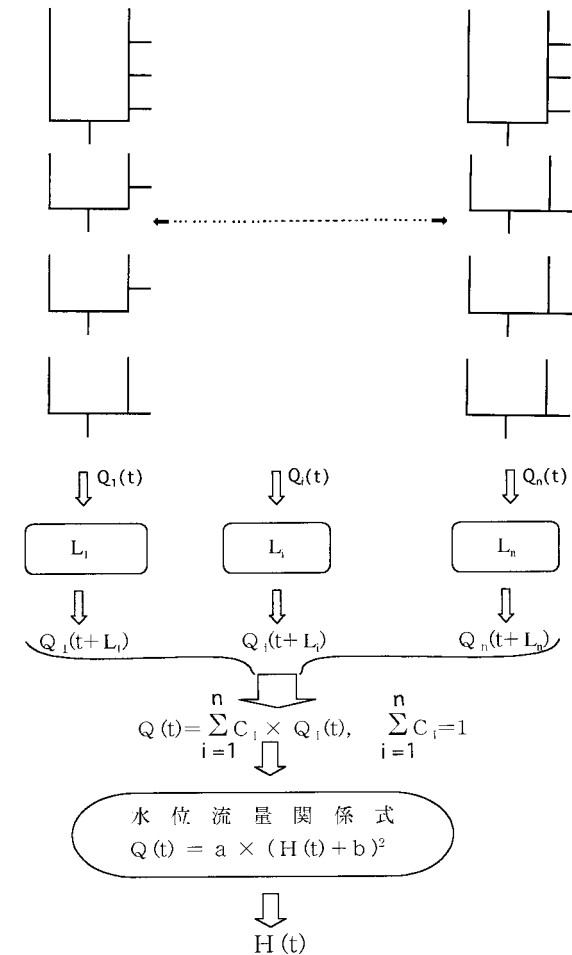
表2 那珂川流域の各水位観測地点上流域の移動平均降雨量
Table 2 Maximum moving average rainfall of the catchment basin at each water level station in the Nakagawa River basin.

解析対象地点	流域面積, km ²	最大流路長 km	流域平均最大時間雨量	流域平均最大3時間雨量	移動平均時間 & 移動平均降雨量
黒川新田橋	96	42	44.9mm (27/4~5)	114.5mm (27/2~5)	8h(27/1~9) 29.9 mm/h 8h(27/13~21) 21.7 mm/h 8h(30/0~8) 12.4 mm/h
余笹川沓掛	325	39	47.7mm (27/4~5)	125.2mm (27/2~5)	7h(27/0~7) 33.0mm/h 7h(27/13~20) 24.4mm/h 7h(29/23~30/6) 13.8mm/h
那珂川黒磯	185	38	28.9mm (27/4~5)	79.8mm (27/17~20)	7h(27/1~8) 20.3mm/h 7h(27/16~23) 19.3mm/h 7h(29/23~30/6) 16.7mm/h
熊川大田原	60	24	59.3mm (27/17~18)	123.9mm (27/17~20)	15h(27/12~28/3) 17.8mm/h 15h(29/18~30/9) 9.5mm/h
蛇尾川大田原	173	35	46.8mm (27/17~18)	119.2mm (27/17~20)	12h(27/15~28/3) 23.6mm/h 12h(29/21~30/9) 12.7mm/h
帯川湯津上	474	55	46.1mm (27/17~18)	117.8mm (27/17~20)	14h(27/14~28/4) 21.4mm/h 14h(29/21~30/11) 11.8mm/h
武茂川馬頭	152	32	20.0mm (29/12~13)	27.5mm (29/11~14)	9h(29/12~29/21) 7.0mm/h 9h(30/5~30/14) 4.0mm/h
荒川烏山	435	61	26.6mm (27/16~17)	73.8mm (27/22~28/1)	19h(27/12~28/7) 13.6mm/h 19h(27/20~30/15) 10.1mm/h
那珂川小口	1,255	69	32.0mm (27/18~19)	86.4mm (27/17~20)	16h(27/12~28/4) 16.1mm/h 16h(29/20~30/12) 10.0mm/h
那珂川野口	2,181	113	25.2mm (27/18~19)	67.0mm (27/17~20)	28h(27/0~28/4) 11.6mm/h 28h(29/11~30/15) 7.3mm/h
那珂川水府橋	2,552	139	20.4mm (27/18~19)	54.3mm (27/17~20)	44h(26/16~28/12) 6.9mm/h 44h(29/1~30/21) 4.8mm/h



ここに、 a_1, a_2 はタンク内の貯留水が単位時間に河川へ流出する割合を示す定数、 β はタンク内の貯留水が単位時間に下層へ浸透する割合を示す定数、 h_1, h_2 はタンクの底からの流出穴の高さで mm 単位で表す。 $X(t)$ は時刻 t におけるタンク内の貯水量で mm 単位で表す。 $Y(t)$ はタンクから単位時間に河川へ流出する量を、 $Z(t)$ はタンクから単位時間に下層へ浸透する量をそれぞれ mm 単位で表す。

図17 タンクモデルの基本構造および計算法
Fig. 17 Basic structure of the Tank Model and its calculation procedure.



ここに、 $Q_i(t)$ は各タンクから河川へ流出する流量、 C_i は各地の雨量荷重係数を全雨量荷重係数の和が1になるように補正した値、 $H(t)$ は河川水位、 a 及び b は河川水位と河川流量の関係式の定数、 L_i は洪水の河道での遅れ時間を現す。一般に、河川は洪水の平滑化作用と洪水の遅れ効果を有しているが、ここではボックス L_i によって洪水の遅れ効果のみを考慮した。

図18 タンクモデルを用いた河川水位予測手法
Fig. 18 Diagram of the simulation procedure for flood water levels.

表3 河川水位予測に用いた雨量観測点および雨量加重係数と遅れ時間
 Table 3 Rainfall stations and their contribution coefficients and delay times for using flood run-off simulations.

雨量観測点番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
新田橋 (黒川)	雨量係数	1	1	—	—	0.8	0.8	—	—	—	—	—	0.5	—	—	—	—	—	—	0.2
	遅延時間	2	2	—	—	1	1	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	0
沓掛 (余笹川)	雨量係数	1	1	0.8	0.8	1	1	0.3	0.3	—	—	—	0.3	—	—	—	—	—	—	0.1
	遅延時間	2	2	2	2	1	1	0	0	—	—	—	3	—	—	—	—	—	—	0
黒磯 (那珂川)	雨量係数	—	—	1	1	—	—	0.5	0.5	1	1	1	—	—	—	—	—	—	—	—
	遅延時間	—	—	1	1	—	—	0	0	1	2	2	—	—	—	—	—	—	—	—
大田原 (熊川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	0.5	0.5	—	—	—	—	0.5	—	0.5	—	—	—	—
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	3	—	0	—	—	—	—
大田原 (蛇尾川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	0.5	0.5	—	—	—	—	1	1	0.5	—	—	—	—
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	0	0	—	—	—	—	3	1	0	—	—	—	—
湯津上 (箒川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	0.5	0.5	—	—	—	—	1	1	0.4	0.2	—	—	—
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	1	1	—	—	—	—	3	2	0	0	—	—	—
馬頭 (武茂川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.0
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
烏山 (荒川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	1	—	—	—
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4	—	3	—	—	—
小口 (那珂川)	雨量係数	1	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.5	1	1	1	0.5	1	1	1	0.5	0.5	0.5	0.2
	遅延時間	4	3	3	3	2	2	2	2	3	4	4	3	3	2	1	1	0	0	1
野口 (那珂川)	雨量係数	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1	1	1	0.5	1	1	1	1	0.5	0.5	1
	遅延時間	9	8	8	9	7	7	7	7	8	9	9	9	8	6	5	5	5	5	6
水府橋 (那珂川)	雨量係数	1	1	1	1	1	1	0.5	0.5	1	1	1	0.5	1	1	1	1	0.5	0.5	1
	遅延時間	12	11	11	12	10	10	10	10	11	12	12	12	11	10	8	9	8	8	9

観測所番号		20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
新田橋 (黒川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.2
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.0
沓掛 (余笹川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.1
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2
黒磯 (那珂川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.2	—	—	—	—	—
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—
大田原 (熊川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	1	—	—	—	—
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	2	—	—	—	—
大田原 (蛇尾川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	0.5	1	—	—	—	—	—
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	0	2	—	—	—	—	—
湯津上 (箒川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	3	—	0	2	—	—
馬頭 (武茂川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
烏山 (荒川)	雨量係数	—	—	—	—	1	0.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.3	1	—	—
	遅延時間	—	—	—	—	2	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	3	—	—
小口 (那珂川)	雨量係数	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5	1	—	1	1	—	—	—	—	—	0.2
	遅延時間	—	—	—	—	—	—	—	—	0	4	—	1	3	—	—	—	—	—	3
野口 (那珂川)	雨量係数	0.2	0.5	1	—	1	0.5	1	—	—	1	1	1	1	1	—	0.5	1	0.5	0.2
	遅延時間	3	0	0	—	4	2	2	—	—	4	8	6	5	8	—	2	5	9	8
水府橋 (那珂川)	雨量係数	0.2	1	2	1	1	0.5	1	3	1	1	1	1	1	1	—	0.5	1	0.5	0.2
	遅延時間	6	2	3	0	8	5	5	3	0	7	11	10	8	10	4	5	9	12	11



図19 解析した水位観測点および雨量観測点位置図
 Fig. 19 Distribution of water level and rainfall stations, which were used for flood simulations.

4.1 那珂川上流域の洪水解析

対象地点は貴重な洪水記録が得られている黒川新田橋地点、余笹川沓掛地点および那珂川本川黒磯地点とした。この地域の解析で得られた移動平均降雨量を図20に、試行錯誤により求めた各地のタンクモデルおよび仮想の水位・流量関係式を図21に、それらタンクモデルによる計算結果を図22にそれぞれ示す。

黒川新田橋地点の解析

黒川は標高1,850 mの那須火山北部を水源とし、高久丘陵の北部を流れ、栃木と福島の間境付近を流域とする河川である。新田橋地点より上流域の表層地質は那須火山の南東側斜面の火山性岩石地域と未固結～固結火砕岩類の上にローム層が堆積する山麓の丘陵および台地で構成されている。その流域面積は95.7 km²、分水界までの最大流路長は42 km、その間の比高は1,680 mである。この地点の最高水位は4.36 mと記録されている。栃木県河川課は洪水痕跡、流下断面等の調査により、(1)式に示す Manning の平均流速式を用いて、河床の粗度係数を0.02, 0.030 および0.035 とした場合の最大流量をそれぞれ879m³/s, 733 m³/s および628 m³/s と算出している。

$$Q = A \times I \times R^{2/3} / n \quad \text{----- (1)}$$

ここに、Qは流量 (m³/s)、Aは洪水の流下断面積 (m²)、Iは水面勾配であり、勾配が急な河川ではほぼ河床勾配に等しい、Rは径深であり、洪水の流下断面積を洪水と接する横断方向の河道壁の長さ(潤周)で割ったもので川幅の広い河川では、ほぼ平均水深に等しい。nは粗度係数であり、河床材料の粒径、河川の蛇行・湾曲、河床および河岸の形状、材料・植生状況によって異なり、自然河川では0.025～0.040の値が多く用いられている。

これらを1 km²当たりの比流量(単位: m³/s/km²)に換算すると9.2, 7.7 および6.6 と非常に大きな値となる。図20の上段は新田橋上流域の8時間の移動平均降雨量および新田橋地点の水位の時間変化を示したものである。この図からも分かるように8時間の移動平均降雨量波形と洪水波形は類似したものとなっている。ここに、新田橋上流域の流域平均降雨量は図19に示す1, 2, 5, 6, 12, 19 および38の位置の7地点の雨量データを表3に示す雨量荷重係数で荷重平均して求めた。これによると表2に示すように流域平均の最大時間雨量は44.9 mm (27日4時～5時)、最大3時間雨量は114.5 mm (27日2時～5時) および8時間の移動平均降雨量のピークは29.9 mm/h (27日1時～9時)、21.7 mm/h (27日13時～21時)、12.4 mm/h (30日0時～8時)となっている。より詳細に新田橋地点の洪水水位を予測するため、図21の左端に示すタンクモデルと1.の水位・流量関係式を用いて計算を行った。計算は図18に示す方式で行った。各計算流出量の遅れ時間と雨量荷重係数は表3に示す値を用いた。通常、流量観測により水位観測所の水位・流量関係式が作られ、それを用いて連続的な水位観測から河川流量が算出されるが、流量観測は多大な労力が必要なことから主要地点でのみ行われており、多くの地点では行われていない。そこで本解析では、流量が水位の2乗の関数で現されるという性質を利用して試行錯誤により図21の左端下部に示す1.の水位・流量関係式を設定した。図22の上段に流域平均降雨量の時間変化と水位予測結果を示しており、この図から分かるように洪水初期の3つのピーク波形を非常に良く再現している。残念なことに後半の洪水については、洪水が異常であったため洪水水位観測データが得られていないので予測結果の再現性は不明である。この流域のタンクモデルは洪水波形の再現性を良くするために第1段タンクに60 mm以上の雨水が貯留されると急激に洪水流量が増すようになっている。また、第2段および第3段から異常に多く流出するよう

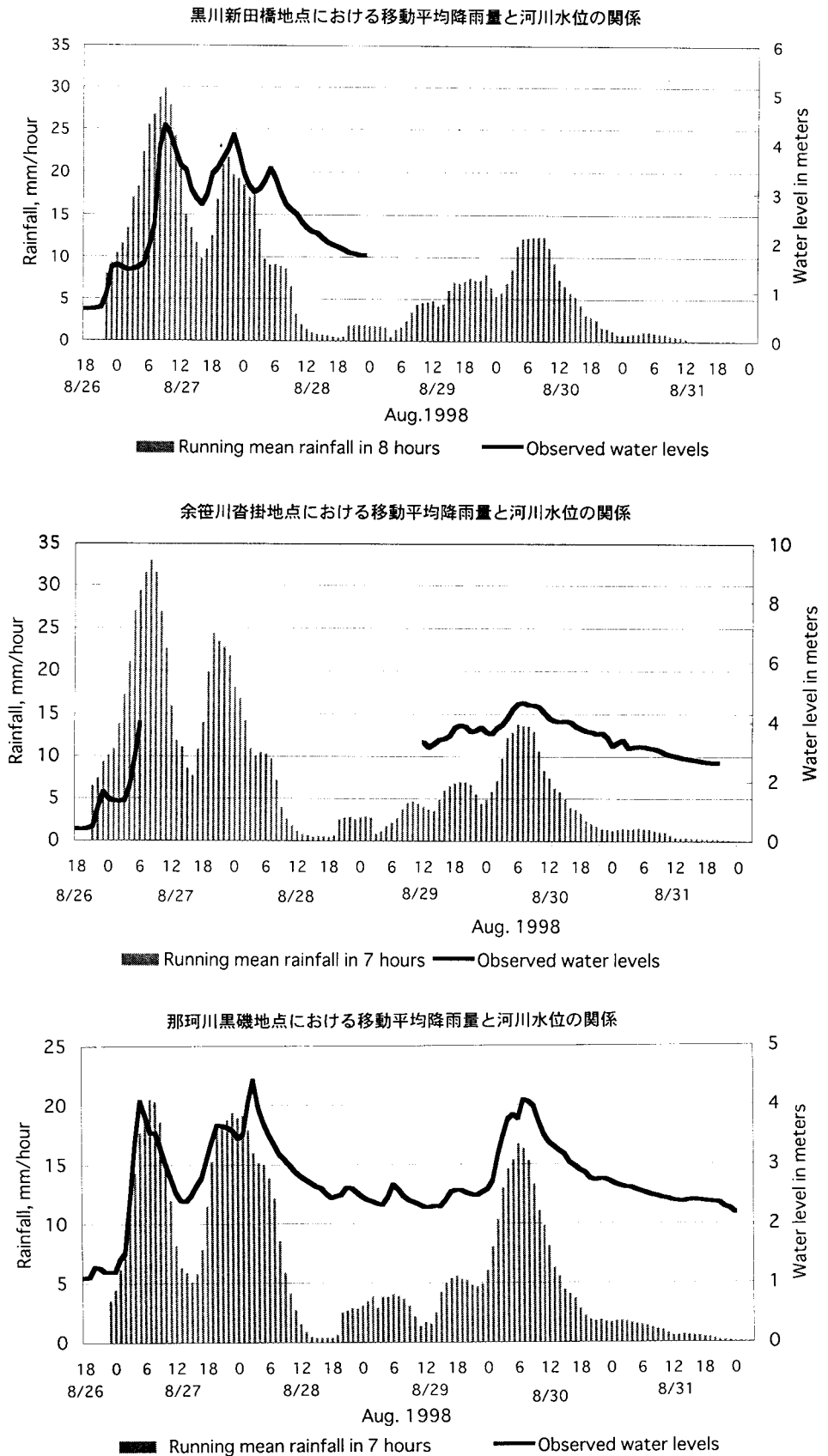
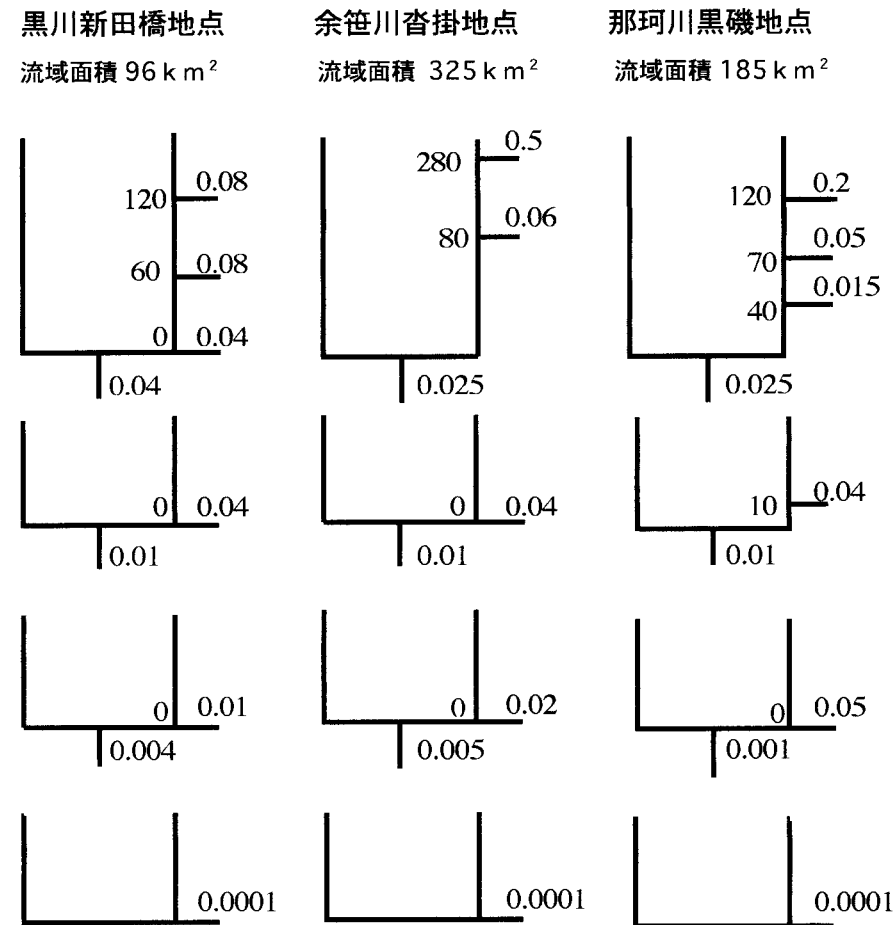


図20 那珂川上流域各地点の移動平均降雨量の時間変化
Fig. 20 The time change for moving average rainfall amounts comparing observed river water levels in the upper section of the Nakagawa River basin.



使用した仮想水位流量関係式

1. 黒川新田橋地点 $Q=32.5 \times H^2$
2. 余笹川沓掛地点 $Q=33 \times H^2$
3. 那珂川黒磯地点 $Q=70 \times (H-0.9)^2$

図21 那珂川上流域各地点のタンクモデルおよび仮想水位流量関係式
 Fig. 21 Tank Models for flood run-off simulations and functions representing the virtual relation between river discharge and water level.

な係数の設定になっている。これは洪水痕跡調査から推定された最大洪水流量が大きくなったこと、および洪水波形がピークを過ぎても急激に減少せずなだらかに減水し、しかも比較的大きな河川流量が維持されていたと推定されたこと等をモデルに反映させたためであり、難透水性基盤を有する地質構造によるものと思われるが詳しいことは分からない。この計算は8月26日17時から9月2日18時まで行っており、最大時間流出高は22.3 mm/hと計算され、流域平均の総降雨量は902.1 mm、総流出高は876.2 mmと算出された。これは降った雨の実に97%が7日間で流出したことになる。この結果が妥当かどうかは正確な観測流量が得られていないので不明であるが、固結した凝灰岩が覆う地域の流出特性を反映していると思われる。

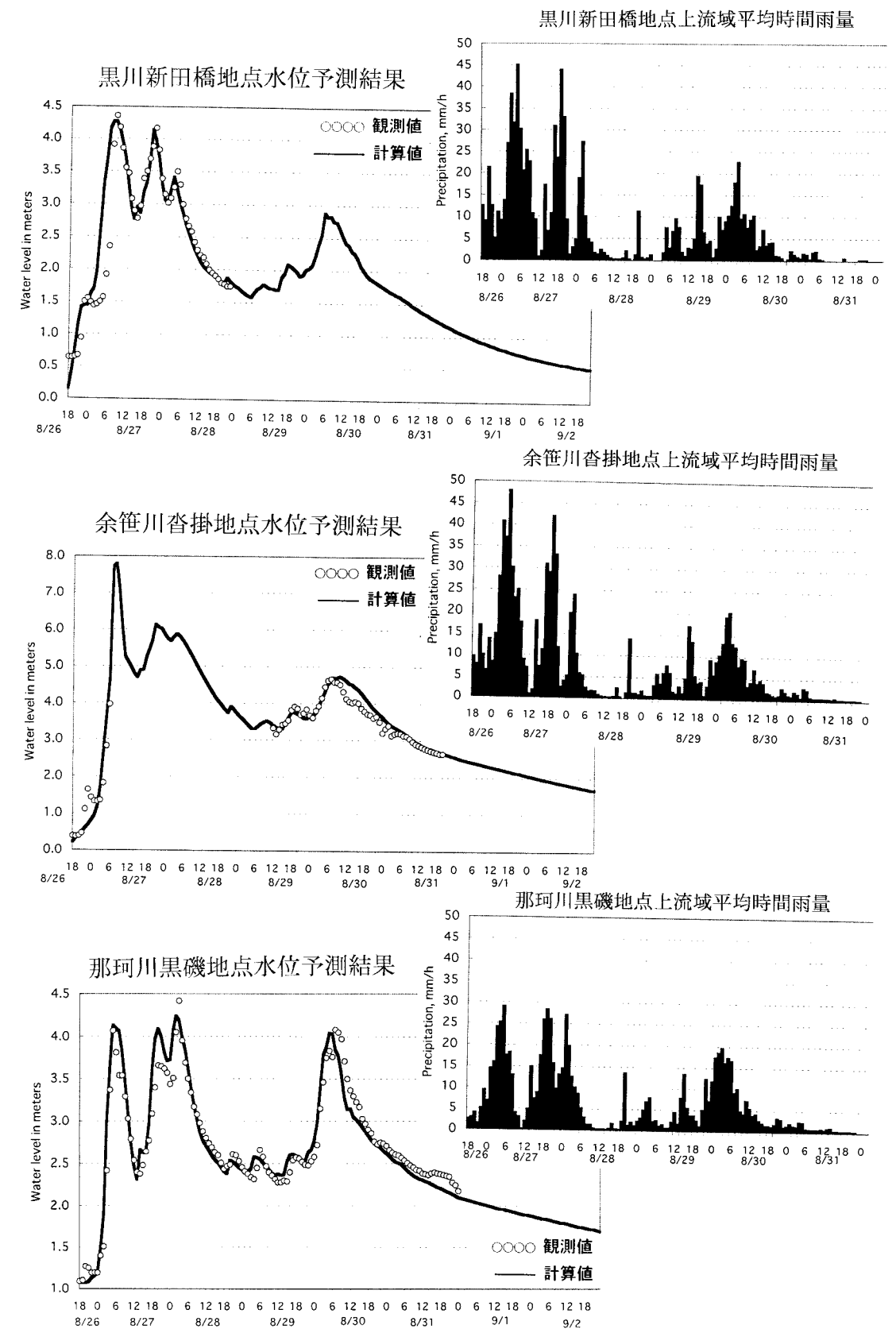


図22 タンクモデルによる点的那珂川上流域各地点の河川水位予測結果および流域平均雨量
 Fig. 22 Results of flood run-off simulation using the Tank Model in the upper section of the Nakagawa River basin with hourly averaged areal rainfall shown in the upper right hand corner.

余笹川沓掛地点の解析

余笹川は標高1,800～1,900 mの那須火山の朝日岳、茶臼岳を水源とし、高久丘陵の中央部を流れる河川である。沓掛地点より上流域の表層地質は黒川流域と同様、那須火山の南東側斜面の火山性岩石地域と未固結～固結火砕岩類の上にローム層が堆積する山麓の丘陵および台地で構成されている。その流域面積は黒川、奈良川等の流域を含み、325.3 km²であり、分水界までの最大流路長は39 km、その間の比高は1,590 mである。この流域では図19の1、2及び3の地点の気象台の那須観測所、元建設省の大沢観測所、那須町浄化センターで豪雨が観測されており、それらの最大時間雨量は90 mm、103 mmおよび97 mmであり、最大3時間雨量は205 mm、274 mmおよび282 mmであった。特に、那須町浄化センターで観測された雨量の自記紙には最大60分雨量114 mm（8月27日3時20分から4時20分の間）が記録されている。図23にこの浄化センターの10分間雨量の時間変化を示す。このため、四つ倉川、多羅沢川等の支川では山麓一帯が河原となる異常な洪水が発生し、下流の河川沿い低地に大きな災害をもたらした。残念なことに異常な洪水流出であったため洪水ピーク付近の洪水水位は観測されなかったが、栃木県河川課の適切な判断により、臨時的洪水観測が行われ、貴重な後半の洪水水位が観測された。また、中余笹橋地点（流域面積133.4 km²）の洪水痕跡、流下断面等の調査が行われ、粗度係数を0.030および0.035とした場合の最大流量が1,911 m³/sおよび1,639 m³/sと算出された。これらは1 km²当たりの比流量（単位：m³/s/km²）に換算すると14.3および12.3と非常に大きな値となる。図20の中段は沓掛より上流域の7時間の移動平均降雨量および沓掛地点水位の時間変化を示したものである。この図からも分かるように7時間の移動平均降雨量波形は洪水後半のピーク付近の洪水波形と似たものとなっている。ここに、沓掛より上流域の流域平均降雨量は図19に示す1、2、3、4、5、6、7、8、12、19および38の位置の11地点の雨量データを表3に示す雨量荷重係数で荷重平均して求めた。これによると表2に示すように流域平均の最大時間雨量は47.7 mm（27日4時～5時）、最大3時間雨量は125.2 mm（27日2時～5時）および7時間の移動平均降雨量のピークは33.0 mm/h（27日0時～7時）、24.4 mm/h（27日13時～20時）、13.8 mm/h（29日23

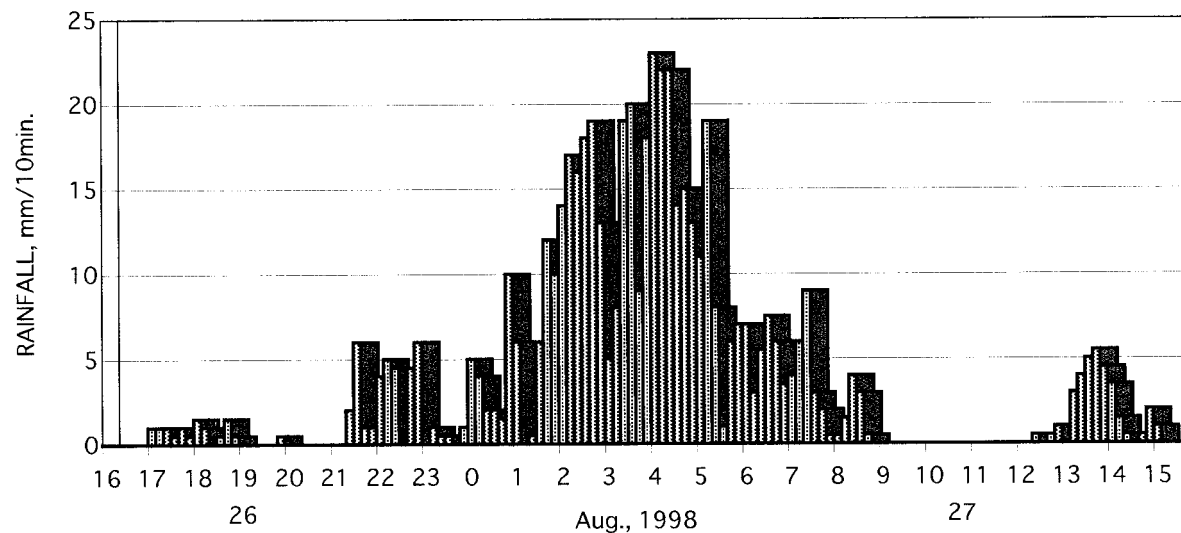


図23 那須町浄化センター10分間雨量
Fig. 23 Ten-minute rainfall at the purification center in Nasu Town.

時～30日6時）となっている。より詳細に沓掛地点の洪水水位を予測するため、図21の中央に示すタンクモデルと2.の水位・流量関係式を用いて計算を行った。計算は 項の黒川新田橋地点と同様な手法で行った。ここで、各計算流出量の遅れ時間と雨量荷重係数は表3に示す値を用いた。流域平均降雨量および水位予測結果を図22の中段に示す。ピーク付近の洪水の再現性は不明であるが、洪水の立ち上がりと後半の洪水波形は良く再現していると思われる。この地域のタンクモデルは 項の黒川新田橋地点のモデルと類似しているが大きく異なる点は第1段タンクで一番高い位置の流出穴は高さ280 mm、係数0.5に設定している。これは洪水痕跡調査から推定された非常に大きな洪水流量を再現しようとしたために設定したもので、流域の表層付近に平均して280 mmの雨水が蓄えられた状態では降雨の大部分が流出することを表現している。これは豪雨による異常洪水を予測するのに極めて重要なことであるが、このような異常洪水の詳細な観測データが乏しいため未だ明らかでなく、同様の事例解析を継続する必要がある。また、第1段タンクの下流の流出穴は80 mmの高さに設定しており、第1段タンクからは80 mm以上の雨水貯留がないと洪水流出が起らない構造になっている。これは難透水性基盤の上にローム、砂礫および未固結火砕層が黒川流域より厚く堆積しているためと思われるが詳しいことは分からない。第2段および第3段のタンクは黒川と同様に、これらから異常に多く流出するような係数の設定になっている。計算期間は 項と同様であり、最大時間流出高は22.2 mm/hと計算され、流域平均の総降雨量は920.7 mm、総流出高は867.0 mmである。これは降った雨の94%が7日間で流出したことを示す。この結果が妥当かどうかは正確な観測流量が得られていないので不明である。このことは以下の各地点の計算結果においても同様である。

那珂川上流本川黒磯地点の解析

那珂川上流の本川は標高1,800～1,900 mの那須火山の茶臼岳、朝日岳及び三本槍岳を水源とし、大佐飛山地を水源とする大川、木ノ俣川等の支川を合流して、那須野ヶ原台地と高久丘陵の境を南東方向に流れている。黒磯地点より上流域の表層地質は那須火山の南西斜面の火山性岩石・緑色凝灰岩地域および大佐飛山地の北側斜面の花崗岩地域と未固結の砂礫層、ローム層が堆積する山麓の丘陵および台地で構成されている。その流域面積は184.9 km²、分水界までの最大流路長は38 kmで、途中15 km地点に深山ダムがある。最長流路間の比高は1,500 mである。この地点の最高水位は4.42 mと記録されている。黒磯水位観測所では幸いにして洪水の全期間において水位観測データが得られており、これを基に那珂川黒磯地点より上流域の雨量と水位の関係性を調査した。図20の下段は黒磯上流域の7時間の移動平均降雨量および黒磯地点の水位の時間変化を示したものである。この図からも分かるように7時間の移動平均降雨量波形と洪水波形は類似したものとなっている。ここに、黒磯上流域の流域平均降雨量は図19に示す3、4、7、8、9、10、11および33の位置の8地点の雨量データを表3に示す雨量荷重係数で荷重平均して求めた。これによると表2に示すように流域平均の最大時間雨量は28.9 mm（27日4時～5時）、最大3時間雨量は79.8 mm（27日17時～20時）および7時間の移動平均降雨量のピークは20.3 mm/h（27日1時～8時）、19.3 mm/h（27日16時～23時）、16.7 mm/h（29日23時～30日6時）となっている。より詳細に新田橋地点の洪水水位を予測するため、図21の右端に示すタンクモデルと3.の水位・流量関係式を用いて計算を行った。計算は他と同様に図18に示す方式で行った。各計算流出量の遅れ時間と雨量荷重係数は表3に示す値を用いた。水位予測の結果は図22の下段に示すように3つのピーク波形を非常に良く再現している。この流域のタンクモデルは第1段タンクの下流の流出穴を高さ40 mm、係数0.015に、一番上の流出穴を高さ120 mm、係数0.2に設定している。これは流域の表層付近に平均して40 mm以上の雨水が貯留されると急激に

洪水流量が増し、さらに120 mmの雨水が蓄えられた状態では降雨の大部分が流出することを表現している。また、第2段および第3段から異常に多く流出するような係数の設定になっている。これは黒川および余笹川と同様、難透水性基盤の上に未固結の砂礫層、ローム層が堆積する地質構造によるものと思われるが詳しいことは分からない。計算期間は他と同様であり、最大時間流出高は14.2 mm/hと計算され、流域平均の総降雨量は790.4 mm、総流出高は757.8 mmと算出された。これは降った雨の実に96%が7日間で流出したことになる。

4.2 那珂川中流域の洪水

解析対象地点は貴重な洪水記録が得られている熊川大田原地点、蛇尾川大田原地点、箒川湯津上地点、荒川烏山地点、武茂川馬頭地点および那珂川本川小口地点とした。この地域の解析で得られた移動平均降雨量を図24に、試行錯誤により求めた各地のタンクモデルと仮想の水位・流量関係式を図25に、それらタンクモデルによる計算結果を図26-1および図26-2にそれぞれ示す。

熊川大田原地点の解析

熊川は標高1,754 mの大佐飛山地の黒滝山を水源とし、那須野ヶ原台地を南東方向に流れている。熊川大田原地点より上流域の表層地質は黒滝山の花崗岩地域と未固結の厚い砂礫層・火砕層の上にローム層が堆積する台地で構成されている。その流域面積は60 km²、分水界までの最大流路長は24 kmである。最長流路間の比高は1,520 mである。この地点の最高水位は1.28 mと記録されている。この地点より上流域の雨量と水位の移動平均降雨量解析から洪水波形に類似する移動平均降雨量波形の移動平均時間は15時間となった。これは流域面積が比較的小さいのに反して、洪水波形がなだらかで降雨に対する洪水の遅れ時間が大きいことを示しており、厚い砂礫層を有する流域の流出特性を現している。熊川大田原地点より上流域の15時間の移動平均降雨量および大田原地点の水位の時間変化を図24の上段左端に示した。ここに、流域平均降雨量は図19に示す7, 8, 13, 15, 33および34の位置の6地点の雨量データを表3に示す雨量荷重係数で荷重平均して求めた。これによると表2に示すように流域平均の最大時間雨量は59.3 mm (27日17時~18時)、最大3時間雨量は123.9 mm (27日17時~20時) および15時間の移動平均降雨量のピークは17.8 mm/h (27日12時~28日3時)、9.5 mm/h (29日18時~30日9時) となっている。より詳細に熊川大田原地点の洪水位を予測するため、図25の左端に示すタンクモデルと1.の水位・流量関係式を用いて計算を行った。計算は他と同様に図18に示す方式で行った。各計算流出量の遅れ時間と雨量荷重係数は表3に示す値を用いた。水位予測の結果は図26-1の上段に示すように2つのピーク波形を非常に良く再現している。ただし、8月30日12時から翌日31日の14時の間は推定流量の方が大きくなっているがその原因は不明である。この流域のタンクモデルは2段のタンクで構成されている。これは流域が厚い砂礫層に覆われた扇状地にあり、第3段タンクおよび第4段タンクからの流出が伏流してしまい河川に出ない現象を表現したためである。第1段タンクの下流出口を高さ60 mm、係数0.01に、2番目の流出穴を高さ100 mm、係数0.02に、3番目の流出穴を高さ140 mm、係数0.03にそれぞれ設定している。これは流域の表層付近に平均して60 mm以上の雨水が貯留されると急激に洪水流量が増し、さらに100~140 mmの雨水が蓄えられた状態では降雨の多くが流出することをモデルで表現したためである。また、第2段タンクの流出穴の高さは110 mmおよび190 mmに設定しており、第2段タンクに110 mm以上雨水が貯留されないとそこからの流出が無く、また、貯留量が190 mmの状態になると第2段タンクに入ってくる雨水は大部分流出するようになっている。これらは前述したように流域が厚い砂礫層に

覆われた地域の流出特性を現していると思われるがさらに詳しい調査が必要である。計算期間は他と同様であり、最大時間流出高は7.7 mm/hと計算され、流域平均の総降雨量は740.4 mm、総流出高は427.6 mmと算出された。これは降った雨の58%が7日間で流出したことになる。

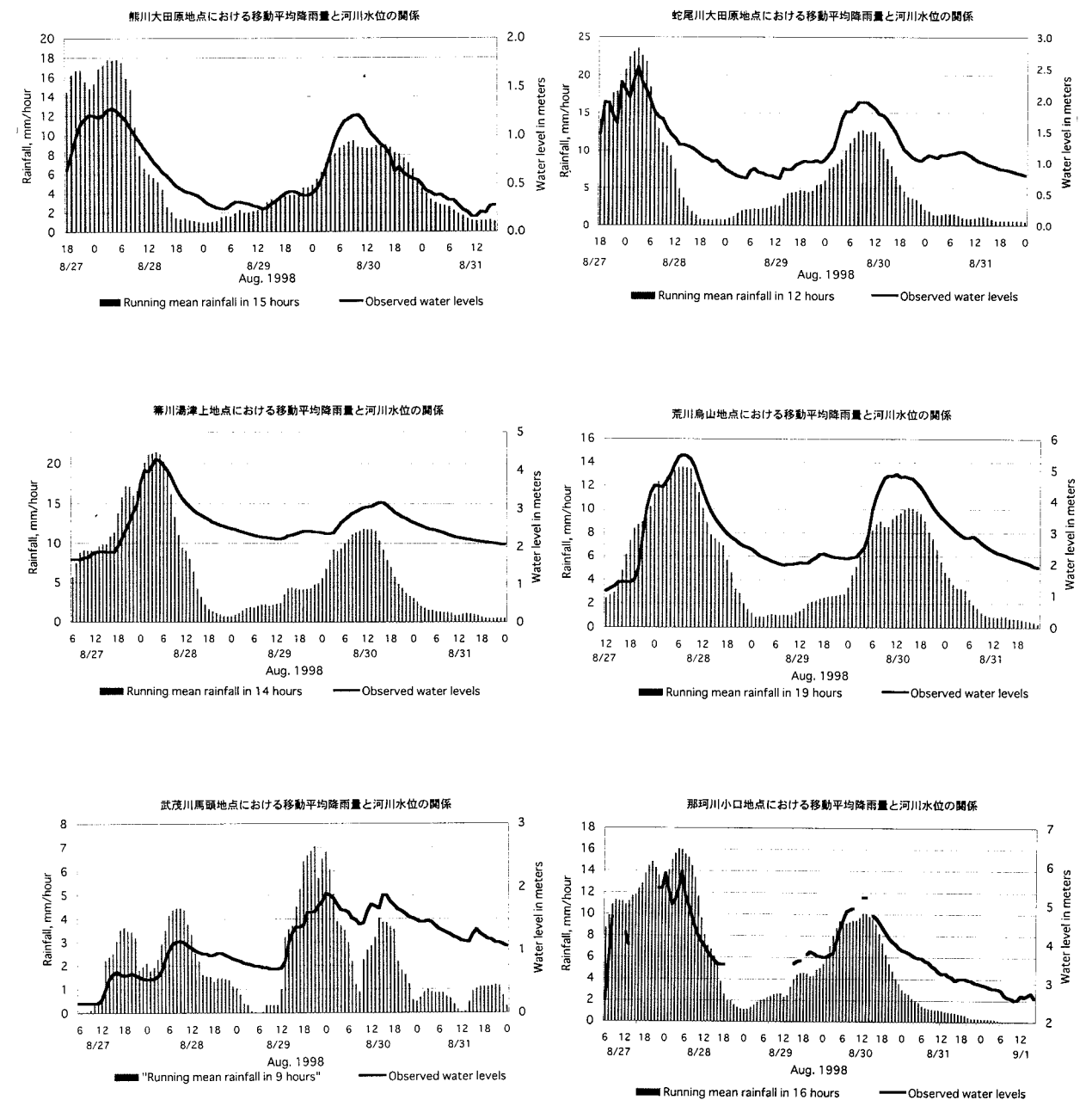
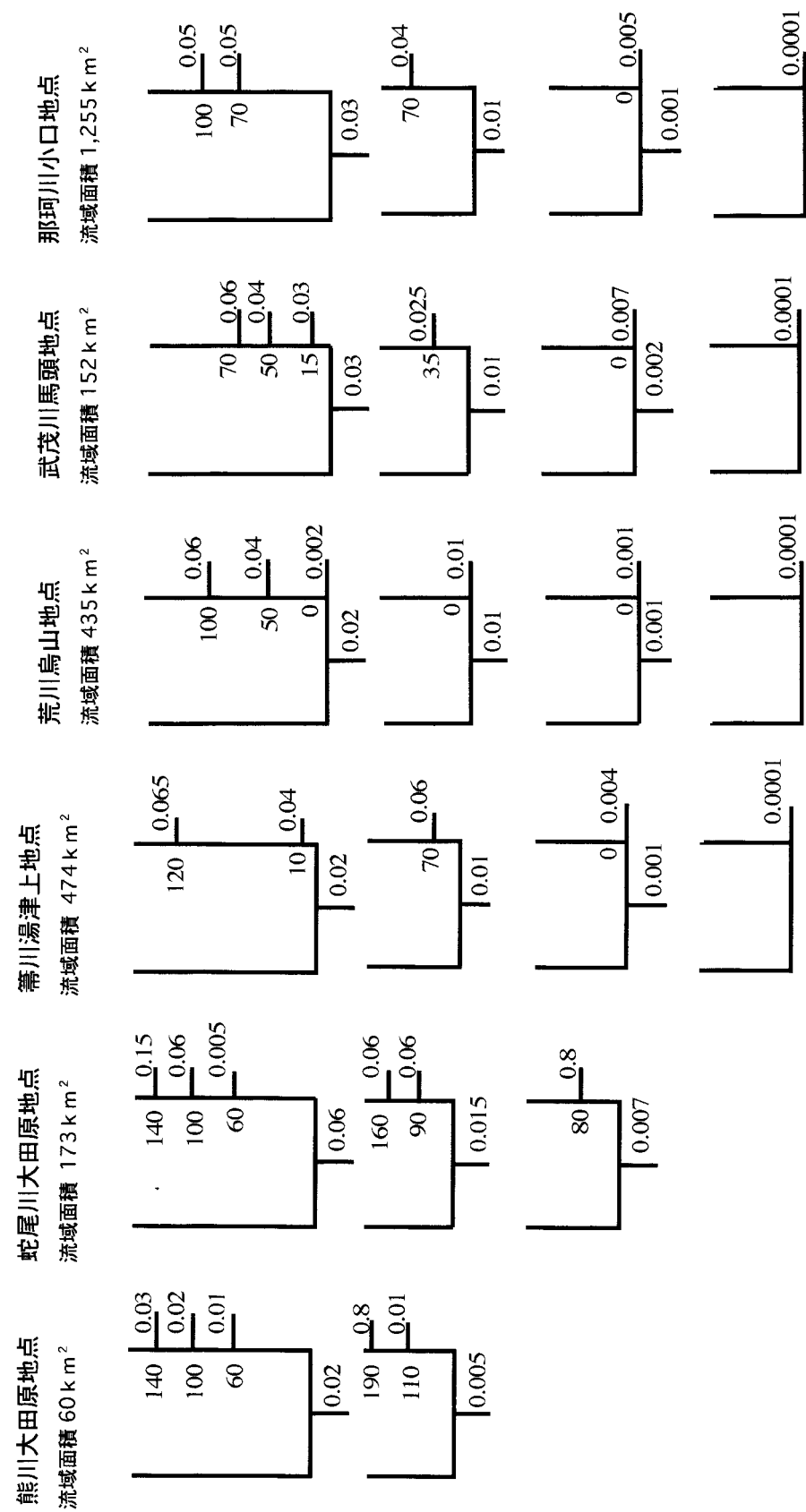


図24 那珂川中流域各地点の移動平均降雨量の時間変化
Fig. 24 The time change of moving average rainfall amounts comparing observed river water levels in the middle section of the Nakagawa River basin.



使用した仮想水位流量関係式

- 熊川大田原地点 $Q=40 \times (H+0.5)^2$
- 蛇尾川大田原地点 $Q=65 \times (H+0.5)^2$
- 箒川湯津上地点 $Q=160 \times (H-0.9)^2$
- 荒川烏山地点 $Q=39 \times H^2$
- 武茂川馬頭地点 $Q=40 \times H^2$
- 那珂川小口地点 $Q=162 \times (H-1.1)^2$

図25 那珂川中流域各地点のタンクモデルおよび仮想水位流量関係式
 Fig. 25 Tank Models for flood run-off simulations and functions representing the virtual relation between river discharge and water level in the middle section of the Nakagawa River basin.

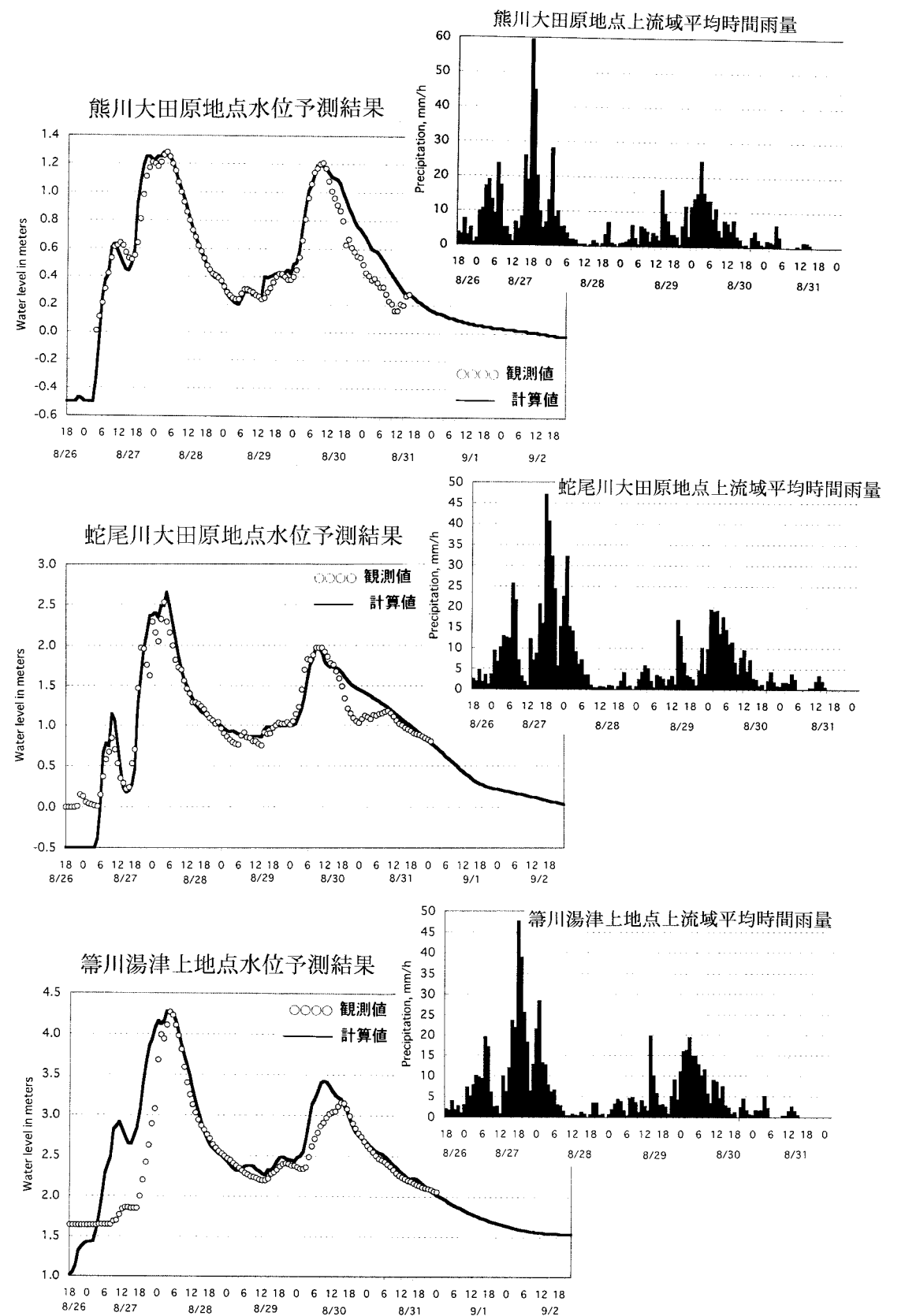


図26-1 タンクモデルによる那珂川中流域の河川水位予測結果(1)および流域平均雨量
 Fig. 26-1 Results of flood run-off simulation (1) using the Tank Model in the middle section of the Nakagawa River basin with hourly averaged areal rainfall shown in the upper right hand corner.

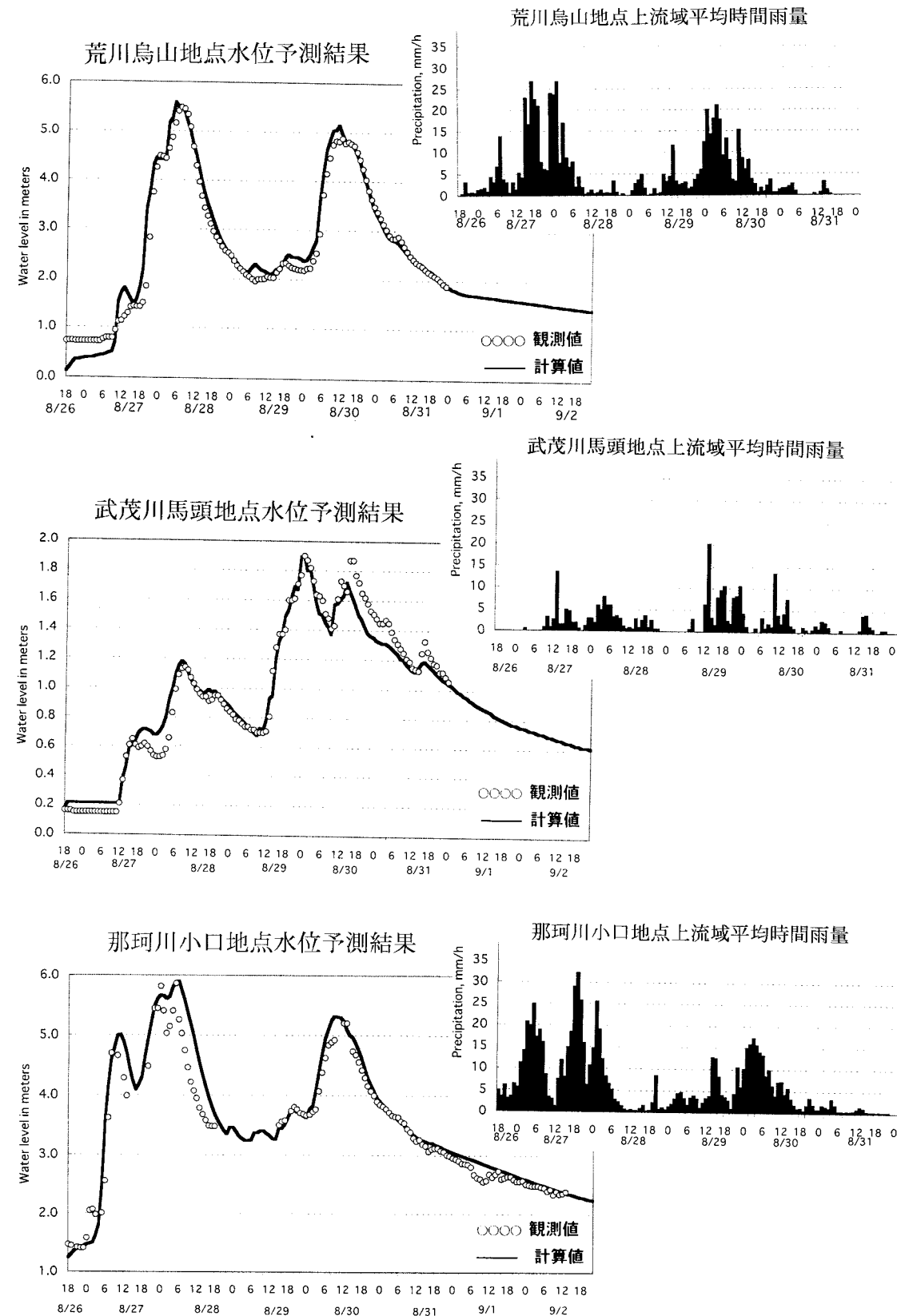


図26-2 タンクモデルによる那珂川中流域の河川水位予測結果(2)および流域平均雨量
 Fig. 26-2 Results of flood run-off simulation (2) using the Tank Model in the middle section of the Nakagawa River basin with hourly averaged areal rainfall shown in the upper right hand corner.

蛇尾川大田原地点の解析

蛇尾川は標高1,800 ~ 1,900 mの大佐飛山地の大佐飛山, 鹿ノ又岳および日留賀岳を水源とし, 那須野ヶ原台地を南東方向に流れている。蛇尾川大田原地点より上流域の表層地質は大佐飛山地の花崗岩・火山性岩石地域と未固結の厚い砂礫層・火砕層の上にローム層が堆積する台地で構成されている。その流域面積は熊川流域を含む173 km²であり, 分水界までの最大流路長は35 kmである。最長流路間の比高は1,520 mである。この地点の最高水位は2.53 mと記録されている。この地点より上流域の雨量と水位の移動平均降雨量解析から洪水波形に類似する移動平均降雨量波形の移動平均時間は12時間となった。この流域も熊川流域ほどではないが, 流域面積が比較的小さいのに反して, 洪水波形がなだらかで降雨に対する洪水の遅れ時間が比較的大きいことを示しており, 厚い砂礫層を有する流域の流出特性を現している。蛇尾川大田原地点より上流域の12時間の移動平均降雨量および大田原地点の水位の時間変化を図24の上段右端に示した。ここに, 流域平均降雨量は図19に示す7, 8, 13, 14, 15, 30, 32および33の位置の8地点の雨量データを表3に示す雨量荷重係数で荷重平均して求めた。これによると表2に示すように流域平均の最大時間雨量は46.8 mm (27日17時~18時), 最大3時間雨量は119.2 mm (27日17時~20時)および12時間の移動平均降雨量のピークは23.6 mm/h (27日15時~28日3時), 12.7 mm/h (29日21時~30日9時)となっている。より詳細に蛇尾川大田原地点の洪水位を予測するため, 図25の左から2つ目に示すタンクモデルと2.の水位・流量関係式を用いて計算を行った。計算は他と同様に図18に示す方式で行った。各計算流出量の遅れ時間と雨量荷重係数は表3に示す値を用いた。水位予測の結果は図26-1の中段に示すように3つのピーク波形を非常に良く再現している。ただし, 8月30日17時から翌日31日8時の間, 推定流量の方が大きくなっているがその原因は不明である。この流域のタンクモデルは3段のタンクで構成されている。これは蛇尾川流域が熊川流域より下流域を含み相対的に伏流量が少ないと思われたためである。第1段タンクおよび第2段タンクの構造は熊川流域の場合とほぼ同様であり, 第1段タンクは60 mm以上の雨水が貯留されると急激に洪水流量が増し, さらに140 mmの雨水が蓄えられた状態では流入する降雨の多くが流出するようになっている。また, 第2段タンクは90 mm以上雨水が貯留されないとそこからの流出が無く, 貯留量が160 mmの状態になると流入する雨水の大部分が流出するようになっている。これらは前述したように流域が厚い砂礫層に覆われた地域の流出特性を現していると思われるがさらに詳しい調査が必要である。計算期間は他と同様であり, 最大時間流出高は13.4 mm/hと計算され, 流域平均の総降雨量は787.5 mm, 総流出高は572.1 mmと算出された。これは降った雨の73%が7日間で流出したことになる。

篤川湯津上地点の解析

篤川は標高1,800 ~ 1,850 mの大佐飛山地の日留賀岳および高原山を水源とし, 那須野ヶ原台地の南端を南東方向に流れている。篤川湯津上地点より上流域の表層地質は山地の火山性岩石・緑色凝灰岩・未固結~固結の堆積岩地域と未固結の厚い砂礫層・火砕層の上にローム層が堆積する台地で構成されている。その流域面積は熊川, 蛇尾川等の支川流域を含む474 km², 分水界までの最大流路長は55kmである。最長流路間の比高は1,640mである。この地点の最高水位は4.27 mと記録されている。この地点より上流域の雨量と水位の移動平均降雨量解析から洪水波形に類似する移動平均降雨量波形の移動平均時間は14時間となった。篤川湯津上地点より上流域の14時間の移動平均降雨量および湯津上地点の水位の時間変化を図24の中段左端に示した。ここに, 流域平均降雨量は図19に示す7, 8, 13, 14, 15, 16, 30, 32および33の位置の9地点の雨量データを表3に示す雨量荷重係数で荷

重平均して求めた．これによると表 2 に示すように流域平均の最大時間雨量は 46.1 mm (27 日 17 時～18 時)，最大 3 時間雨量は 117.8 mm (27 日 17 時～20 時) および 14 時間の移動平均降雨量のピークは 21.4 mm/h (27 日 14 時～28 日 4 時)，11.8 mm/h (29 日 21 時～30 日 11 時) となっている．より詳細に箒川湯津上地点の洪水位を予測するため，図 25 の左から 3 つ目に示すタンクモデルと 3. の水位・流量関係式を用いて計算を行った．計算は他と同様に図 18 に示す方式で行った．各計算流出量の遅れ時間と雨量荷重係数は表 3 に示す値を用いた．水位予測の結果は図 26- 1 の下段に示すように 2 つのピーク波形の立ち上がり部分の推定値が大きくなっており，洪水の再現性は悪い．この原因については不明であり，ダム等の操作も考慮して検討する必要がある．この流域のタンクモデルはこの流域が流出の伏流効果を持つ熊川流域および蛇尾川流域を含むが，扇状地末端の湧泉地帯を含むことから流出の伏流効果を表現する構造にはなっていない．第 1 段タンクの上の流出穴を高さ 120 mm，係数 0.065 に設定しており，タンクに 120 mm の雨水が蓄えられた状態では流入する雨水の多くが流出するようになっている．また，第 2 段および 3 段タンクからは那珂川上流域ほどではないが比較的多く流出するようになっている．これらは難透水性基盤の上に厚い砂礫層がある地域の流出特性を現していると思われるがさらに詳しい調査が必要である．計算期間は他と同様であり，最大時間流出高は 13.9 mm/h と計算され，流域平均の総降雨量は 784.4 mm，総流出高は 598.7 mm と算出された．これは降った雨の 76 % が 7 日間で流出したことになる．

荒川烏山地点の解析

荒川は標高 1,795 m の高原山の釈迦岳を水源とし，高原山火山麓，塩那丘陵を南東方向に流れている．荒川烏山地点より上流域の表層地質は高原山の火山性岩石・花崗岩地域，高原山火山麓および塩那丘陵の西部地域の火砕岩・砂礫層の上にローム層が堆積する丘陵および塩那丘陵の東部地域の洪積世砂礫層の上にローム層が堆積する地域で構成されている．その流域面積は内川，江川等の支川を含む 435 km² であり，分水界までの最大流路長は 61 km である．最長流路間の比高は 1,740 m である．この地点の最高水位は 5.48 m と記録されている．この地点より上流域の雨量と水位の移動平均降雨量解析から洪水波形に類似する移動平均降雨量波形の移動平均時間は 19 時間となった．これはこの流域が 項の箒川より流域面積がやや小さいにも拘わらず，洪水波形が箒川よりなだらかで降雨に対する洪水の遅れ時間が大きいことを示している．荒川烏山地点より上流域の 19 時間の移動平均降雨量および大田原地点の水位の時間変化を図 24 の中段右端に示した．ここに，流域平均降雨量は図 19 に示す 14，16，24，25，31，35 および 36 の位置の 7 地点の雨量データを表 3 に示す雨量荷重係数で荷重平均して求めた．これによると表 2 に示すように流域平均の最大時間雨量は 26.6 mm (27 日 16 時～17 時)，最大 3 時間雨量は 73.8 mm (27 日 22 時～28 日 1 時) および 19 時間の移動平均降雨量のピークは 13.6 mm/h (27 日 12 時～28 日 7 時)，10.1 mm/h (27 日 20 時～30 日 15 時) となっている．より詳細に荒川烏山地点の洪水位を予測するため，図 25 の右から 3 つ目に示すタンクモデルと 4. の水位・流量関係式を用いて計算を行った．計算は他と同様に図 18 に示す方式で行った．各計算流出量の遅れ時間と雨量荷重係数は表 3 に示す値を用いた．水位予測の結果は図 26- 2 の上段に示すように 2 つのピーク波形を非常に良く再現している．この流域のタンクモデルは特徴のない一般的なモデルであり，敢えて特徴を挙げると，第 1 段タンクでは雨水が 50 mm 貯留するまでほとんど流出がない構造になっていることである．これは未固結の厚い火砕岩・砂礫層がある地域の流出特性を現していると思われる．計算期間は他と同様であり，最大時間流出高は 10.0 mm/h と計算され，流域平均の総降雨量は 586.6 mm，総流出高は 440.8 mm と算出された．これは降った雨の 75 % が 7 日間で流出

したことになる．

武茂川馬頭地点の解析

武茂川は標高 500～1,000 m の八溝山地の八溝山，花瓶山，尺丈山を水源域とし，八溝山地の山麓を南方向に流れている．武茂川馬頭地点より上流域の表層地質は花崗岩を一部含む中新世～古生代の堆積岩で構成されている．その流域面積は 152 km²，分水界までの最大流路長は 32 km である．最長流路間の比高は 830 m である．この地点の最高水位は 1.9 m と記録されている．この地点より上流域の雨量と水位の移動平均降雨量解析から洪水波形に類似する移動平均降雨量波形の移動平均時間は 9 時間となった．これは流域面積の大きい余笹川沓掛地点および那珂川黒磯地点上流域より大きな値となっているが，豪雨による大きな洪水が発生しなかったために洪水の流下速度が速くならなかったためと思われる．武茂川馬頭地点より上流域の 9 時間の移動平均降雨量および馬頭地点の水位の時間変化を図 24 の下段左に示した．ここに，流域平均降雨量は図 19 に示す 19，26 および 29 の位置の 3 地点の雨量データを表 3 に示す雨量荷重係数で荷重平均して求めた．これによると表 2 に示すように流域平均の最大時間雨量は 20.0 mm (29 日 12 時～13 時)，最大 3 時間雨量は 27.5 mm/h (29 日 11 時～14 時) および 9 時間の移動平均降雨量のピークは 7.0 mm/h (29 日 12 時～21 時)，4.0 mm/h (30 日 5 時～14 時) となっている．より詳細に武茂川馬頭地点の洪水位を予測するため，図 25 の右から 2 つ目に示すタンクモデルと 5. の水位・流量関係式を用いて計算を行った．計算は他と同様に図 18 に示す方式で行った．各計算流出量の遅れ時間と雨量荷重係数は表 3 に示す値を用いた．水位予測の結果は図 26- 2 の中段に示すように幾つものピーク波形を良く再現している．ただし，8 月 30 日 14 時以降の 2 つのピークの再現性は良くないがその原因は不明である．この流域のタンクモデルも特徴のない一般的なモデルであり，敢えて特徴を挙げると，第 2 段タンクおよび第 3 段タンクからの流出が少し多くなるような構造になっている．計算期間は他と同様であり，最大時間流出高は 3.4 mm/h と計算され，流域平均の総降雨量は 251.7 mm，総流出高は 173.0 mm と算出された．これは降った雨の 69 % が 7 日間で流出したことになる．

那珂川本川小口地点の解析

那珂川本川小口地点は箒川の合流点下流にあり，その流域面積は 1,255 km²，分水界までの最大流路長は 69 km である．最長流路間の比高は 1,670 m である．この地点の最高水位は 5.87 m と記録されている．流域面積 1,255 km² の流域で移動平均降雨量解析を行うことにどれほどの意味があるか不明であるが降雨と洪水流量の関係の概略を把握する目的で解析を行った．その結果，洪水波形に類似する移動平均降雨量波形の移動平均時間は 16 時間となった．那珂川小口地点より上流域の 16 時間の移動平均降雨量および小口地点の水位の時間変化を図 24 の下段右端に示した．ここに，流域平均降雨量は表 3 に示す 24 地点の雨量データを同表に示す雨量荷重係数で荷重平均して求めた．使用した雨量観測点の位置は図 19 に示している．那珂川小口地点より上流域の流域平均の最大時間雨量は 32.0 mm/h (27 日 18 時～19 時)，最大 3 時間雨量は 86.4 mm/h (27 日 17 時～20 時) および 16 時間の移動平均降雨量のピークは 16.1 mm (27 日 12 時～28 日 4 時)，10.0 mm (29 日 20 時～30 日 12 時) となっている．より詳細に那珂川小口地点の洪水位を予測するため，図 25 の右端に示すタンクモデルと水位・流量関係式を用いて計算を行った．計算は他と同様に図 18 に示す方式で行った．各計算流出量の遅れ時間と雨量荷重係数は表 3 に示す値を用いた．水位予測の結果は図 26- 2 の下段に示すように 3 つのピーク波形を良く再現している．この流域のタンクモデルの第 1 段タンクの下流の流出穴の高さが 70 mm となっており，このタンクに雨水が 70 mm 以上貯留されないと流出が発生しない構造とな

っている．同様に第2段タンクの流出穴の高さも70 mmとなっており，このタンクに雨水が70 mm以上貯留されないと流出が発生しない構造となっている．また，第2段タンクおよび第3段タンクから流出が多く発生するような構造になっており，難透水性基盤の上にローム，砂礫および未固結火砕層が厚く堆積している流域の流出特性を表現したものと思われるが詳しい調査が必要である．計算期間は他と同様であり，最大時間流出高は10.7 mm/hと計算され，流域平均の総降雨量は762.5mm，総流出高は583.4mmと算出された．これは降った雨の77%が7日間で流出したことになる．

4.3 那珂川下流域の洪水解析

対象地点は貴重な洪水記録が得られている那珂川本川の野口地点および水府橋地点とした．この地域の解析で得られた移動平均降雨量を図27に，試行錯誤により求めた各地のタンクモデルと仮想の水位・流量関係式を図28に，それらタンクモデルによる計算結果を図29にそれぞれ示す．

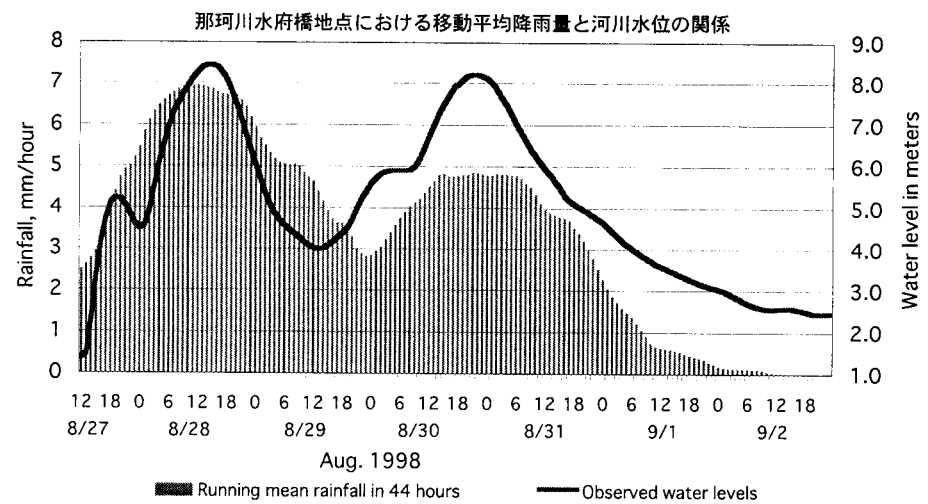
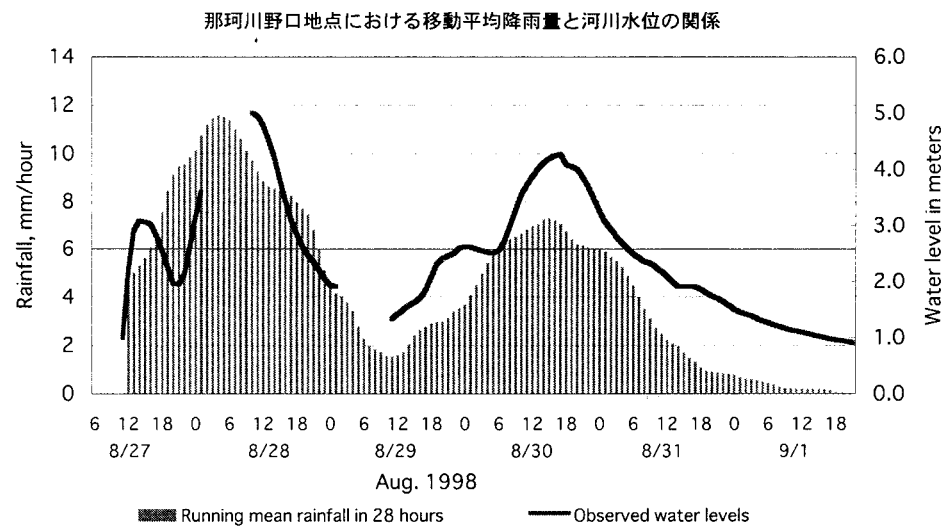
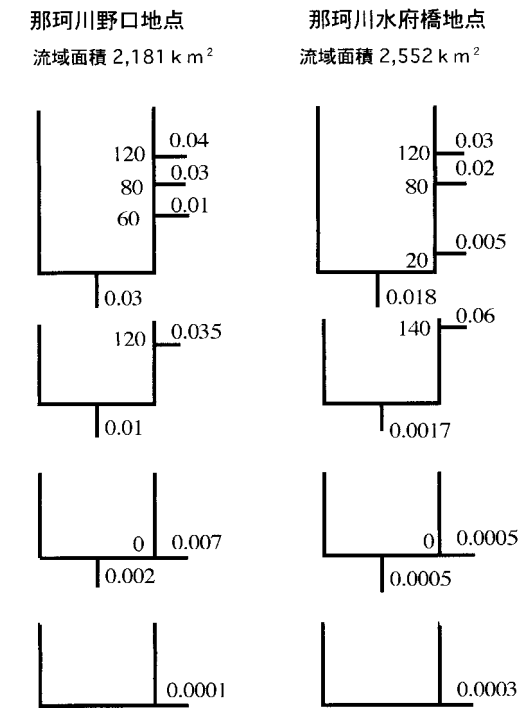


図27 那珂川本川下流部各地点の移動平均降雨量の時間変化
Fig. 27 The time change of moving average rainfall amounts comparing observed river water levels in the lower section of the Nakagawa River basin.



- 使用した仮想水位流量関係式
1. 那珂川野口地点 $Q=90.52 \times (H+1.73)^2$
 2. 那珂川水府橋地点 $Q=39.8 \times (H+1.23)^2$

図28 那珂川本川下流部各地点のタンクモデルおよび仮想水位流量関係式
Fig. 28 Tank Models for flood run-off simulations and functions representing the virtual relation between river discharge and water level in the lower section of the Nakagawa River basin.

那珂川本川野口地点の解析

那珂川本川野口地点は小口地点より下流44 kmの位置にあり，その流域面積は武茂川および荒川流域を含む2,181 km²，分水界までの最大流路長は113 kmである．最長流路間の比高は1,750 mである．この地点の最高水位は5.05 mと記録されている．この流域についても流域面が2,181 km²であり，移動平均降雨量解析を行うことにどれほどの意味があるか不明であるが降雨と洪水流量の関係の概略を把握する目的で解析を行った．その結果，洪水波形に類似する移動平均降雨量波形の移動平均時間は28時間となった．那珂川野口地点より上流域の28時間の移動平均降雨量および野口地点の水位の時間変化を図27の上段に示した．ここに，流域平均降雨量は表3に示す34地点の雨量データを同表に示す雨量荷重係数で荷重平均して求めた．使用した雨量観測点の位置は図19に示している．那珂川野口地点より上流域の流域平均の最大時間雨量は25.2 mm (27日18時～19時)，最大3時間雨量は67.0 mm (27日17時～20時)および28時間の移動平均降雨量のピークは11.6 mm/h (27日0時～28日4時)，7.3 mm/h (29日11時～30日15時)となっている．より詳細に那珂川野口地点の洪水位を予測するため，図28の左端に示すタンクモデルと1.の水位・流量関係式を用いて計算を行った．計算は他と同様に図18に示す方式で行った．各計算流出量の遅れ時間と雨量荷重係数は表3に示す値を用いた．水位予測の結果は図29の上段に示すように3つのピーク波形を良く再現している．この流

域のタンクモデルは小口地点のそれと類似しており、第1段タンクの下流の流出穴の高さが60 mm、第2段タンクの流出穴の高さは120 mmとなっている。また、第2段タンクおよび第3段タンクから流出が多く発生するような構造になっている。これは難透水性基盤の上にローム、砂礫および未固結火砕層が厚く堆積している地域を多く含む上・中流域の流出特性を表現したものである。計算期間は他と同様であり、最大時間流出高は6.7 mm/hと計算され、流域平均の総降雨量は637.7 mm、総流出高は403.8 mmと算出された。これは降った雨の63%が7日間で流出したことになる。

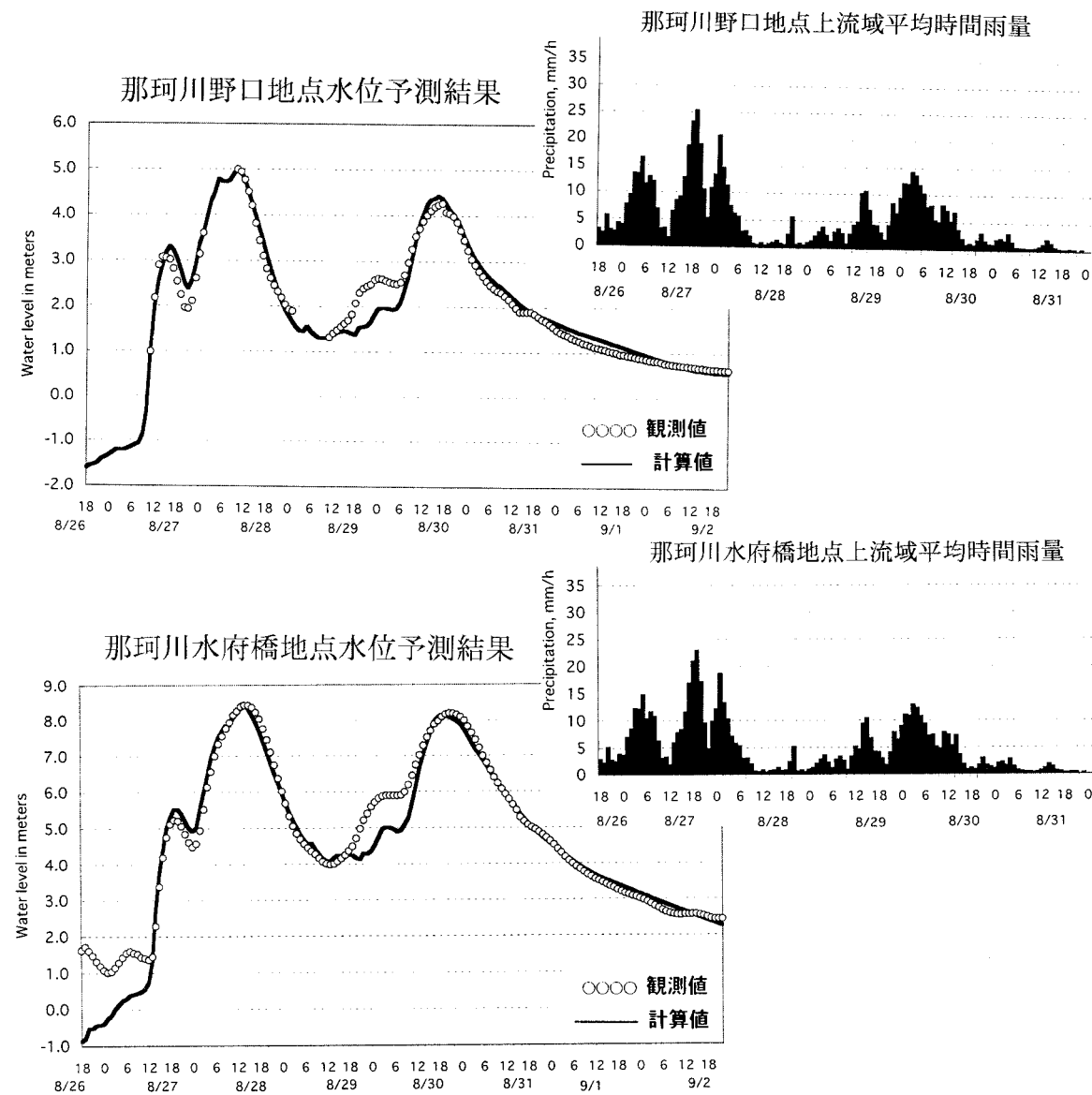


図29 タンクモデルによる那珂川本川下流部の河川水位予測結果および流域平均雨量
 Fig. 29 Results of flood run-off simulation using the Tank Model in the lower section of the Nakagawa River basin with hourly averaged areal rainfall shown in the upper right hand corner.

那珂川本川水府橋地点の解析

那珂川本川水府橋地点は野口地点より下流26 kmの位置にあり、その流域面積は鶏足山地および丘陵の藤井川等の支川を含む2,552 km²、分水界までの最大流路長は139 kmである。最長流路間の比高は1,770 mである。この地点の最高水位は8.43 mと記録されている。この流域についても流域面積が2,552 km²であり、移動平均降雨量解析を行うことにどれほどの意味があるか不明であるが降雨と洪水流量の関係の概略を把握する目的で解析を行った。その結果、洪水波形に類似する移動平均降雨量波形の移動平均時間は44時間と非常に長い値となった。那珂川水府橋地点より上流域の44時間の移動平均降雨量および水府橋地点の水位の時間変化を図27の下段に示した。ここに、流域平均降雨量は表3に示す38地点の雨量データを同表に示す雨量荷重係数で荷重平均して求めた。使用した雨量観測点の位置は図19に示している。那珂川野口地点より上流域の流域平均の最大時間雨量は20.4 mm (27日18時~19時)、最大3時間雨量は54.3 mm (27日17時~20時)および44時間の移動平均降雨量のピークは6.9 mm/h (26日16時~28日12時)、4.8 mm/h (29日1時~30日21時)となっている。より詳細に那珂川水府橋地点の洪水位を予測するため、図28の右端に示すタンクモデルと2.の水位・流量関係式を用いて計算を行った。計算は他と同様に図18に示す方式で行った。各計算流出量の遅れ時間と雨量荷重係数は表3に示す値を用いた。水位予測の結果は図29の下段に示すように3つのピーク波形を良く再現している。この流域のタンクモデルも小口地点のそれと類似しており、第1段タンクの下流の流出穴の高さが20 mm、第2段タンクの流出穴の高さは140 mmとなっている。また、第2段タンクおよび第3段タンクから流出が多く発生するような構造になっている。これは野口地点の場合と同様に難透水性基盤の上にローム、砂礫および未固結火砕層が厚く堆積している地域を多く含む上・中流域の流出特性の影響をまだ現しているものと思われる。計算期間は他と同様であり、最大時間流出高は5.3 mm/hと計算され、流域平均の総降雨量は552.0 mm、総流出高は377.5 mmと算出された。これは降った雨の68%が7日間で流出したことになる。

5. まとめ

8月26日夕方から30日の午前に掛けて豪雨が断続的に降り、那珂川流域で大きな洪水災害が起こった。特に、那珂川上流域は最大時間雨量90~100 mm、最大3時間雨量200~280 mmの記録的な集中豪雨に襲われ、河川沿いの住民や家屋が流失する痛ましい災害が発生した。ここではこれら一連の豪雨による那珂川流域各地の洪水流出状況を述べると共に、降雨と河川水位との関係解析およびタンクモデルによる各地の洪水解析を行い、洪水流出と豪雨および流域の地形・地質との関連性について考察した。各水位観測地点で計算された最大流出高および7日間の総流出高は表4に取りまとめている。

那珂川上流域の黒川新田橋、余笹川沓掛および那珂川本川黒磯の解析から、流域内の各地の降雨量を7~8時間で移動平均すると、その時間変化は河川の洪水波形と類似のものになった。タンクモデルによる解析からこの地域では雨水があまり地下に浸透しない流出特性を示すことが分かった。このモデルは凝灰岩等の難透水性の地質に覆われた地域を反映した構造となった。モデル計算の結果から黒川および余笹川で流域平均の最大時間雨量が45~48 mm、最大3時間雨量が115~125 mmであったのに対して最大時間流出高は22 mm/hと計算され、那珂川本川黒磯では最大時間雨量が29 mm、最大3時間雨量が80 mmであったのに対して最大時間流出高は15 mm/hと計算された。これら那珂川上流域では総降雨量に対する総流出高の比は7日間で実に94~97%と計算された。

那珂川中流域の熊川大田原，蛇尾川大田原および箒川湯津上の解析から流域内の各地の降雨量を12～15時間で移動平均すると，その時間変化は河川の洪水波形と類似のものになった．タンクモデルによる解析から雨水の大部分が扇央部では伏流し，扇端付近で湧泉する地域であることが分かった．このモデルは厚い砂礫層に覆われた扇状地上の河川を反映した構造となった．モデル計算の結果から各流域で流域平均の最大時間雨量が47～59 mm，最大3時間雨量が119～124 mmであったのに対して最大時間流出高は熊川で8 mm/h，蛇尾川で12 mm/hおよび箒川で14 mm/hと計算された．7日間の総降雨量に対する総流出高の比は熊川で58%，蛇尾川で73%および箒川で76%と計算された．

箒川の南側を流れる荒川の烏山地点および八溝山の西側斜面を流れる武茂川の馬頭地点の解析では各地の降雨量をそれぞれ19時間および9時間で移動平均すると，その時間変化は河川の洪水波形と類似のものになった．これは流域面積及び最大流路長に比してやや大きい値となった．タンクモデルによる解析から荒川では未固結の厚い火砕岩・砂礫層がある地域の流出特性が得られ，武茂川では一般的な堆積岩地域の流出特性が得られた．モデル計算の結果から荒川では流域平均の最大時間雨量が27 mm，最大3時間雨量が74 mmであったのに対して最大流出高は10 mm/hと計算され，武茂川では流域平均の最大時間雨量が20 mm，最大3時間雨量が28 mmであったのに対して最大時間流出高は3.4 mm/hと計算された．7日間の総降雨量に対する総流出高の比は荒川で75%，武茂川で69%と計算された．

表4 タンクモデルにより計算された那珂川流域の各水位観測地点の最大流出高および7日間の総流出高

Table 4 Largest calculated run-off rate and total run-off rate over a 7 day period at each water level station in the Nakagawa River basin.

解析対象地点	流域面積	流域平均総雨量	流域平均最大時間雨量	タンクモデルによる7日間の推定結果		
				最大時間流出高	7日の総流出高	流出率
黒川新田橋	km ² 96	mm 902.1	mm/h 44.9	mm/h 22.3	mm/7 days 876.2	% 97
余笹川沓掛	325	920.7	47.7	22.2	867.0	94
那珂川黒磯	185	790.4	28.9	14.2	757.8	96
熊川大田原	60	740.4	59.3	7.7	427.6	58
蛇尾川大田原	173	787.5	46.8	13.4	572.1	73
箒川湯津上	474	784.4	46.1	13.9	598.7	76
武茂川馬頭	152	251.7	20.0	3.4	173.0	69
荒川烏山	435	586.6	26.6	10.0	440.8	75
那珂川小口	1,255	762.5	32.0	10.7	583.4	77
那珂川野口	2,181	637.7	25.2	6.7	403.8	63
那珂川水府橋	2,552	552.0	20.4	5.3	377.5	68

那珂川本川の中・下流部の小口，野口および水府橋では各地の降雨量をそれぞれ16時間，28時間および44時間で移動平均すると，その時間変化は河川の洪水波形と類似のものになった．タンクモデルによる解析から難透水性基盤の上にローム，砂礫および未固結火砕層が厚く堆積している地域を多く含む上・中流域の流出特性を反映したモデルが得られた．モデル計算の結果から小口地点では流域平均の最大時間雨量が32 mm，最大3時間雨量が86 mmであったのに対して最大時間流出高は11 mm/h，野口地点では流域平均の最大時間雨量が25 mm，最大3時間雨量が67 mmであったのに対して最大時間流出高は6.7 mm/h，水府橋地点では流域平均の最大時間雨量が20 mm，最大3時間雨量が54 mmであったのに対して最大時間流出高は5.3 mm/hとそれぞれ計算された．7日間の総降雨量に対する総流出高の比は小口地点で77%，野口地点で63%および水府橋地点で68%と計算された．

今回の災害では那珂川上流域を記録的な集中豪雨が襲った．このような豪雨に対して中小河川の洪水予測を行うには約17 km間隔のアメダス観測網だけでは不十分であるが，幸いにも，那珂川流域には気象台，工事事務所，県建設事務所等で行っている高密度の観測点があり，ここではこれら高密度の観測データを用いて，タンクモデルで各地の河川水位の推定を行った．結果は良好であり，局地的な豪雨がもたらす洪水流出を計算するには密な観測網の雨量データが必要なことを示した．これら成果が降雨に対する洪水流出についての理解を深め，中小河川の洪水監視のための密な雨量観測網整備の参考となれば幸いである．終わりに，本調査に際して，貴重なお話を聞かせていただき，また，多くの災害に関する資料を提供して戴いた関東地方整備局常陸工事事務所，茨城県消防防災課，同河川課，宇都宮地方気象台，栃木県消防防災課，同河川課，黒磯市，那須町，黒羽町の方々に深く感謝致します．

参考文献

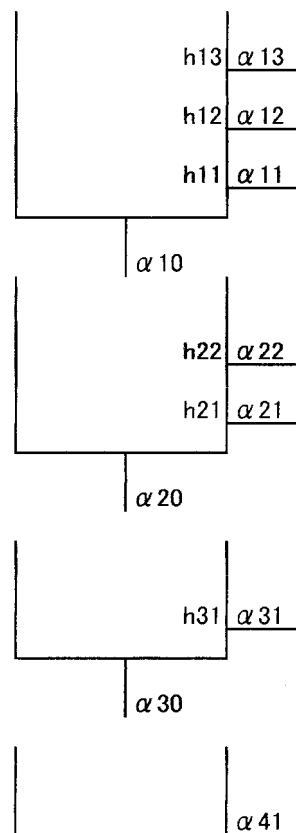
- 1) 防災科学技術研究所(1999): 1998年8月4日新潟地方豪雨災害調査報告．主要災害調査，No. 36．129pp．
- 2) 関東地方建設局常陸工事事務所(1988): 常陸五十年史，856pp．
- 3) 関東地方建設局常陸工事事務所:(1998): 平成10年8月末豪雨による那珂川流域の浸水実績．
- 4) 経済企画庁総合開発局(1972): 土地利用分類図(福島県)．
- 5) 経済企画庁総合開発局(1973): 土地利用分類図(茨城県)．
- 6) 経済企画庁総合開発局(1974): 土地利用分類図(栃木県)．
- 7) 木下武雄(1984): 到達時間流出率による合理式流出係数の検討．国立防災科学技術センター研究報告，No. 33，1-14．
- 8) 国立防災科学技術センター(1987): 1986年8月5日台風10号の豪雨による関東・東北地方の水害調査報告，主要災害調査，No. 27，155pp．
- 9) 黒磯那須消防組合(1998): 平成10年8月末豪雨による災害概要報告，23pp．
- 10) 真野明ら(1999): 1998年東北・北関東の集中豪雨災害に関する調査研究，258pp．
- 11) 水戸地方気象台(1998): -平成10年8月26日から31日にかけての前線による大雨と農業災害-．茨城県農業気象災害速報，16pp．
- 12) 中根和郎(1985): 昭和58年7月山陰豪雨時の洪水流出の特徴．国立防災科学技術センター研究報告，No. 34，1-12．
- 13) 日本河川協会(1977): 建設省河川砂防技術基準-計画編-．山海堂，228pp．

14) 菅原正巳 (1972): 流出解析法. 共立出版, 257pp.

15) 筑波大学工学部都市システム工学科広域水圏環境科学教育研究センター (1998): 平成10年8月
那珂川水害緊急調査報告書, 129pp.

参考資料: タンクモデルの計算事例

タンクモデルの一般的な事例として, 補足図1の直列4段タンクモデルの計算例を示す. 各タンクを上から第1段タンク, 第2段タンク, 第3段タンク及び第4段タンクと呼ぶ. 各タンクの側壁の内側にある $h_{13} \sim h_{31}$ は側壁にある流出穴の底からの高さを示し, mm単位で表される定数である. また, 各タンクの側壁の外側にある $\alpha_{10} \sim \alpha_{41}$ は側壁の流出穴から流出する雨水量の割合を示す定数である. 計算ステップは1時間単位とし, 計算の初期条件として第1段タンク, 第2段タンク及び第3段タンクの初期貯水量 ($S1(0)$, $S2(0)$ 及び $S3(0)$) を0とする. 第4段タンクの初期貯水量 ($S4(0)$) は降雨前の河川流量が全てこのタンクから流出していると仮定して, その値を決める. ここでは便宜上0と仮定する. 降雨が21 mm, 22 mm及び23 mmの3時間あったとすると, はじめに, 雨量21 mmが第1段タンクに入れられる. このタンクの初期貯水量 $S1(0)$ は0だから, 第1段タンクの貯水量は21 mmとなる. この21 mmと各側壁の穴の高さ h_{13} , h_{12} 及び h_{11} を比較し, 21 mmより低い高さにある流出穴から河川への流出が起こる. 具体的な計算は補足表1の時刻1の第1段タンクの側穴流出量の欄の $Y1(1)$ に書いている. ここに, $R1 = 21$, $R2 = 22$ 及び $R3 = 23$ として計算を行う. 第1段タンクから下のタンクへの浸透量 $Z1(1)$ は $21 \times \alpha_{10}$ として計算される. したがって, 最終的な第1段タンクの貯水量は補足表1の $S1(1)$ のようになる. これが次の時間の初期貯水量になる.



補足図1 直列4段タンクモデルとその係数
Annex Fig. 1 Tank Model with four tanks arranging vertically and its parameters.

補足表1 直列4段タンクモデルの計算法

Annex Table 1 Calculation procedure for the Tank Model with four tanks arranging vertically.

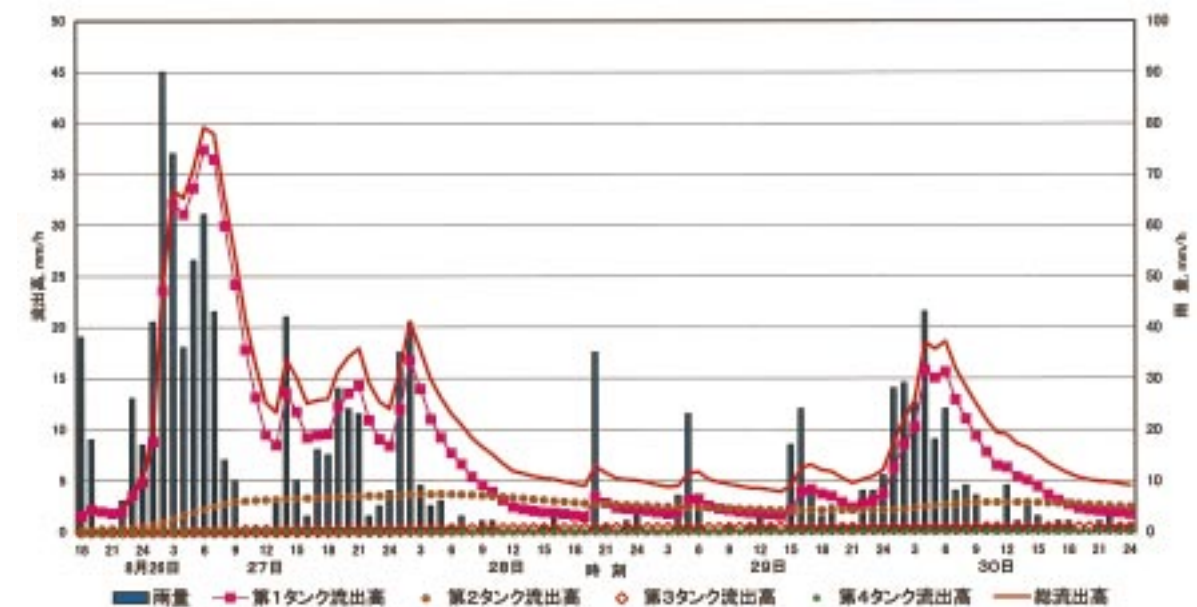
第1段タンク					
時刻	時間雨量	初期貯水量	側穴流出量	下段タンクへの浸透量	終期貯水量
0					$S1(0)$
1	R1	$S1s(1)=R1+S1(0)$	$S1s(1) > h13$ の場合, $Y1(1) = \alpha_{13} * (S1s(1) - h13) + \alpha_{12} * (S1s(1) - h12) + \alpha_{11} * (S1s(1) - h11)$ $h13 \geq S1s(1) > h12$ の場合 $Y1(1) = \alpha_{12} * (S1s(1) - h12) + \alpha_{11} * (S1s(1) - h11)$ $h12 \geq S1s(1) > h11$ の場合 $Y1(1) = \alpha_{11} * (S1s(1) - h11)$ $h11 \geq S1s(1)$ の場合, $Y1(1) = 0$	$Z1(1) = S1s(1) * \alpha_{10}$	$S1(1) = S1s(1) - Y1(1) - Z1(1)$
2	R2	$S1s(2)=R2+S1(1)$	$S1s(2) > h13$ の場合, $Y1(2) = \alpha_{13} * (S1s(2) - h13) + \alpha_{12} * (S1s(2) - h12) + \alpha_{11} * (S1s(2) - h11)$ $h13 \geq S1s(2) > h12$ の場合 $Y1(2) = \alpha_{12} * (S1s(2) - h12) + \alpha_{11} * (S1s(2) - h11)$ $h12 \geq S1s(2) > h11$ の場合 $Y1(2) = \alpha_{11} * (S1s(2) - h11)$ $h11 \geq S1s(2)$ の場合, $Y1(2) = 0$	$Z1(2) = S1s(2) * \alpha_{10}$	$S1(2) = S1s(2) - Y1(2) - Z1(2)$
3	R3	$S1s(3)=R3+S1(2)$	$S1s(3) > h13$ の場合, $Y1(3) = \alpha_{13} * (S1s(3) - h13) + \alpha_{12} * (S1s(3) - h12) + \alpha_{11} * (S1s(3) - h11)$ $h13 \geq S1s(3) > h12$ の場合 $Y1(3) = \alpha_{12} * (S1s(3) - h12) + \alpha_{11} * (S1s(3) - h11)$ $h12 \geq S1s(3) > h11$ の場合 $Y1(3) = \alpha_{11} * (S1s(3) - h11)$ $h11 \geq S1s(3)$ の場合, $Y1(3) = 0$	$Z1(3) = S1s(3) * \alpha_{10}$	$S1(3) = S1s(3) - Y1(3) - Z1(3)$

第2段タンク					
時刻		初期貯水量	側穴流出量	下段タンクへの浸透量	終期貯水量
0					$S2(0)$
1		$S2s(1)=Z1(1) + S2(0)$	$S2s(1) > h22$ の場合, $Y2(1) = \alpha_{22} * (S2s(1) - h22) + \alpha_{21} * (S2s(1) - h21)$ $h22 \geq S2s(1) > h21$ の場合 $Y2(1) = \alpha_{21} * (S2s(1) - h21)$ $h21 \geq S2s(1)$ の場合, $Y2(1) = 0$	$Z2(1) = \alpha_{20} * S2s(1)$	$S2(1) = S2s(1) - Y2(1) - Z2(1)$
2		$S2s(2)=Z1(2) + S2(1)$	$S2s(2) > h22$ の場合, $Y2(2) = \alpha_{22} * (S2s(2) - h22) + \alpha_{21} * (S2s(2) - h21)$ $h22 \geq S2s(2) > h21$ の場合 $Y2(2) = \alpha_{21} * (S2s(2) - h21)$ $h21 \geq S2s(2)$ の場合, $Y2(2) = 0$	$Z2(2) = \alpha_{20} * S2s(2)$	$S2(2) = S2s(2) - Y2(2) - Z2(2)$
3		$S2s(3)=Z1(3) + S2(2)$	$S2s(3) > h22$ の場合, $Y2(3) = \alpha_{22} * (S2s(3) - h22) + \alpha_{21} * (S2s(3) - h21)$ $h22 \geq S2s(3) > h21$ の場合 $Y2(3) = \alpha_{21} * (S2s(3) - h21)$ $h21 \geq S2s(3)$ の場合, $Y2(3) = 0$	$Z2(3) = \alpha_{20} * S2s(3)$	$S2(3) = S2s(3) - Y2(3) - Z2(3)$

第3段タンク					
時刻		初期貯水量	側穴流出量	下段タンクへの浸透量	終期貯水量
0					$S3(0)$
1		$S3s(1)=Z2(1) + S3(0)$	$S3s(1) > h31$ の場合 $Y3(1) = \alpha_{31} * (S3s(1) - h31)$ $h31 \geq S3s(1)$ の場合, $Y3(1) = 0$	$Z3(1) = \alpha_{30} * S3s(1)$	$S3(1) = S3s(1) - Y3(1) - Z3(1)$
2		$S3s(2)=Z2(2) + S3(1)$	$S3s(2) > h31$ の場合 $Y3(2) = \alpha_{31} * (S3s(2) - h31)$ $h31 \geq S3s(2)$ の場合, $Y3(2) = 0$	$Z3(2) = \alpha_{30} * S3s(2)$	$S3(2) = S3s(2) - Y3(2) - Z3(2)$
3		$S3s(3)=Z2(3) + S3(2)$	$S3s(3) > h31$ の場合 $Y3(3) = \alpha_{31} * (S3s(3) - h31)$ $h31 \geq S3s(3)$ の場合, $Y3(3) = 0$	$Z3(3) = \alpha_{30} * S3s(3)$	$S3(3) = S3s(3) - Y3(3) - Z3(3)$

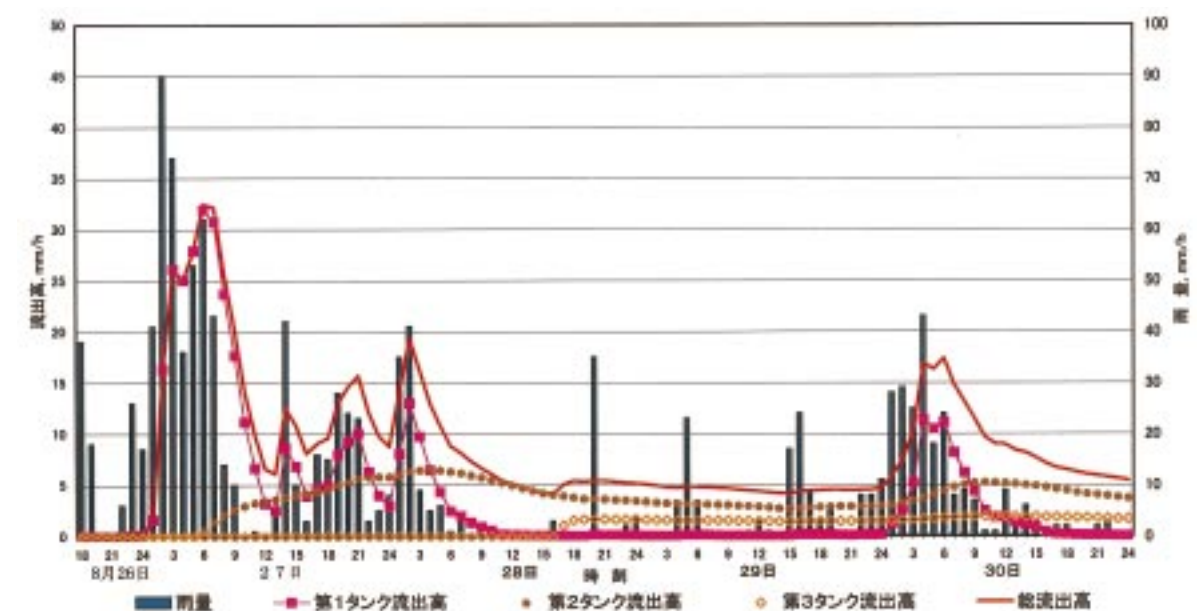
第4段タンク					
時刻		初期貯水量	側穴流出量	終期貯水量	総流出量
0				$S4(0)$	
1		$S4s(1)=Z3(1) + S4(0)$	$Y4(1) = \alpha_{41} * S4s(1)$	$S4(1) = S4s(1) - Y4(1)$	$Y(1) = Y1(1) + Y2(1) + Y3(1) + Y4(1)$
2		$S4s(2)=Z3(2) + S4(1)$	$Y4(2) = \alpha_{41} * S4s(2)$	$S4(2) = S4s(2) - Y4(2)$	$Y(2) = Y1(2) + Y2(2) + Y3(2) + Y4(2)$
3		$S4s(3)=Z3(3) + S4(2)$	$Y4(3) = \alpha_{41} * S4s(3)$	$S4(3) = S4s(3) - Y4(3)$	$Y(3) = Y1(3) + Y2(3) + Y3(3) + Y4(3)$

第2段タンク貯水量は上のタンクからの浸透量 $Z1(1)$ と初期貯水量 $S2(0)$ の和となる。 $S2(0)$ は0だから第2段タンク貯水量は $Z1(1)$ となる。この $Z1(1)$ と各側壁の穴の高さ h_{22} 及び h_{21} を比較し、 $Z1(1)$ より低い高さにある流出穴から河川への流出が起こる。第2段タンクからの流出量は補足表1の時刻1の第2段タンクの側穴流出量の欄の $Y2(1)$ に書いている。第2段タンクから下のタンクへの浸透量 $Z2(1)$ は $Z1(1) \times \alpha_{20}$ として計算される。したがって最終的な第2段タンクの貯水量は補足表1の $S2(1)$ のようになる。これが次の時間の初期貯水量になる。同様に、第3段タンク及び第4段タンクからの流出量($Y3(1)$ 及び $Y4(1)$)、浸透量($Z3(1)$)及び貯水量($S3s(1)$, $S3(1)$, $S4s(1)$ 及び $S4(1)$)を計算する。補足表1に直列4段タンクモデルの3時間の計算方法を示している。それぞれのタンクの初期貯留量は0とし、時刻1に雨量21mm, 時刻2に雨量22mm, 時刻3に雨量23mmを第1段タンクに加えて、補足表1の各欄に示す方法で計算する。詳しくは流出解析法(菅原正巳, 1972)を参考にいただきたい。実際の事例として、補足図2に速い流出成分が卓越する黒川流域新田橋地点のタンクモデルに元気象庁の那須観測所の雨量を入力したときの計算例、補足図3に中間的な流出成分が卓越する蛇尾川流域大田原地点のタンクモデルに同様の那須観測所の雨量を入力したときの計算例をそれぞれ示す。それぞれのタンクモデルの係数は図21及び図25に示している。これら計算結果からも分かるように黒川流域新田橋地点では第1段タンクからの速い流出が卓越し、相対的に第2段タンクからの流出は少なく、第3段タンク及び第4段タンクからのゆっくりした流出はほとんど見られない。一方、蛇尾川流域大田原地点では黒川流域に比べて、第1段タンクからの速い流出はやや少なく、第2段タンクからの流出は相対的に多くなっている。また、第3段タンクからのゆっくりした流出も見られる。この傾向は降雨期間が長くなるほど顕著になる。この事例では、雨が降り始めて4日後の30日未明の降雨による流出量ピーク時点では、黒川流域新田橋地点で第1段タンクの流出量と第2段タンク及び第3段タンクからの流出量の比は1対0.19であり、蛇尾川流域大田原地点では1対0.56であった。一般に、対象とする流域面積が小さく、かつ短い期間の計算をする場合は2段のタンクモデルで十分な精度で計算できる。このことは補足図2及び補足図3の第3段タンクからの流出量を見ると理解していただけたらと思う。今回の那珂川流域の解析では上流域から下流域までを7日間計算したこと及び流域水収支を把握するために直列4段のタンクモデルを用いて計算を行った。



補足図2 黒川流域新田橋地点のタンクモデル(図21)に那須観測所のアメダス雨量データを入力した場合の計算例

Annex Fig. 2 Simulation result by the Tank Model showing in Fig. 21 at the Nitta-bashi station in the Kurokawa River basin using AMEDAS data of Nasu station.



補足図3 蛇尾川流域大田原地点のタンクモデル(図25)に那須観測所のアメダス雨量データを入力した場合の計算例

Annex Fig. 3 Simulation result by the Tank Model showing in Fig. 25 at the Ohtawara station in the Sabigawa River basin using AMEDAS data of Nasu station.