

昭和58年7月豪雨による三隅川の河川構造物災害 とその実験的検討

上野鉄男・宇民正

DAMAGES OF RIVER STRUCTURES DUE TO 1983.7. HEAVY RAINFALL IN THE MISUMI RIVER AND ITS EXPERIMENTAL INVESTIGATION

By *Tetsuo UENO* and *Tadashi UTAMI*

Synopsis

From the 20th to 23rd in July 1983, heavy rainfall attacked the large area in San-in Districts and the flood with vast discharge was generated in the Misumi River. The level of flood water reached about 2 meters beyond the top of embankments and the whole fluvial areas were flooded. Everything on the area—embankment, river-walls, bridges, agricultural plains, houses etc.—were destroyed or were given serious damages.

The authors surveyed the river basin after the flood and examined the aerial photographs to find out some features with which river constructions were destroyed. They also conducted some experiments to confirm them. In this paper, the results of the survey and the experiments are described.

1. 概 説

昭和58年7月20日から23日にかけての梅雨末期の集中豪雨によって、島根県西部から山口県東北部において過去最大規模の災害が発生した。とりわけ三隅川筋では総雨量で700mmを越え、流域における災害は被災規模も大きく、中小規模の山地河川の災害として典型的な特徴を示すものであった。

三隅川は漁山をその源とし、南西方向に流下したのち向きを北西に変え、河口より約11kmの地点で左支川矢原川および右支川井川を合せて三隅町湊浦で日本海に出る山地蛇行河川であり、その流域面積は232km²、幹線河道長は38kmである。三隅川は中下流部においてFig. 1に示されるように、蛇行して谷の左右の山腹に交互に接しながら流下しており、流路と山腹に挟まれた部分に断続的に河岸段丘が形成されており、その標高は河道部よりも4~5m高くなっている。人々はこの河岸段丘の縁に高さ3~4mの堤防を築いてそこを生活の場としており、その低位部には農地が高位部には集落が形成されている。このように不連続に点在する平坦地を結ぶために三隅川には大小多数の橋梁がかかけられている。三隅川においては取水堰は西方寺頭首工があるのみである。

本研究においては、今回の洪水による河川構造物の被害状況とその洪水流況との関連性について検討することとする。三隅川中下流部における堤防、護岸および橋梁などの被害の概略はFig. 1およびFig. 2に示すとおりである。今回の洪水の特徴は流量とともに河道への供給土砂量が大きかったことである。流域の至るところで斜面崩壊や土石流が発生し、それにより河道に供給された土砂が河床を局所的に上昇させ、河流の氾濫に寄与したと考えられる。河道直近の土石流の発生箇所はFig. 1に示されている。一方、三隅川の河道の疏通能力が1700m³/sであるのに対し、今回の洪水はピーク流量が河口で2963m³/sと推定されてお

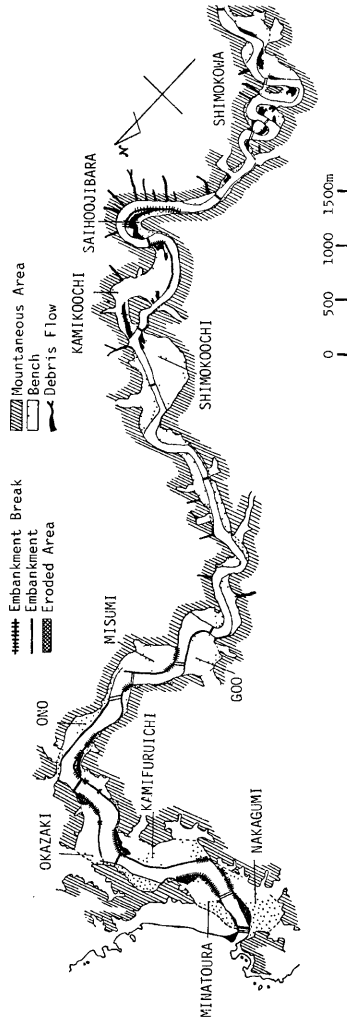


Fig. 1 The distribution of broken embankments and eroded area inside the embankments

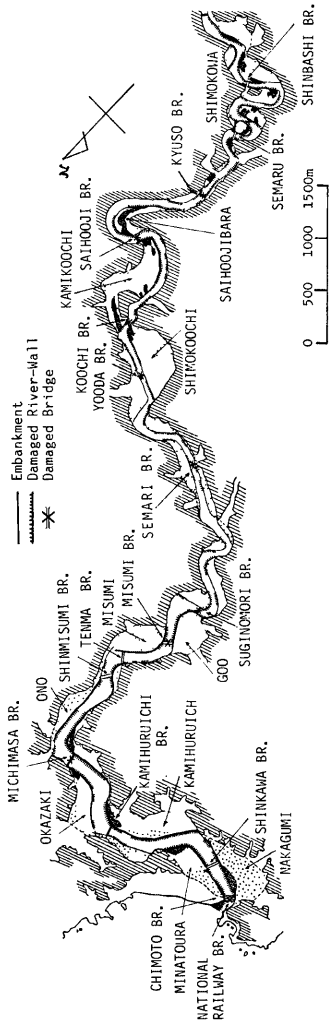


Fig. 2 The distribution of broken protections of riverbanks and broken bridges

り³⁾、堤防の天端よりさらに1~2m高い水位を記録し、堤内地の浸水深は4~5mにも達している。したがって、図において点を施した河岸段丘部分は全面的に洪水の流路となり、洪水は山腹から山腹まで谷幅いっぱいにならって流下したことになる。このような洪水時の流れは蛇行した複断面の流れとみることができる。

木下^{2,3)}は、1981年に複断面蛇行水路における流れを対象として、その三次元流況を写真測量で捉えた。木下の研究においては、複断面蛇行水路の流れには、i)「並列らせん流」を主要な構造とする底面から水面まで及ぶ乱流域境界層としての構造、ii) 巨大な水平渦を含む河岸沿いの流況、iii) 蛇行という河道平面形がそれらに及ぼす影響、iv) それらの複断面の場合の流況、という実河川の洪水流に含まれる四つの主要な特徴が総合的に現われる流れであるとの位置づけがなされており、実験ではそれらの特徴が最も顕著に現われる低水路から高水敷上へのし上げてゆく流れと逆に高水敷から低水路へと流入する流れが三次元的に測定されている。

また、石川ら⁴⁾も水表面を流れる着色紙をストロボ照明を用いて撮影することにより、複断面河道の蛇行部の流れを可視化し、水面における流速ベクトルの分布を求めた。その結果、木下と同様に低水路から高水敷に乗り上げる流れや高水敷から低水路へと下降する流れの存在を明らかにし、その実験条件のもとで低水路河岸の凸岸側で局所洗掘が生じる恐れがあることを指摘した。

今回の三隅川の洪水流況はまさしくこれらの実験結果と同様な特徴を有するものであり、三隅川における今回の洪水災害の実態と洪水流の構造を明らかにすることは河川工学上重要な意義を有するものと考えられる。

本研究は、三隅川の中下流部の現地調査と災害直後の航空写真の詳細な観察に基づいて、今回の洪水による河川構造物の被害の実態を明らかにし、さらに洪水時の流れの三次元構造についても基礎実験によって検討を加えたものである。

2. 河川構造物の被災状況

三隅川における洪水災害の現地調査は1983年9月5日から9日にかけての5日間にわたって行われた。調査に先立って、あらかじめステレオズームトランスファースコープを用いて災害直後の航空写真を観察し、堤防、護岸、橋梁などの河川構造物の被害の状況および河岸や堤内地の流れによる洗掘の状況を1/2500の地図に記入し、災害の特徴を全般的に把握するとともに、詳細な現地調査を必要とする箇所について個別に明らかにした。現地調査においては、三隅川下流部の岡崎、上古市、湊浦および中組地区における堤防の被災状況と堤内地の洗掘、土砂礫の堆積の状況、中流部の下古和地区の護岸の被災状況および河岸の洗掘状況、農地への土砂礫の堆積状況などを重点的に調べた。

2.1 堤防の被災状況

今回の大洪水によって三隅川の堤防は各所で破壊されたが、本節においては、破堤を中心とする堤防の被災状況について検討し、またそれによってもたらされた堤内地の被災の状況についても述べることにする。

Fig. 1は、三隅川の中・下流部の河口から14kmまでの範囲について、今回の洪水による堤防の被災の状況と、河岸および堤内地の洗掘の状況を示したものである。Fig. 1によると、堤防は主に郷、三隅よりも下流の地区にあり、それより上流では上河内および西方寺原地区にあるだけである。それらの配置あるいは線形に注目すると、小野および中組地区の堤防は直線的であるが、その他は曲線となっており、しかもそれらの形には共通のパターンが認められる。すなわち、これらの堤防は山腹を始点としてそこから谷の中心を越えて張り出し、そこで大きくカーブして再び山腹まで戻ってきており、また堤防のカーブがきつくなっている場所の河道の対岸部は山腹に接しているというパターンが共通して見られる。これらは河谷の形状とその中の流路あるいは河岸段丘の配置から決ったものであると考えられるが、現在の配置が洪水に対して安定した状態にあるかどうかについては今後検討する必要がある。また、これらの一つづきの堤防の下流

側の部分は極端に低くなっているか、霞堤の形式をとっている場合がほとんどである。

破堤の状況について検討を加えると、下記のようなある共通したパターンがあることがわかる。すなわち、上記のように配置された各一つづきの堤防に対して、その上流側の部分が破堤しており、その下流側の部分は被害が少なくなっている。ただ、上吉市地区の堤防についてはその最下流部分で被災しているが、それは完全な破堤ではなく、もともと他より低くなっている堤防がその上を流れる洪水流によって部分的に数箇所にわたって洗掘されたものである。さらに、郷地区および小野地区において破堤がなかったのは次の理由による。すなわち、郷地区においては他の場所では破堤しているような堤防の曲っているところより上流側の部分において今回の洪水でも浸水しない程度に地盤が高くなっているところがあるため、また、小野地区の堤防は線形も直線的である上に、国道9号線と共用されており、堤防が他の場所のものより強固に造られているために破堤を免れたものと考えられる。

一方、堤内地に目を向けると、破堤した場所では洪水の流入に伴って堤内地が大きく洗掘されており、その洗掘部分に続いて氾濫水の進行方向にはかなり広い範囲にわたって 10~20 cm の粒径をもつ大礫が堆積している。

つきに、これらの堤防の天端および堤内地で水位がどの程度まで達したかを検討すると、Fig. 3 のように

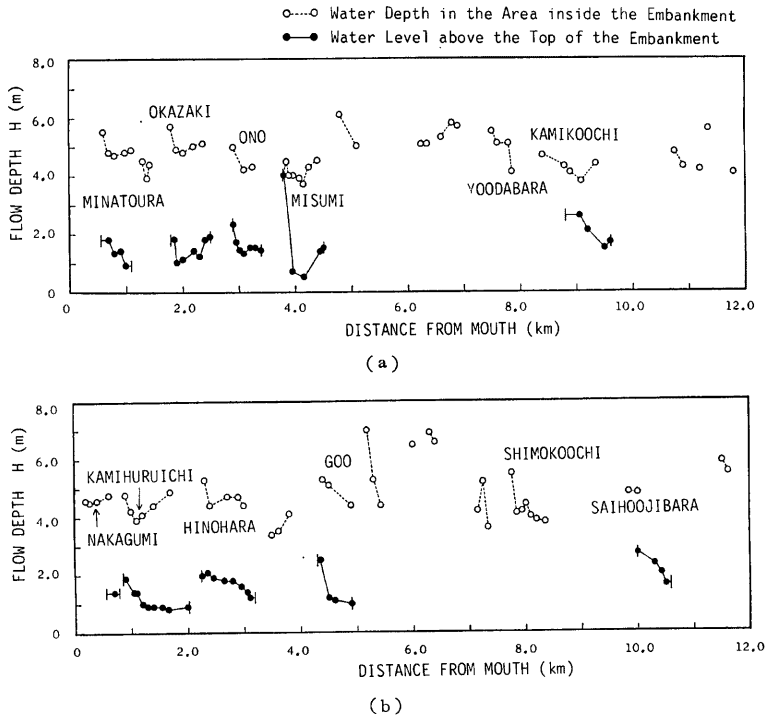


Fig. 3 Depth of the flood flow over the top of the embankments and over the areas inside the embankments

(a) Rights side of the river (b) Left side of the river

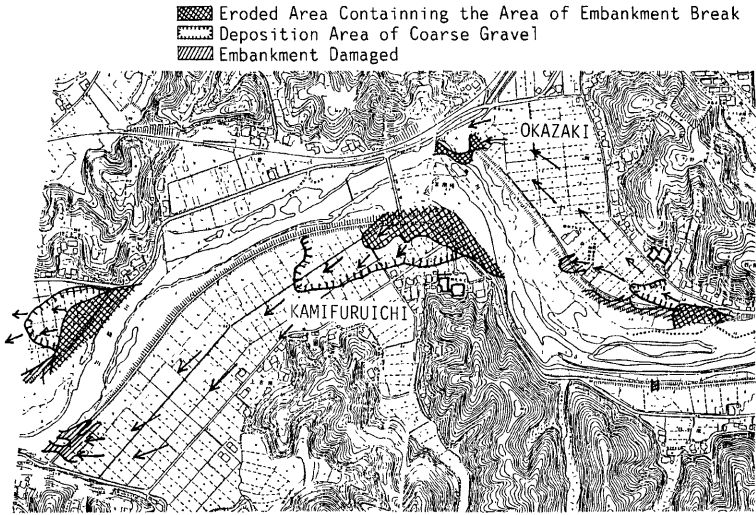


Fig. 4 The damage around Okazaki and Kamihuruichi

なる。本図においては、堤防のない場所についても河岸段丘上の河道に近い各地点の浸水深が記入されている。本図を作成するに当たっては、島根県土木部による三隅川河道沿いの洪水痕跡水位の調査結果を用いた。本図から、今回の洪水は堤防の天端よりも1~2m高い水位を記録し、堤内地の浸水深は4~5m程度となったことがわかる。また、本図において堤防の越流水深が各堤防の下流の部分でかなり大きくなっているが、これは堤防の下流側の部分でその天端高が洪水の水面勾配以上に極端に低くなっているためである。

以上のような状況のもとで、現地での聞きとり調査をもとにして岡崎地区の破堤がどのように発生したかについて述べると、「三隅川の水位が上るにつれて(この地区の)下流側の無堤の部分から浸水が始まり、さらに水位が上昇して堤防が完全に水没してしまった。その後しばらくして堤防に生えていた草木で水面に頭を出していたものが急に見えなくなったので、破堤したと思った。」ということになる。他の地区においても三隅川の水位上昇に伴って、堤内地の下流側から浸水が始まり、破堤する以前に堤内地は河道の水位と同じ高さまで浸水している。

以上に述べた破堤の特徴がよく現われている岡崎地区および上吉市地区の被災状況をさらに詳細に示すと、Fig. 4 のようになる。図において、矢印は氾濫水の流向を示している。本図はステレオズームトランスファースコープを用いて災害直後の航空写真を立体観察し、1/2500の地図上に被災状況を転写することによって作成されている。

本図と先述の Fig. 3 とを合せて考えると、各地区における被災状況がよくわかる。その特徴は、各地区の一つづきの堤防の上流側の部分では破堤と洗掘、それに続いて10~20cmの粒径をもつ大礫の堆積があり、堤防の下流の端の部分では堤内地から河道に流出する流れによって堤防あるいは堤内地が深く洗掘されていることである。そして、中間部分の堤防は破堤していないが、これはその部分の堤防の法線と洪水流の流向がほぼ一致していたことによるものと考えられる。

2.2 護岸の被災状況

護岸の被災状況は Fig. 2 に示されている。本図は、主に災害直後の航空写真の観察結果と現地調査の結

果に基づいて作成されているが、被災状況が写真観察によって判読できず、かつ現地調査でも十分に把握できなかった部分については、島根県土木部による「三隅川災害復旧助成事業」の資料を用いて補足した。

本図によると、三隅川の中・下流部においては各所で護岸が被災しており、被害のない箇所の方が少ないと言える。三隅川においては、河岸段丘が断続的に形成されており、そのような河岸段丘の縁に沿って護岸工事が施工されているが、このような河岸段丘の形状や配列には前節で述べたような共通するパターンが存在している。したがって、ここではこれらの各河岸段丘部の位置ごとに護岸の被害の発生状況をまとめることにすると、次のようになる。

① 河岸段丘の縁の曲っているところよりも上流側にある護岸は例外なく被災している。

② 上記の曲りの部分より下流側にある護岸の被災は少なくなっている。このような場所では護岸の方向と洪水の流向とがほぼ一致しているものと考えられる。

③ さらに下流側で、河岸段丘の最下流部では護岸の被災は多くなっている。

上記の特徴は、堤防の被災のパターンとも共通した内容をもっており、堤防や護岸の被災は洪水時の流れと深い関連をもっていると考えられる。これについては次章において検討する。

以上に述べたように、三隅川においては河岸段丘の形状および堤防の高さや配置、さらには洪水による被害の発生状況に共通するパターンが存在することが明らかとなった。また現地調査時に気づいたことは、岡崎地区の上流側の標高が高くなった場所に浄本寺があり、上田市地区の同様な場所に明光寺があり、人家はそれらの周辺に集まっていることである。このような場所に寺院があるのは、洪水に対して高くて安全な場所を選んだためであろう。これらの寺院については、Fig. 4 にその輪郭を太く描いて示したが、この他にも小野、三隅および郷の各地区においても同様な場所に寺院がある。三隅川流域においては、堤防の配置や高さ、洪水による被災状況、さらには集落や寺院の配置にまで共通したパターンが認められることが非常に興味深く感じられた。

2.3 橋梁の被災状況

今回の洪水によって三隅川においては多くの橋梁が被災したが、三隅川の河口から 14 km 地点までにある橋梁の特徴とその被災状況を示すと、Table 1 のようになる。なお、それらの橋梁の位置は Fig. 2 に示されており、そのうち被災したものには×印が付けられている。本表において、洪水位は、橋梁の路面を基準にとって最高水位がどこまで達したかを示したものであり、この値が正のとき橋梁が水没したことを意味している。また、スパン長は平均の値を示している。

これらの資料をもとにして、橋梁の被災の特徴をまとめるとつぎのようになる。

① 流失した橋梁はすべて町道であって、その幅員が 4 m 以下の小橋梁であった。洪水位との関係では、九双橋を除くすべてが完全に水没していた。

② 上田市橋の左岸側、三隅大橋の右岸側では破堤があり、これに伴う周辺の洗掘によって橋梁に被害が発生している。また、先に検討したように、これらの橋梁がかけられている位置は、堤防や護岸の被害を最も受けやすい場所に当たっている。

③ 国鉄橋は橋脚周辺の洗掘により右岸側から約 36 m 隔った位置にある橋脚が約 1 m 沈下するとともに、上流側に傾いた。その原因としては、つぎのことが考えられる。すなわち、その地形的特徴としてこの場所が狭く部となっているため氾濫した洪水が集中することになり、一方、橋梁そのものについては他と比較してその平均のスパン長が最も小さくなっていることや橋脚の幅 (4 m) が大きくなっていることのため、集中した洪水の疏通を妨げると同時に橋脚周辺の洗掘を大きくしている。国鉄橋の被害については、大原ら⁹⁾によって詳細な報告がなされている。

④ 水没した橋梁で被害を受けていないのは、瀬丸橋および新橋であり、これらはいずれも県道橋であり、幅員が 10 m 前後の P. C. 橋である。

⑤ その他の被害のなかった橋梁のうち、千本橋、新川橋および天満橋は幅員も比較的大きく、洪水位は

Table 1 The features and damages of bridges over the Misumi River

Name of Bridge	Date Completed	Location (km)	Structure	Bridge Leng. (m)	Span Leng. (m)	Width (m)	Flood Level (m)	Administered by	Damage
Nat. Rail. Br.		0.15	Steel	123.1	20.5	2.7	-1.3	Nat. Rail.	pier sank
Chimoto Br.		0.18	Concr.	120.0	24.0	4.5	-1.0	Pref.	no
Shinkawa Br.	S 47.11.	0.52	Steel	135.3	27.1	8.2	-1.3	Pref.	no
Kamihuruichi Br.		1.70	Concr.	117.0	29.0	3.5	-0.7	Town	left bank scoured
Michimasa Br.	S 42.07.	2.56	Steel	119.0	23.8	3.0	0.9	Town	lost
Shinmisumi Br.	S 52.03.	3.56	Steel	153.4	51.1	11.0	-2.8	Gover.	no
Tenma Br.	S 48.12.	3.86	Steel	99.0	24.8	5.0	-1.7	Town	no
Misumi Br.	S 31.11.	4.38	Steel	95.6	31.9	8.1	0.2	Pref.	right bank scoured, beam fell
Suginomori Br.	S 54.03.	4.89	Steel	78.5	26.1	2.5	2.3	Town	lost
Semari Br.	S 49.08.	6.74	Steel	69.9	23.3	1.5	3.6	Town	lost
Yooda Br.	S 43.01.	7.95	Steel	65.6	21.8	3.6	2.5	Town	lost
Koochi Br.	S 49.08.	8.47	Steel	65.5	21.8	4.0	1.2	Town	lost
Saihoji Br.	S 40.12.	9.66	Steel	62.3	20.8	2.5	1.9	Town	lost
Kyuso Br.	S 50.03.	10.94	Steel	66.0	22.0	2.5	-0.5	Town	lost
Semaru Br.	S 55.03.	11.83	P.C.	57.0	28.5	10.2	2.6	Pref.	no
Mannoki Br.		12.28	Steel	53.0	26.4	3.0	2.4	Town	lost
Shinbashi Br.		13.42	P.C.	42.7	42.7	9.3	0.1	Pref.	no

路面よりも 1 m 以上低いところにあった。

以上から、橋梁の被災には橋梁の高さに対する洪水の水位、今回のような洪水流況のもとでの橋梁の位置、橋梁の規模や構造などが関連していることがわかる。

3. 洪水流況の実験的検討

三隅川においては堤防や護岸の配置に共通するパターンが認められ、かつ、堤防や護岸の被災状況にもほぼ共通するパターンがあることが明らかとなった。そこで、本章においてはこれらの被害と洪水流況との関連を、直線水路内での複断面蛇行流れの可視化実験を通して検討する。

3.1 複断面蛇行水路の流れに関する木下の研究

木下^{2,3)}は、幅 54 cm, 勾配 1/1000 の直線水路内に、幅 16 cm, 岸高 2 cm, 波長 128 cm の蛇行した低水路（その法線と直線水路の流下方向とのなす角の最大値が 20° となっている）を設けて、低水路内の水深を 4 cm としたときの流況を流れの可視化法を用いて詳細に調べた。

まず、水面にアルミ粉末を散布してカメロン効果による表面流速の可視化を行い、Fig. 5 に示されるような流れの特徴を明らかにした。図において、低水路は 2 本の実線で表わされており、図の右側の部分には表面流速の平均的な横断方向分布が表わされている。本図については、「表面流速の速い水域、および最高流速線は図のようにほとんど直線的になってきていることが分る。高水敷の凸岸部上の表面流速はかなり増大しているのに反し、低水路の凹岸曲頂部付近の表面流速の低下は甚しい。また、図中の○印付近からは低水路から高水敷へのし上げる流れではげしい Boil が水面に浮かび、表面浮流物は両側に押し分けられやすい。……」と説明されている。

さらに、水中トレーサーの立体撮影結果を写真測量法と計算機を用いて数値化することによって、複断面蛇行水路の流れの三次元流況を明らかにした。とりわけ、低水路から高水敷上への上げてゆく流れの観察

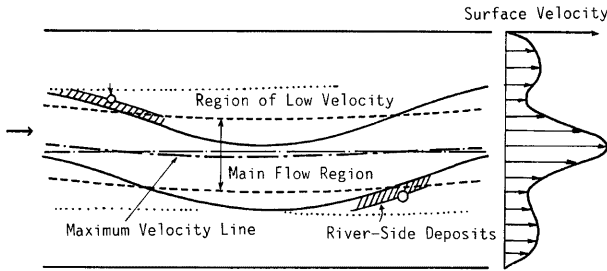


Fig. 5 The characteristics of the flow near the surface in the meandering composite channel (after Kinoshita)

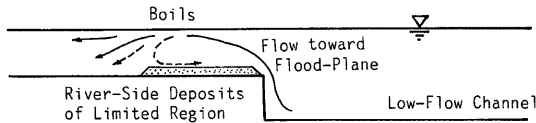


Fig. 6 The schematic view of the three-dimensional flow structure to generate river-side deposits (after Kinoshita)

や三次元流速ベクトルの分布の測定結果に基づいて、そこでの流況が **Fig. 6** に示されるような特徴をもつことを指摘し、これによって、実河川において河畔堆積をひき起す流れの機構を説明した。

3.2 洪水流況とそのモデル化

三隅川においては、先の **Fig. 1** および **Fig. 2** に示される堤防および護岸の被災状況、さらには洪水による河岸や堤内地の洗掘状況から、洪水時には河道の蛇行部を短絡するような流れ（氾濫流）が発生していることがわかる。また、それが河岸段丘上を 4~5 m もの水深をもって流れたことを、**Fig. 3** は示している。さらに、**Fig. 4** に示されるような堤内地の洗掘状況やそこに運搬された土砂礫の粒径の大きさや拡がり具合から、氾濫水はかなりの流速をもって流れたことがうかがわれる。

一方、先述のように、護岸や堤防の被災状況には共通するパターンがあり、それは河道内の流れの構造と密接に関連していると考えられる。そこで、堤内地の被災状況や河川構造物の破壊機構を理解することを目的として、このような流れをできるだけ単純化して実験室内で再現してみることとした。

三隅川における今回の出水に対するこのような洪水流況を、直線水路内の複断面蛇行流れとして **Fig. 7** のようにモデル化した。図において、 X は水路の上流端からの距離を表わす。また、点を施した部分が河岸段丘部に対応しているが、以下においてはこれを高水敷と呼ぶこととする。先述の **Fig. 1** に示されるよう

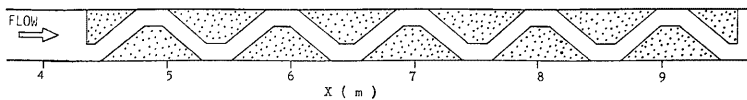


Fig. 7 The simplified model of the Misumi River

な蛇行した河谷の状況を直線に置き換えたわけであるが、洪水流況に関する上述の目的に対しては第一次近似的な意味においてその流況を再現することができるものと考えられる。

本モデルの特徴は、低水路の流れが左右岸の水路側壁に交互に接しながら流下するようになっていることであり、これは **Fig. 1** において流れが蛇行しながら谷の左右の山腹に交互に接しながら流下する状況に対応している。また、高水敷上に乗上げる流れやそこから河道に落ち込む流れの状況を単純化すること、および流れの可視化実験が容易に行えるようにすることを考慮して高水敷は台形状に形成されている。

このようなモデルにおける諸量は次のようにして決定した。**Fig. 8** は三隅川の中・下流部の河道幅 B と谷幅 B_0 の特徴を示したものである。図において、河口からの距離は河谷の中心線に沿ってとられている。図から谷幅は中組～岡崎地区、三隅・郷地区、下河内・上河内地区および下古和地区で広がっていることがわかるが、このうち堤防の配置や被災状況において共通したパターンがとりわけ強く認められる中組～岡崎地区および三隅・郷地区においては河道幅と谷幅の比 B/B_0 がそれぞれ 0.35 および 0.33 となっている。これをもとにして、実験水路での水路幅と低水路幅との比を 3:1 とした。また、河口から 5 km までの区間における各河岸段丘の長さは平均的に 640 m 程度であり、これは上述の区間における谷幅 (320 m) の 2 倍に相当するので、実験水路内の台形の底辺の長さを 80 cm とした。河道が山腹に接する部分の長さは、河口から 5 km までの区間において平均的に 200 m となっていることから、実験水路の側壁面に沿う低水路部分の長さを 25 cm とした。また、河道幅と河道の深さとの比が 1/4 程度となることから、**Fig. 7** における低水路の深さを 1 cm とした。

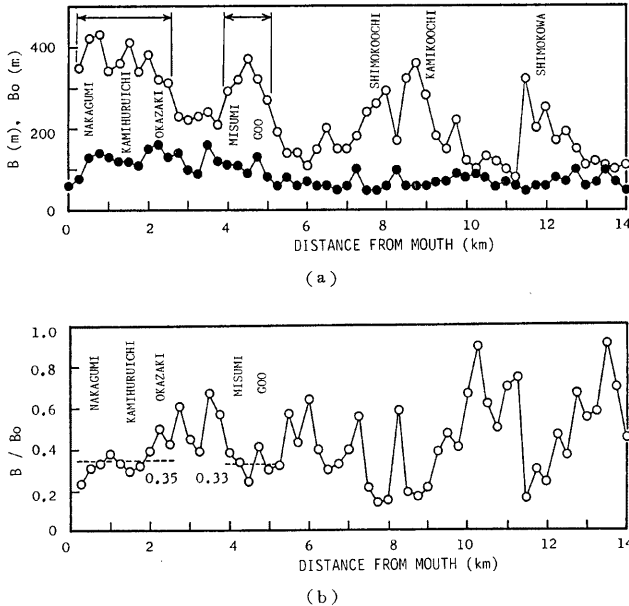


Fig. 8 The features of river-width and valley-width
 (a) The variations of river-width and valley-width
 (b) The variation of the rate of river-width to valley-width

3.3 実験方法

実験は、幅 40 cm、長さ 12 m のアクリル樹脂製の直線水路で行われた。水路床勾配は1/1000に設定され、**Fig. 7** のような高水敷の配置のもとで 0.28 l/s の流量を流し、ほぼ等流状態を保つようにしたとき、低水路内での水深は 1.6 cm、水面での平均流速は 10.75 cm/s となった。なお、低水路幅は 13 cm となっている。

流れの可視化撮影は、**Fig. 7** において水路の上流端から 7~8 m の区間において行われた。トレーサーとしてはポリステレンビーズ (粒径 0.1~0.5 mm、比重 1.05) を用いた。照明装置は観測台車上に下向きに取付けられ、そこから投げられるスリット状の光線を45度傾いた鏡で水平向きに反射させ、流れの水平な断層面が約 3 mm のスリット幅で照らし出されるようにした。また、低水路内の水路床近傍の流況が捉えられるように、高水敷はアクリル樹脂で作られている。写真撮影は、水面での平均流速と同じ 10.75 cm/s の速度で流下方向に移動する観測台車上に下向きに設置されたカメラによって行われ、シャッタースピードは 0.16 秒に設定されている。

上記のような方法を用いて、**Fig. 9** の (a)~(c) 図に示される三通りの高さにおける水平断面内の粒子の運動が捉えられている。水面近傍の流況についての写真撮影結果の一例を示すと、**Photo. 1** のようである。写真においては流れは左から右へ向っており、高水敷の位置が破線で示されている。

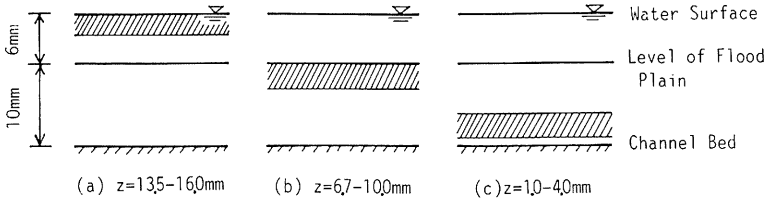


Fig. 9 The height of the visualized section of the flow

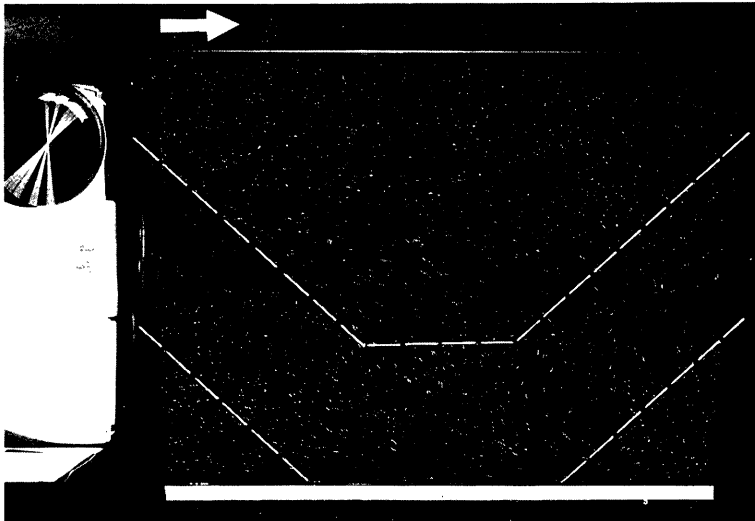


Photo 1 The picture of flow patterns in the horizontal cross-section near the water surface

なお、実験方法および写真撮影結果の解析方法の詳細については、著者ら⁶⁾の「大規模乱流構造の可視化と解析(2)」を参照されたい。

3.4 複断面蛇行流れの流況特性と流速分布

Fig. 10 は、水面近傍の断面内の流れに対して写真に写し込まれたトレーサーの軌跡を描いたものである。図において黒丸はその軌跡の始点を表わしており、また高水敷の位置が実線で示されている。流れは図の左から右へ向っているが、ここで本図が流下方向に 10.75 cm/s の速度をもつ移動カメラによって撮影された結果であることに注意する必要がある。

Fig. 11 は、**Fig. 10** をもとにしてそこでの各流速ベクトルに包絡する曲線、すなわち流線を計算により求めた結果である。これは水面での平均流下方向流速で移動する系から見た流況を示しており、上流向き（左向き）の流線は平均流速より流速が遅いことを意味している。本図においては、低水路内に発生する水平渦と、高水敷の下流側の角（図において○印が付けられている）付近から斜め下流方向に連続的に発生する流線の集中、さらには高水敷の上流側の縁に沿って下から湧き上げてきて発散してゆくような流況が認められる。これらのうち、このような渦運動と連続的に集中して沈み込んでゆく流れとは実験中にもはっきりと観察された。

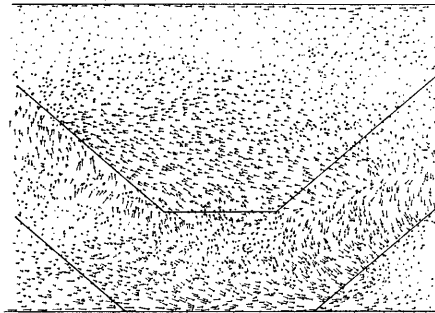


Fig. 10 The images of trajectories of tracers near the water surface

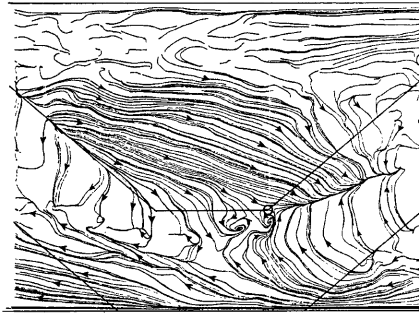


Fig. 11 The pattern of streamlines viewed by the observer moving at the mean velocity of the flow, in the horizontal cross-section near the water surface

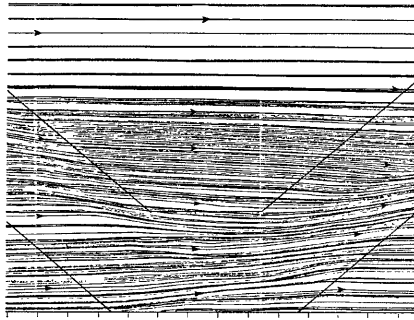


Fig. 12 The pattern of streamlines viewed by the still observer, in the horizontal cross-section near the water surface

Fig. 12 は静止した系から見た場合の水面における流線を計算により求めた結果である。本図においては、流線が水路流下方向とずれるのは低水路内のある限られた範囲内であって、水面における流線は全体として水路流下方向に対してかなりの直進性をもつことを示している。

Fig. 13 は、水面での平均流速で移動する系から見た場合の流下方向流速成分 u の分布を示したものであり、等値線の間隔は 0.5 cm/s となっている。本図によると、水面における u の値が低水路内よりもむしろ高水敷上で大きくなっていることがわかる。また、流速 u が最大となる部分は実験水路のほぼ中央部に当てっており、最大流速部を流下方向に連らねてゆくとほぼ直線的となり、先述の Fig. 5 に示した木下の実験結果と同様の傾向を示している。ただ、流心線の位置が木下の場合には低水路内にあり、本実験においては高水敷に乗り上げているが、これは低水路の平面形状の差によると考えられる。

以上から今回の三隅川の洪水時のような法線形状、水理条件の下では、流心線は低水路の蛇行にはそれほど支配されずに河道の蛇行部を短絡するような形で配置されるようであり、そのために流心線が高水敷に乗り上げた所で破壊や局所洗掘、土砂運搬などがとくにひどく生じたものと考えられる。

つぎに、高水敷面と同じ高さからそれよりも約 3 mm 低い高さまでの範囲内の水平断面内の流況について検討する。

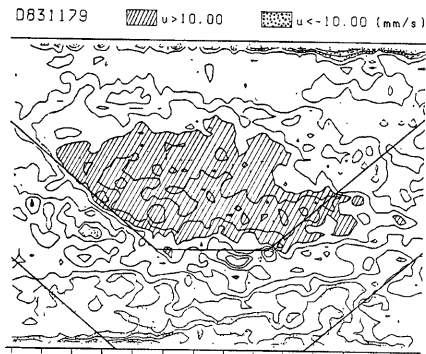


Fig. 13 The distribution of the downstreamward component of velocity subtracted by the mean velocity, in the horizontal cross-section near the water surface

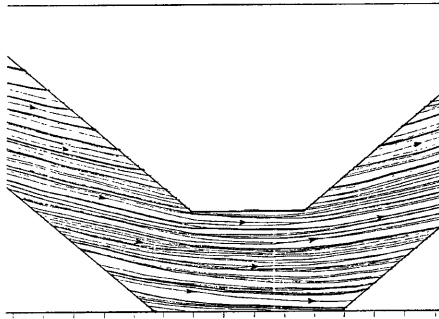




Fig. 14 The pattern of streamlines viewed by the still observer, in the horizontal cross-section at the height of half of the water depth

Fig. 14 は静止した系から見た場合の流線を計算機により描いた結果である。ここでの流線は、先の水面近傍の場合と比較すると、低水路の蛇行の影響によりかなり曲っているが、高水敷の上流側や下流側の縁に沿う部分で流線が大きく変化する様子は認められない。このことから、高水敷の上流側では流れが低水路から高水敷上へと上昇してゆき、高水敷の下流側では流れが高水敷上から低水路内へ流入してゆくことがわかる。このように水路の縦断面内においては、低水路から高水敷上へ向かう流れは集中し、高水敷から低水路へ流入する流れは発散するため、Fig. 13 に示したように、高水敷上で流下方向流速 u が大きくなる。

Fig. 15 は、上と同じ断面内での流下方向流速成分 u の分布を示したものであり、等値線の間隔は 0.5 cm/s となっている。なお、本図は水面での平均流速よりさらに 2 cm/s 遅い流下方向流速 (8.75 cm/s) で移動する系から見た場合の結果である。本図から、低水路内においては低水路の凸岸側の近傍で u の値が大きく、低水路の凹岸側で u の値が小さくなっていることがわかる。この結果は先述の木下の実験における低水路近傍での表面流速の観察結果とよい対応を示している。また、 u が大きくなっている部分は流下方向に連なっているが、 u が相対的に大きな部分を破線で連ねるとそれらが横断方向に一定間隔で配置されていることが注目される。これは低水路内の流れのもつ三次的な特性の現われと考えられる。

D831121  $u > 10.00$  $u < -10.00 \text{ (mm/s)}$

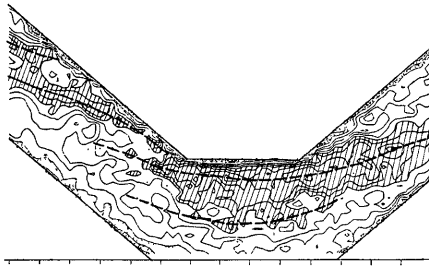


Fig. 15 The distribution of the downstreamward component of velocity subtracted by 8.75 cm/s , in the horizontal cross-section at the height of half of the water depth

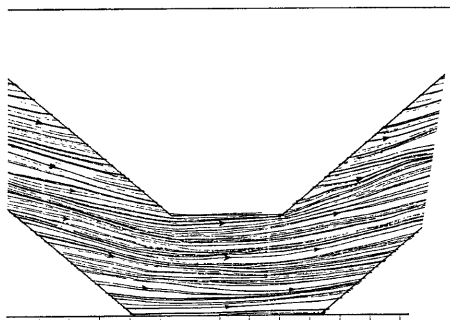
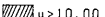
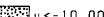


Fig. 16 The pattern of streamlines viewed by the still observer, in the horizontal cross-section near the channel bed

0831199  $u > 10.00$  $u < -10.00$ (mm/s)

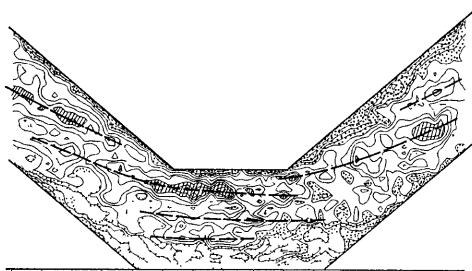


Fig. 17 The distribution of the downstream component of velocities subtracted by 8.75 cm/s, in the horizontal cross-section near the channel bed

最後に、低水路の水路床面近傍の流況について検討する。

Fig. 16 は、静止した系から見た場合の水路床面近傍における流線を計算機により描いた結果である。先の高水敷面近くの水平断面内の流況と同様にこの位置での流線にもかなりの曲がりが見られるが、両者を比較すると、水路床面近傍の断面内の流線の曲がりの度合はさらに大きくなっており、それだけ低水路の蛇行の影響を強く受けていることを意味している。

Fig. 17 は同じく水路床面近傍の断面における流下方向流速成分 u の分布を示したものであり、等値線の間隔は 0.5 cm/s となっている。なお、本図は **Fig. 15** の場合と同様に水面での平均流速より 2 cm/s 遅い流下方向流速で移動する系から見た場合の結果である。本図においては、低水路の凹岸側での u の値は小さくなっており、それを低水路の凸岸部近傍での u の大きな値と比較すると、約 5 cm/s の差がある。また、**Fig. 15** の場合と同様に、 u が相対的に大きくなっている部分を破線で連ねると、それらの配置には一定の規則性が存在することがわかる。

3.5 複断面蛇行流れの三次元的な構造

上記の検討によって、低水路内においては流速分布に一定の規則性が存在することが明らかとなった。こ

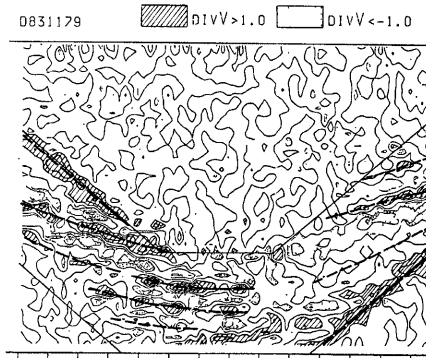


Fig. 18 The distribution of the two-dimensional divergence in the horizontal cross-section near the water surface

ここでは、このような特性がどのような流れの構造によってもたらされているかを明らかにするために、流体の上下方向の運動について検討することとする。

Fig. 18 は水面近傍の水平断面における二次元発散の分布を示したものであり、等値線の間隔は $1.0 (1/s)$ となっている。図から二次元発散の正の領域あるいは負の領域は（水路の流下方向とある角度を有しながら）流下方向に連なっており、それらは水路横断方向には交互に配列されていること、および高水敷の上流側の縁に沿う部分で二次元発散の値が大きくなっていることがわかる。二次元発散が正の部分はその断面内へ流れが供給されていることを意味するから、水面近傍においてはその部分で上昇流が発生していることになる。図においては、上昇流の発生する部分を破線で連ねてある。

Fig. 19 は水路床面近傍の断面における二次元発散の分布を示したものである。本図においても水面近傍での結果と同様な傾向が現われているが、水路床面近傍においては、二次元発散の値が負となっている所でその断面内から流体が出てゆくこと、すなわち上昇流が発生していることになる。図においては上昇流の発生する部分を破線で連ねてある。

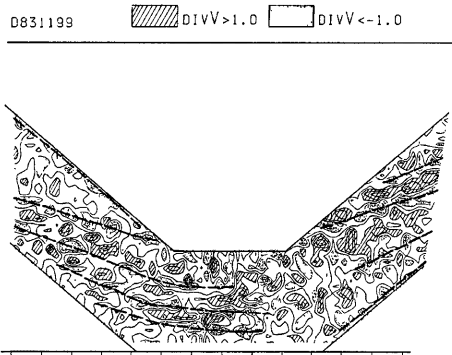


Fig. 19 The distribution of the two-dimensional divergence in the horizontal cross-section near the channel bed

そこで、Fig. 18 と Fig. 19 とを重ねてみると、上昇流の発生する部分がびったり一致することがわかる。また本実験においては、水面における写真撮影と水路床近傍におけるそれとは異なる時間帯に行われているから、このような流れの構造は時間的変化も少なく非常に安定したものであると言える。そして、このような上昇流の発生している部分の一つは、高水敷の上流側の縁に沿う場所にあり、ここでは安定した上昇流が発生していることがわかる。複断面蛇行流れの張り出した高水敷の上流側の部分において低水路から高水敷上へと乗り上げてゆく流れについては、すでに木下はその三次元流況の測定に基づいて先述の Fig. 6 に示されるような説明を与えている。

一方、上記のように上昇流が規則的に配列されている部分に注目すると、そこでは二次元発散の分布から、各上昇流の間では下降流が発生していることになるから、下降流もまた水面と水路床近傍の同じ位置で発生することになる。また、上昇流が発生している部分どうしの横断方向の間隔は約 3.5 cm となっており、これは水深 (1.6 cm) の約 2 倍に相当する。以上の検討結果から、低水路内においては水深全体にわたる斜め方向の軸をもつ並列したらせん流が発生していることがわかる。そして、このような並列したらせん流の存在が、Fig. 15 および Fig. 17 に示されるように流速分布に規則的な特性をもたらしたのである。

つぎに、このような並列らせん流の発生について考察する。Fig. 12 の水面における流線図と Fig. 16 の水路床近傍のそれとを重ね合せて見ると、両者の流線の間にはかなりの流向のずれがあることがわかる。そして、両者の流向のずれが最も大きくなっているのは、Fig. 11 に現われているような高水敷の下流側で流れが集中して沈み込んでゆくような部分に当たっている。一方、Fig. 18 および Fig. 19 において上昇流や下降流の流下方向のつながりが明確でない部分においては上下層の流向のずれは小さくなっていることがわかる。以上から、低水路内における上下層の流向のずれがこのような斜め方向の軸をもつ並列らせん流の発生に密接に関連していると言えよう。

三隅川の河岸段丘上を 4~5 m の水深をもって流下した今回の洪水においても、河床近くの流れと水面近くの流れとは上記のような流向のずれが存在し、このような並列らせん流が発生したと推測される。

破堤や河岸の洗掘、さらには護岸の破壊にこのような特徴的な流れがどのように関与したであろうか。例えば、このような並列らせん流の沈み込んでゆく位置では水面における流木の集中が起ると考えられるが、流木が集中して流下する場合には堤防や橋梁に対する破壊力も増大するであろう。これらについては今後の重要な検討課題である。

4. 結 語

以上、三隅川の中・下流部における現地調査と災害直後の航空写真の観察結果に基づいて、昭和58年7月の洪水による河川構造物の被害の実態を明らかにし、さらにこれらの被害と洪水時の流れとの関連を基礎実験を通じて検討した。主な結果をまとめるとつぎのようである。

① 三隅川においては、今回の洪水によって堤防より 1~2 m 高い水位を記録し、堤内地の浸水深は 4~5 m にも達して洪水は谷幅いっぱいにわたって流下した。

② 三隅川の下流部においては堤防や護岸の配置に各地区で共通するパターンが認められ、それにとまって堤防や護岸の被災状況にもほぼ共通するパターンがあることが明らかとなった。

③ 橋梁の被災には、橋梁の標高と洪水水位との関係、河道の線形と橋梁の位置との関係、橋梁の規模や構造などが関与していることが明らかとなった。

④ 今回の洪水時の流況を直線水路内における複断面蛇行流れとしてモデル化し、流況を可視化観測した。その結果、水面での流下方向流速は低水路内よりもむしろ高水敷(堤内地に相当する)上で大きくなり、また水面での流れは低水路の形状に強く支配されることなく、流線や流速分布については流下方向に直線的な特性をもつことが明らかとなった。そして、災害との関係ではこのような高水敷上で大きな流速をもつ流れが、洪水時には破堤や堤内地の洗掘ならびに土砂礫の運搬に寄与したと考えられる。

⑤ 上記の実験においては、張り出した高水敷の上流側の縁に沿って低水路内から高水敷上へと乗り上げてゆく流れが発生していることが明らかとなった。

⑥ また、低水路内においては水深全体にわたる斜め方向の軸をもった並列したらせん流が安定して発生していることが明らかとなった。

上記のような実験によって明らかにされた流れの構造と河川構造物の被害との関係については、今後さらに検討を深めてゆく必要がある。

なお、本研究は文部省科学研究費、自然災害特別研究突発災害研究「昭和58年7月山陰豪雨災害の調査研究」（研究代表者、京大防災研究所角屋陸教授）の補助の下に行われた。すなわち、この調査研究の一環として「三隅川の洪水災害」に関する調査研究グループ⁷⁻⁹⁾が京大防災研究所村本嘉雄、河田恵昭、藤田裕一郎、大久保賢治、中川一の諸氏ならびに著者らにより組織された。本研究はそのグループによる調査研究の結果のうち、著者らが分担した課題についてまとめたものである。調査研究に当っては、村本嘉雄教授をはじめとする同調査研究グループの諸氏には貴重な助言や御協力をいただいた。また現地調査に際しては、被災直後の多忙と困難のさ中にもかかわらず、島根県土木部河川課、三隅町役場、そして現地の皆様には積極的な御協力を賜った。本研究を進める上では、木下良作博士の研究から多くの示唆を受けた。末筆ながら深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 角屋 陸・岡 太郎・増本隆夫・田中礼次郎・今尾昭夫・福島 晟：島根県西部河川の洪水流出特性、自然災害特別研究突発災害研究成果，No. B-58-3，昭和58年7月山陰豪雨災害の調査研究，1984，pp. 99-109.
- 2) 木下良作：利根川下流部の洪水三次元流況の実験的研究，建設省利根川下流工事事務所，1981.
- 3) 木下良作：「写真測量法」による河川および模型水路の流速測定，流れの可視化，Vol. 1，No. 3，1981，pp. 36-43.
- 4) 石川忠晴・須賀逸三・湯城豊勝：複断面河道湾曲部の流況に関する研究，土木学会第36回年講，1981，pp. 307-308.
- 5) 大原資生・三浦哲彦・会田忠義・村田秀一・松田 博：道路・鉄道災害，自然災害特別研究突発災害研究成果，No. B-58-3，昭和58年7月山陰豪雨災害の調査研究，1984，pp. 87-97.
- 6) 宇民 正・上野鉄男：大規模乱流構造の可視化と解析(2)，京都大学防災研究所年報，第26号B-2，1983，pp. 461-476.
- 7) 村本嘉雄・藤田裕一郎・大久保賢治：三隅川の洪水災害(1)——堤内地の侵食と堆積，自然災害特別研究突発災害研究成果，No. B-58-3，昭和58年7月山陰豪雨災害の調査研究，1984，pp. 110-127.
- 8) 河田恵昭・中川 一：三隅川の洪水災害(2)——洪水氾濫と家屋の被害，自然災害特別研究突発災害研究成果，No. B-58-3，昭和58年7月山陰豪雨災害の調査研究，1984，pp. 128-139.
- 9) 上野鉄男・宇民 正：三隅川の洪水災害(3)——河川構造物の被害と洪水の流況，自然災害特別研究突発災害研究成果，No. B-58-3，昭和58年7月山陰豪雨災害の調査研究，1984，pp. 140-153.