

洪水と流路形態の現地観測

木 下 良 作

はじめに

沖積河川を地形学的に分類して、1) 扇状地河道 2) 中間地域河道 3) デルタ地域河道 に分けることは良く知られている。¹⁾ 各地域の河道にはそれぞれ顕著な特性があり、河川工学的にもその性質をよく識別することは重要である。

“洪水と流路形態の現地観測”という題を与えられ、1) の扇状地河道については現在進められている一つの現地観測の状況を述べ、2) 3) の河道についてはここ十数年来行われている航空写真測量の結果の中から二、三の例を述べた。流路形態としては中規模河床形態としての“砂レキ堆”に主点をおく外、若干他の例についてもふれ、また現地観測の結果を理解する手段としての、水路実験についての説明も加えた。“現地観測”ということに力点をおけば、実施面でとり上げるべき問題が多いが、ここでは省略した。

1. 網流河道の洪水時の砂レキ堆挙動観測

1.1 網流河道と複列砂レキ堆

沖積扇状地などでよく見られる、水流が網の目のように分れた流路の状態は、一般に、網流河道とか網状流路と呼ばれている。自然のままの場合と、人為的に堤防で囲われた河道では、流れの拡がり方が違って、そのため洲の発達や固定、その浸食、そして流路全体のパターンの変化のあり方などに、若干の相違があらわれるかもしれないが、しかし基本的には共通する課題が多いと考えられる。わが国では現在、自然なままの河道が少なく、河幅が規制される改修河道内での網流現象が、主として問題にされている。

沖積面は本来、大洪水時には一面冠水しつつ発達するので、したがって“網流”という景觀には、流量変動を加味して考えざるを得ない。一方筆者はかねて洪水時の扇状地河道の流況を観察して、²⁾ 洪水最中に“砂レキ堆”が形成されつつ水流が蛇行することと、幅広い扇状地河道では、それが複列である場合が多いことを指摘してきた。³⁾ 複列砂レキ堆形成河道で減水すれば、流れは多数の蛇行水流に分れることになり、網流化する。しかし急流河道では洪水時、明らかに単列砂レキ堆形成の一本の蛇行水流が卓越しても、減水すると多数の細流が生じ、網流化する場合がある。網流という流路形態は、不定流効果による砂レキ堆の変形と考えてきた筆者は、レオポルド等の直線、蛇行、網流という形態分類⁴⁾とは、見る立場を異にしてきたといえる。しかし最近の玉井、長尾、三国らの実験的研究⁵⁾にみられるように、定常流でも異粒径の混合効果で網流状態が継続的に現れることがあるらしいなど、筆者にはまだ分らないことが多いが、ここではその定義の論究よりも、現地観測の結果を述べることにし、用語の若干の曖昧さは残しておくことにする。

1.2 扇状地河道の改修

河道改修ということは、その流域における人間の住まい方との関係において、常に新しく問題にされてゆく。扇状地河道の改修も、扇状地土地利用の古さから、その歴史は古いといえようが、一方現代においてその河道改修は、最も力が入られている部分の一つであるといえよう。扇状地河道は、河川行政と砂防行政の接点に位置し、その双方において取扱われているが、近年著しく事業費の伸びた砂防部門でみても、国と地方の全事業費の50%以上が、扇状地流路工に関係しているといわれる。

そして最近は大規模な扇状地模型実験も、その施工計画の過程でとりいれられるに至った。

扇状地河道改修上の問題は、山地流域からの土砂流出量の適切な調節がその前提ではあるが、流路幅や河道法線の決め方など、問題は数多いといえよう。また急流なので、護岸水制工法の選択も大切な問題となる。戦後の昭和20年代、新しい様々なコンクリート工法を護岸、水制、根固工にとり入れられた故橋本規明博士も、折角の施工が流路の変動で水裏になる、扇状地河道の不安定性を嘆き、普通河川の低水路の形とまではいかないが、“常水路”という新しい用語を設けられて、その安定化を図る工夫はないものかと、その著書に述べられている⁶⁾。この流路の安定問題は、大型模型実験を行う際の一つの重要な視点ともなるものであろう。

単断面・単列砂レキ堆形成河道の砂レキ堆（水流蛇行）の位置安定化は、近年の研究で、ほとんどその流路の平面形が支配することが明らかになったが（2.3で述べる）、複列砂レキ堆、あるいは網流河道ではどうなのだろうか、扇状地河道の洪水時の流況を、適確に捉える方法はないものか、ということが問題になる。そしてその観測こそは、本来大型模型実験にとりかかる前に実施すべき、最も重要な調査ということが出来よう。

1.3 洪水時の砂レキ堆挙動観測計画

河川、中・下流部の洪水時の観測は、後述のように近年航空写真測量が利用されるようになって、多くの成果が挙げられはじめた。その水流の蛇行性の実態も、流向・流速分布から明らかになり、水深に対応する流れの表面の乱れ特性の解析から、逆にその水深分布も判明し、河床の砂レキ堆形成とその動向が、次第に把握できるようになってきている。

しかしこの方法を扇状地河道にも利用しようとする、山からの出口にあたる扇状地河道の洪水は、荒天の最中である場合が多く、航空機の飛来は殆ど不可能である。また急流で水面には大きな波が立ち、従来の方法による表面流速・流向の写真測量は応用できない。それで筆者は次の点に着目し、まず砂レキ堆形成とその挙動を観測する計画をたてた。

砂レキ堆が形成されている流れの水面を注意深く眺めると、砂レキ堆の前縁がひろがる付近に僅かな水位の段落が生じ、勾配の急な、いわゆるRiffle faceと呼ばれる線條が、砂レキ堆前縁の平面形に対応して水面にあらわれる。またその浅瀬をこえて深まった流れの部分では水面は平坦になり、このように砂レキ堆の三次元形態と相関的な水流の表面の波の立ち方には微妙な差違があらわれて、水面を斜めに見るときに、空の反射の作用で一層それが際立って見えることになる。これは流れが常流でも射流でも、それぞれに砂レキ堆に対応して水面形の差違があらわれることは、写真-1～3にみられるとおりである。このことはそれ自身一つの研究対象であるが、ここではそれを利用する立場に立つ。そしてこれを地上斜め写真によって捉え、刻々に変化してゆく状況を記録して、それを写真測量



写真-1 笛吹川、水底のウロコ状砂州、
水流は複列蛇行

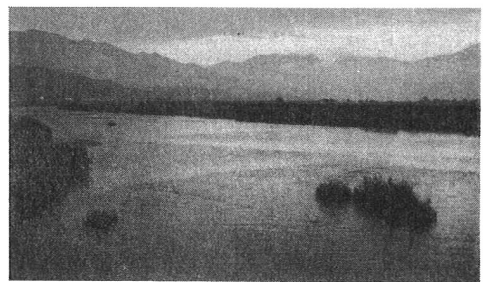


写真-2 笛吹川、水底のウロコ状砂州に対応して
あらわれる水面の流紋

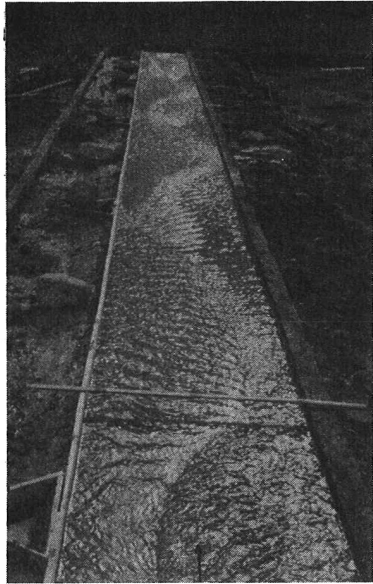


写真-3 実験水路，射流で単列砂レキ堆ができたときの水面の流紋

により，平面図に展開しようというものである。

一と口に扇状地網流河道といっても，勾配数百分の1の河道と数十分の1の河道では洪水流況にも差違がみられるので，勾配のゆるい側から着手することに決め，諸種の事情を考えて，大井川を最初の観測対象河川に選定した。大井川の網流は古来有名であり，幾多の紀行や詩歌にその状況が描かれているとおりである。大井川では現在牛尾地区狭窄部の開削計画が検討されており，開削後の下流の流況変化の予測も重要な調査項目である。その調査に関連してこの観測は，中部地建静岡河川工事事務所とアジア航測㈱および筆者の協力で行われることになった。

観測地点は写真-6の左下隅にみられるような，牧の原台地の縁辺であり，斜面の傾斜角 38° 河床面との標高差90mの絶好の眺望をもつ地点である。この付近の大井川は，河床勾配 $1/200$ ，河幅約1,000 m，砂利採取は現在行われておらず，戦後流量記録に明らかな最大の出水は $5,380\text{ m}^3/\text{s}$ （昭和40.9.18）である。

1.4 観測経過

観測初年度の昭和51年は，現地待機2回，計4回の写真撮影（普通カメラ，ニコンF4回，写真測量カメラ，ツアイスCⅢB1回）を行ったが， $800\text{ m}^3/\text{s}$ 程度の出水でしかなかった（写真-4）。52年度は8月18日，前線と熱低による大雨で約 $2,700\text{ m}^3/\text{s}$ の出水を見，当日毎30分観測，後9日間にわたって計17回（写真測量カメラは9回）の観測を行った（写真-5）。9月上旬に再び若干の増水があったが，9月17日，観測河域の垂直航空写真を撮影した（写真-6）。



写真-4 大井川，昭和51年9月11日小出水，観測地点より撮影写真（部分を示す）

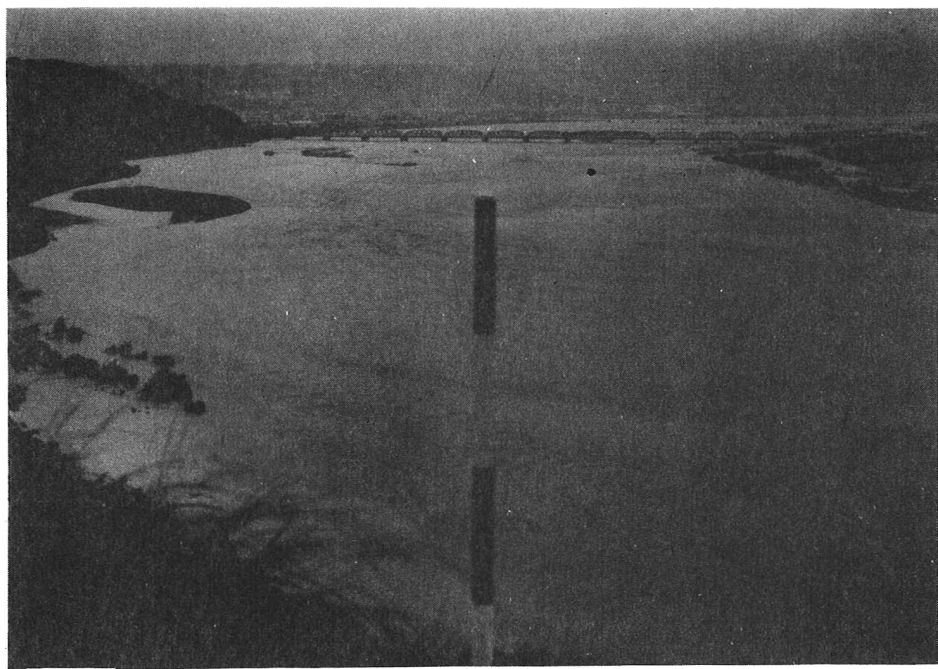


写真-5 大井川，昭和52年8月18日18時，流量ピークを若干過ぎた時点の観測写真（部分を示す）。ウロコ状の流紋が明瞭に看取される



写真-6 減水後の大井川の網流，昭和52年9月17日撮影航空写真

写真-5にみられるように，今回の洪水で，河道はほぼ全域洪水流に覆われたが，ふだんの複雑な網流河道の上には，スッキリとした単純な“ウロコ状（複列）砂レキ堆”の配列を示す波紋（Riffle face）があらわれた。そしてそれは観測をつづける中，しだいに流下前進してくるよう感じられた。減水して各砂レキ堆の頂部が洲となって現れ出すと，分れだした流れは二次，三次の部分的な小さな砂レキ堆を形成しつつ小蛇行し，あるいは側面を浸食しながら，細部の複雑な変形を進め，新しい“網状流路”に戻った。

1.5 地上単写真測量による流紋の平面図展開

解析は，出水前の状況を示す51年の1時点と，52年出水から4時点の写真を選んで，計5枚の流況平面図を作成した。

単写真による平面図作成手順は，i)伸縮の少ないAKポリグラフ5倍伸し写真作成，ii)その上に x ， y ， z 既知の標定点刺針，および流況を示す水面上の選点と刺針，同番号づけ，iii)各刺針点の写真面上の x ， y 座標値の計測，iv)各写真の撮影時点の水位・水面勾配および方向の決定，v)電算機による流紋各点の三次元座標の演算，vi)展開機による各点の平面図展開，vii)流況を示す各点の結線作業を行う，であ

って、ii)の流況を示す水面上の選点と、vii)の同結線作業は、作業者の流れを理解する能力に応じて表現の程度が変わるという性質も含んでいる。

1.6 洪水時の砂レキ堆形成とその変化

5回の流況平面図を重ね合わせると、図-1となる。これには河岸や構造物等の表現は簡略化して

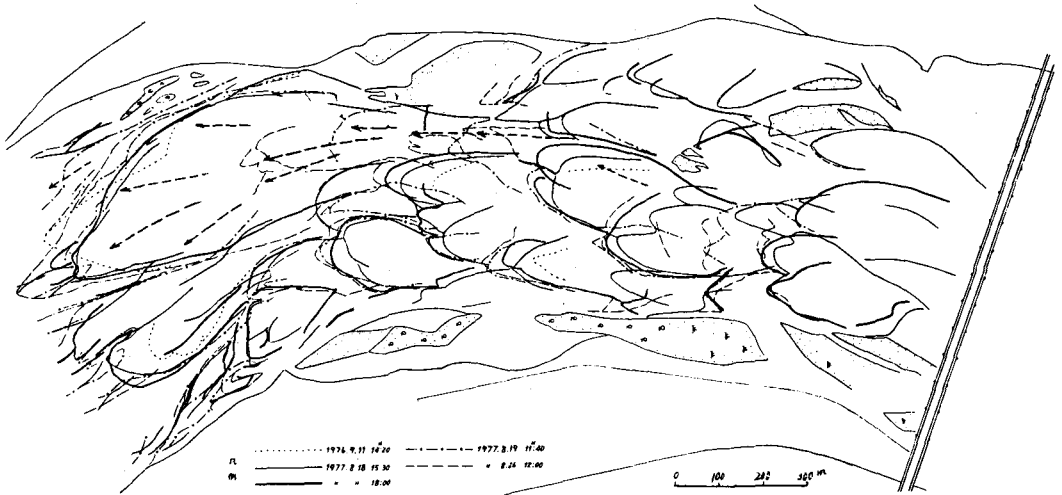


図-1 測定された大井川のウロコ状流紋とその移動。点線は51年9月の砂レキ堆位置、細実線は52年8月18日15時30分ほぼ流量ピーク時の流紋、太実線は写真5の状態を示す。鎖線は減水中の8月19日の流紋、破線はかなり減水した8月26日の流紋と砂レキ堆位置を示す

あるが、各図面とも適合性はよく、精度は良好であった。各写真の流況判断はそれぞれ行い、各写真の関連性は作業時点において全く考慮していないが、重ね合わせるとそれらがリーズナブルなパターンを示すことが認められ、また時間的に明らかに流下前進する傾向を示した。今回のその前進量は、動きの活発な砂レキ堆群で、それぞれ100m前後であった。図中の最も太い実線は、写真-5の状態を示すものである。

写真-6から河床形態を精密に写真測量し、図-1との関係を詳細に検討中であるが、大井川において現時点で指摘されることは次の通りである。

- 複雑な網流河道でも洪水時には、かなり整然とした砂レキ堆形成を示すことが確認された。
- それらは洪水時に刻々流下、変形した。
- 定常流における(複列)砂レキ堆形成実験でも、大きな砂レキ堆の先端ともいえる、前縁のひろがりの部分では、幾つかの流れに分れ勝ちであるが、それと似たような形態が認められた。流れの分れ方が均等でなく、ある前縁部分は早く前進・発達したりして、砂レキ堆の変形が進むのみでなく、全体の砂レキ堆配列のパターンも変形してゆく。
- 流量減少期のその河床変形に及ぼす影響は、しだいに細部に限定されてゆく。したがって洪水後の河床形態をマクロに見れば、洪水時の流況と砂レキ堆形成状況は、ほぼ把握できる。(その後小出水が繰り返されれば、マクロな形態の破壊は進む)

1.7 これからの問題

大井川のこの調査は、53年度でさらに解析が進められる予定であり、また新たなる出水と河床変形について、観測が継続される予定である。詳細な結論は今後に期待されるが、今述べたことだけでも、大井川の今後の河道平面計画上に役立つ多くのことが見出されたといえよう。これからの模型実

験上の一指針となるばかりでなく、基礎的実験研究への期待も高められる。河道平面計画の観点でいえば、複列砂レキ堆形成河道では、砂レキ堆位置の安定化は殆んど図れないので、巨大な流勢集中(写真-5、図-1にもみられる。この位置も不安定)を起さぬよう、河幅は広く、法線は極力直線化が望ましいというのがその一つの見解となる。(法線蛇行化による“常水路”の安定化は、巨大集中の定常化ということになる)

先述のように同じ扇状地網流河道でも、勾配が強まると、例えば恐竜の背びれのような波状跳水が盛んに発生して、その影響が砂レキ堆の不安定の側に、さらに加担するようになる。したがって今後、より急勾配の河道における洪水時観測計画をするとともに、基礎的実験により、その理解を先行させてゆく必要があるであろう。

2 中・下流部河道の洪水の航空写真測量

2.1 洪水流航測の経過と主要な問題点

わが国における洪水流航測の経過は、表-1の如くである。この中には所期の目的に達しなかった

表-1 洪水流航空写真撮影一覧表

No	地 方	河 川	年 月 日	出水原因	撮影業者	No	地 方	河 川	年 月 日	出水原因	撮影業者
1	北海道	石 狩 川	昭. 27 36. 7. 28	低	P	22	北 陸	信 濃 川	44. 8. 9	前 線	T H
						23	"	黒 部 川	44. 8. 12	"	T H
						24	"	常 願 寺 川	"	"	T H
2	四 国	吉 野 川	38. 8. 10	台. 9	H	25	北海道	石 狩 川	45. 5. 15	低	
3	北 陸	阿 賀 野 川	38. 8. 30	(渇水)	K						
4	"	"	39. 4. 14	低・融雪	A	26	関 東	利根川(下)	46. 9. 2	台. 23	H
5	九 州	大 淀 川	39. 9. 25	台. 20	H	27	"	江 戸 川	"	"	A
6	四 国	大 吉 野 川	"	"	H	28	北 陸	江 信 濃 川	46. 9. 8	台. 25	A
7	中 部	長 良 川	"	"	D						
8	"	榑 木 曾 川	"	"	D	29	近 畿	淀 川	47. 9. 17	台. 20	A
9	"	"	"	"	D	30	関 東	利根川(上)	"	"	A
						31	"	江 戸 川	"	"	A
10	九 州	筑 後 川	40. 7. 7	前 線	H	32	"	利根川(上)	47. 9. 18	"	H
11	"	球 磨 川	"	"	H						
12	近 畿	淀 川	40. 9. 11	台. 23	H						
13	"	"	40. 9. 18	台. 24	D	33	四 国	吉 野 川	49. 9. 9	台. 18	H
14	"	大 和 川	"	"	H						
15	北海道	石 狩 川	41. 4. 29	低・融雪	D	34	中 部	榑 良 川	50. 8. 23	台. 6	N
16	東 北	阿 武 隈 川	41. 6. 29	台. 4	D	35	"	長 木 川	"	"	N
17	"	北 上 川	"	"	D	36	"	木 曽 川	"	"	N
18	北 陸	阿 賀 野 川	41. 9. 25	台. 26	D	37	北海道	石 狩 川	50. 8. 24	"	H O
19	東 北	最 上 川	42. 8. 30	前 線	D	38	近 畿	淀 川	51. 9. 11	台. 17	K A
20	九 州	大 淀 川	43. 9. 25	台. 16	T	39	中 部	長 良 川	51. 9. 11 12	"	N
21	"	五 箇 瀬 川	"	"	T						

例もあるが、大洪水が詳細に捉えられた、貴重な例もまた少なくない。特に昭和50年の石狩川大洪水では、延長 5,000 m余にわたって堤防上より溢流している。そのほとんど流量ピーク時に、河道 70 kmにわたって航空写真が撮影されており、その迅速、広汎な成果には、まさに飛行機ならではの感を持たざるを得ない。

筆者が洪水流航測に着手して15年、その間にさまざまな問題に遭遇したが、現在研究は、次の三方向にシぼられている。

- ① 洪水時のフライトに関する問題：これが進歩しなければ、何よりも先ず情報が得られない。荒天に関連する洪水時のフライトとその運営の仕組みは、今に至るまで問題を含み、困難が多い。
- ② 洪水乱流構造の特性解明の問題：航空写真によって得られるデータは洪水流の表面の二次元流況であり、しかも時間的に変動するある瞬間的な姿である。したがってその意味するところを理解するために、流れの三次元流況と表面の二次元流況との関係、そしてその時間的変動特性へと研究は進まざるを得ない。特に流量に結びつけるためにもこの研究は欠かせない。
- ③ 河道計画、ことに河道平面計画への応用：この洪水流航測の発端は、中規模河床形態としての“砂レキ堆”の洪水時の挙動解明、すなわち洪水流の蛇行性の実態解明にあったが、その河道平面計画の研究に役立つことが期待される。

これらの中、①については脚注に關係文献を掲げた外、^{7)-4.5.6.10} ここでは論じない。③については次項 2.2 で簡単にふれ、そのつぎに②について最近の実験的研究の一部を述べることにする。

2.2 単列砂レキ堆の洪水時の挙動

直線のか緩い彎曲をもつ河道に単列砂レキ堆が形成されている場合、砂レキ堆の位置は年々下流に移動する。これに対しある程度以上の振幅をもつ（護岸された）蛇曲河道では、砂レキ堆の位置は安定化する。それらの河道で夫々洪水時にどのような流況があらわれたか、それを示すものが図-2～5である。この洪水流況は詳しい測定原図を著しく簡略化して表現したものであるが、要点は夫々その出水時点の形成砂レキ堆に対応した流況があらわれているということであり、⁸⁾ またこの二例の中間に、砂レキ堆が移動するか停止するかの限界がある、ということである。

三輪は實際河川の砂レキ堆の移動、安定と河道蛇曲角度との関係について多数の河川を調査し、図-6を得た。そして筆者との実験的研究によって、図-7に示す限界條件が明らかにされた。⁹⁾ 砂レキ堆が移動するか否かということは、蛇行水流の位置が動くかどうかということであり、河岸水衝部位置の安定・不安定という問題であって、それへの評価・対応をどのように選択するかは夫々の

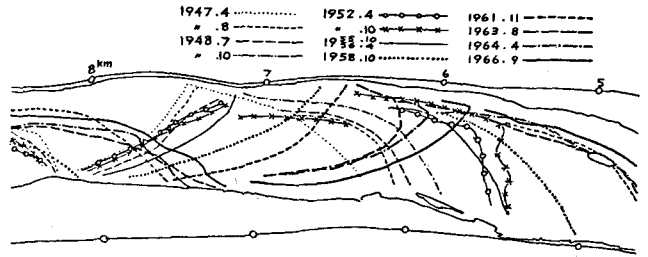


図-2 阿賀野川下流部の砂レキ堆の前進 (1947 ~ '66)

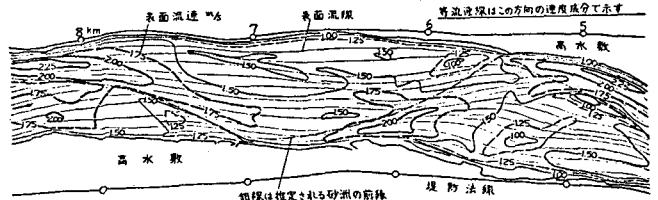


図-3 阿賀野川 1966 年 9 月出水時の表面流向・流速分布。このパターンと水深分布との関係は、出水中の明らかな砂レキ堆形成を示し、その位置は図 2 の 1966 年の位置に対応する。

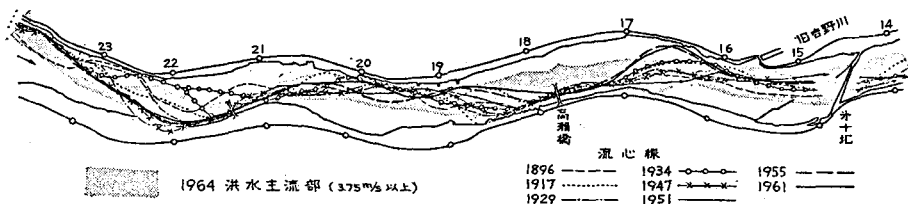


図-4 吉野川の低水主流心の変化と洪水主流部の関係。低水主流心に小変化はあっても、大局的には変動なく、洪水主流部とほぼ一致する。

河川において異なるとしても、これからの河道計画における平面法線形の検討上、一つの不可欠な視点が明らかになったというべきであろう。

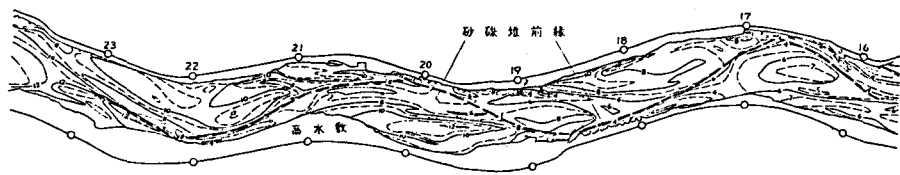


図-5 吉野川蛇曲河道の河床等高線（1961）と砂レキ堆位置の関係

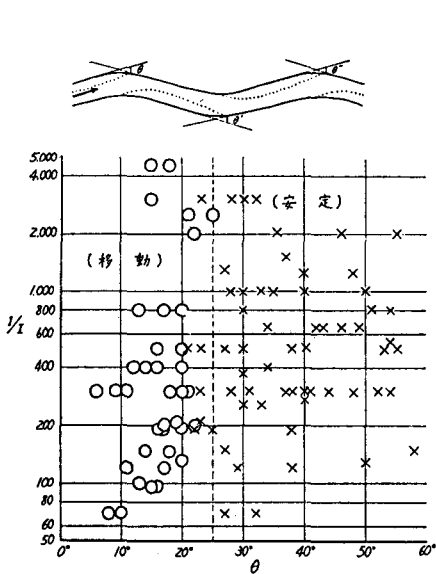


図-6 実際河川の砂レキ堆の移動・安定と河道蛇曲角度との関係（三輪 式）

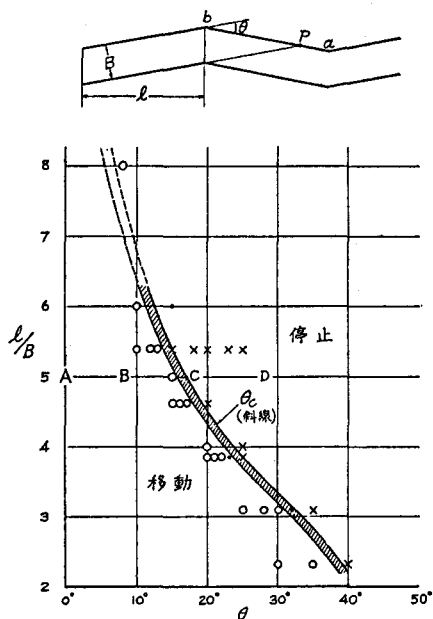


図-7 ジグザグ水路における砂レキ堆の移動・停止の限界角度と蛇曲波長の関係

なおこの問題は特に、先述2)中間地域河道において重要であり、3)デルタ地域河道においては河岸の安定度が高いために、別の観点も生じてくる。¹⁰⁾

2.3 航空写真にみられる諸種の洪水流況

これまで述べてきた洪水流況は、中規模河床形態に対応するあるスケールをもつ流れの動きについてであったが、航空写真にとらえられる映像は微細な部分にまで及び、判読も測定も、非常にこまかい段階までとり行うことが出来る。そのような眼で洪水流航空写真を観察すると、多様な興味ある現象が見出される。

写真-7は流れの合流する状況。表面の境界線は蛇行してゆれ動くとともに、双方の流れは互に下に潜ったり、上にかぶったり、立体的にも変動をくり返す。写真-8は中洲の後流にあらわれたカルマン渦。写真-9は凹岸に発達した巨大な渦、この河岸は深掘れも起しており、この流況について検討の要がある。凸岸下流に渦が発生流下する例は枚挙にいとまがない。写真-10は中央低水路内で両岸の水制が原因となって噛み合ったかとみられる大きな渦。この河道部分の粗度係数は異常に大きくなっている模様である。写真-11、橋脚の後流。流速低下は数kmに及ぶ場合も多い。写真-12、射流

を起して海に流入する河口の例。写真-13，一面に浮游する泡にあらわれたタテスジ。(次節で詳述)

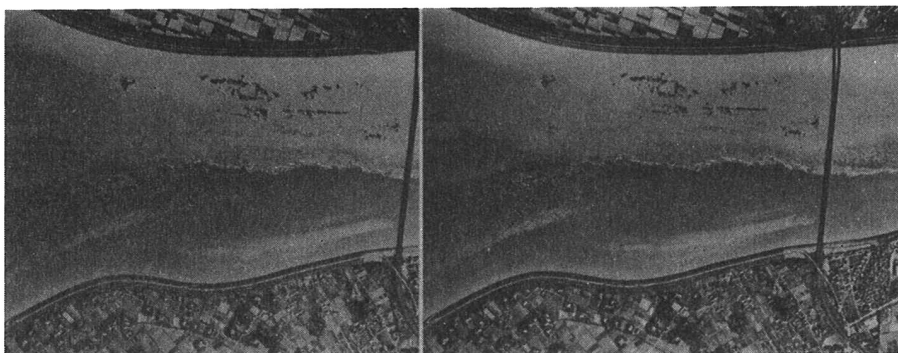


写真-7 利根川(下方)渡良瀬川(上方)合流点の1971年9月の洪水流況(利根川上流工事事務所)

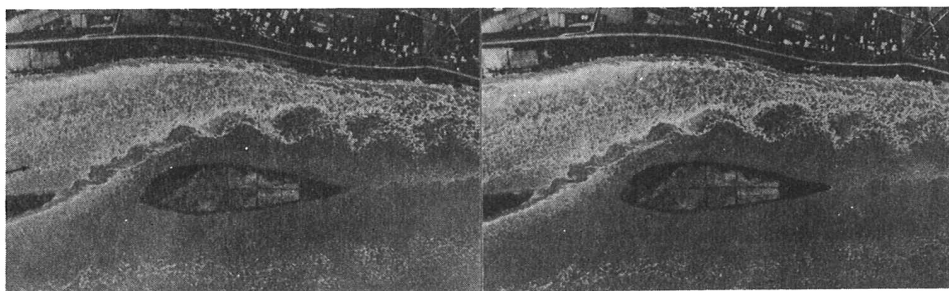


写真-8 阿賀野川1966年9月洪水にみられたカルマン渦列(阿賀野川工事事務所)

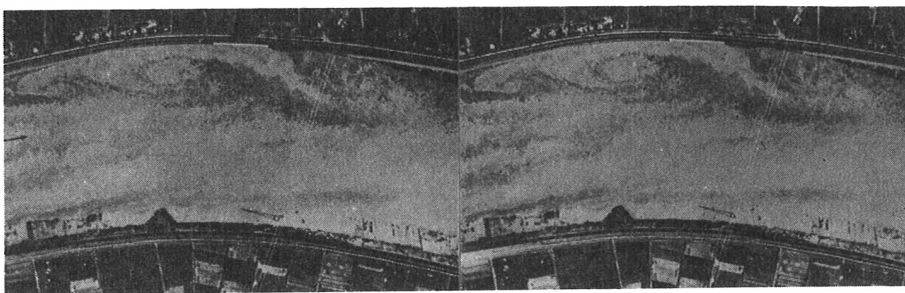


写真-9 利根川1972年9月洪水で、凹岸に発達した巨大な渦(利根川下流工事事務所)

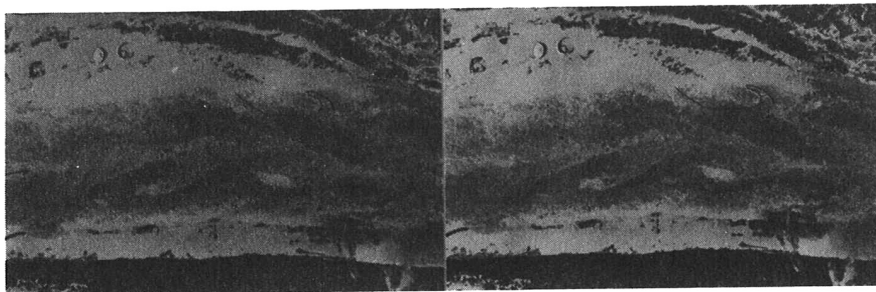


写真-10 低水路両河岸から発達して噛み合い、低水路一杯が渦でゆれ動く利根川1971年9月洪水の取手市付近の流況(同上)

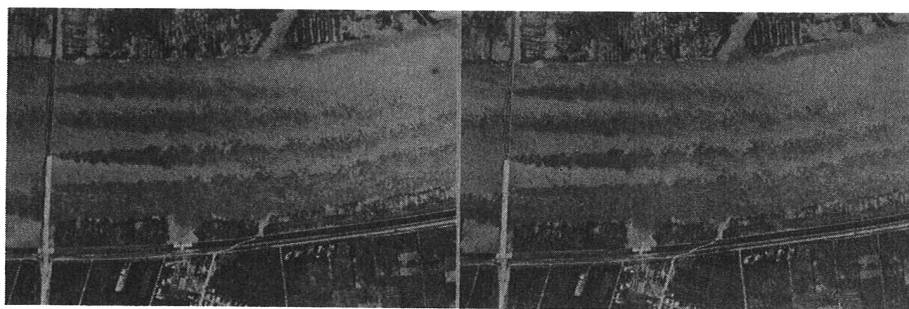


写真-11 橋脚の後流。利根川 1972 年 9 月洪水，小見川大橋建設中。(利根川下流工事事務所)

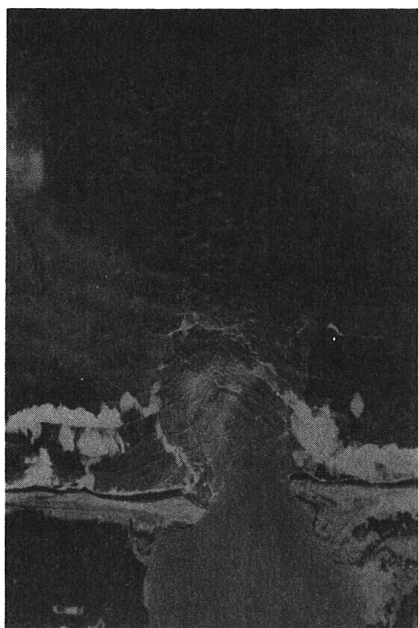


写真-12 阿武隈川河口，1966 年 6 月洪水ピーク時の流出状況（仙台工事事務所）

これらの写真で左右，対になっているものは，何れも 4～5 秒間隔で撮影されているため，表面の模様（濁度や泡による濃淡）の変形は小さく，対応はこまくなされる。すると流速の大小によるその位置変化の大小が，その視差の大小となって高度感に作用し，立体視するといわゆるカメロン効果による異常な高さ（又は深さ）に水面が変形してみえる。すなわち流速分布をスチール写真として一と目で見渡すことが出来るわけである。これらの流向・流速測定は，現行の写真撮影の仕様で，±10cm / s 程度の精度で行うことが出来る。

なおこれらの写真を眺めて注意すべきことは，何れも水深は水路幅の何十分の一，何百分の一という値であって，写真上の実長でいえば，1 ミリにも満たないほどの薄い流れである，ということである。写真-13 の場合，細かいタテスジの幅の $\frac{1}{2}$ が，その水深となる。

2.4 並列らせん流の実験的考察

前掲写真-13 のタテスジ模様は，これまでのあらゆる洪水写真に殆んど普遍的に見出されるものであって，

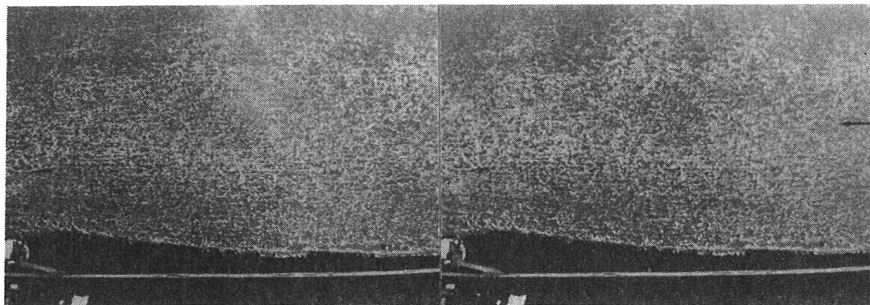


写真-13 阿賀野川 1966 年 9 月洪水，一面に浮んだ自然泡沫の分布にタテ縞が見られ，立体視するとその部分の流速が早く，沈んで見える。（阿賀野川工事事務所）

開水路流れの一つの基本的パターンであると考えられる。それを立体視すると、白い泡が連なるように分布する部分が早く、その中間の泡の少ない部分が遅いことが歴然とする。この測定結果や若干の考察は、脚注^{7)-2,3,5}などに既にしるしてあるので繰り返さない。

実験水路において、どのような場合にこれと似た表面流況が起こるかを試みた結果^{7)-8,9,11)}は次の通りである。水深に対して十分に幅広い流れで平坦固定床の場合の表面流速分布を写真測量すると（実験A）、そこにも水深のほぼ2倍の間隔で並ぶ、流速の早いスジがあらわれ、アルミニウムの粉末等を散布すると、そのスジに多く集まり、その中間の流速の遅い部分では湧き上がってくる流れがあってアルミ粉は押しわけられ、分布性が少ない。すなわち洪水流のそれに、既に似た性質があらわれるのであるが、しかし洪水流にみられるほど、流下方向にその連続性は良くない。またゆれ動き、その位置の変動性が大きい。

固定床水路で底面に、水深の2倍の間隔で生子トタンのようなタテ溝をつけると（実験B）、流れ表面のタテスジは顕著になり、連続性も増し、位置的安定性も増す。同様の溝を90°方向転換して洗濯板のようにつけると（実験C）、Boilの発生は顕著になり、タテスジも水深 h の2倍幅程度に出来るが、位置的動揺は甚しい。同様の溝を45°傾けて片流れとすると（実験D）、流れの横断面全体にSpiralな動きが起こり、水面は底面と反対の斜め方向にゆるく、片流れの傾向をみせるが、Boil発生や $2h$ 程度の幅のタテスジはそれらの中で複雑に形成される。実験Bと実験Cを合した碁盤目状の格子溝とすると（実験E）、Boilや $2h$ 幅のタテスジも顕著に出来ながら、動揺が極めてはげしい。その碁盤目状の格子溝を、対角線長が $4h$ になるような粗さに変え、しかも45°斜めに方向を変え、水面には驚くように鮮やかな、かつ安定的なタテスジが発生する（実験F）。

興味があることに、移動床で自然な流れの中に、水面にこのタテスジが顕著に現れる場合を追求すると、実験Bに対応するようなタテ溝が自然に発達するとき、実験Fに対応する斜め交叉の砂漣や砂堆が発達するときであった。そしてその規模と水深の関係も実験の場合と同様であった。

実験Fの斜め格子溝の固定床の、そのメッシュをいろいろに変えて（水深は一定）強制的に底面条件を変えたときに、

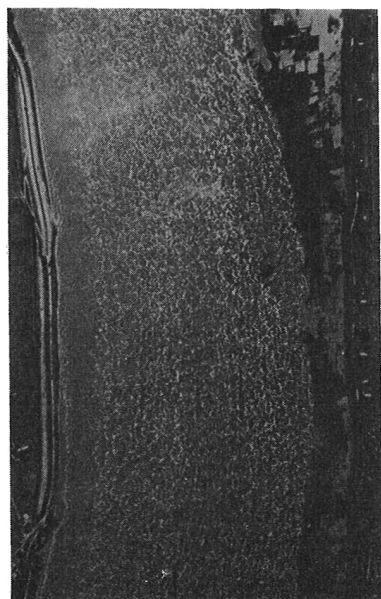


写真-14 木曾川1964年9月洪水、増水中の水面の泡に、美事なタテスジの分布が見られる。（木曾川上流工事事務所）

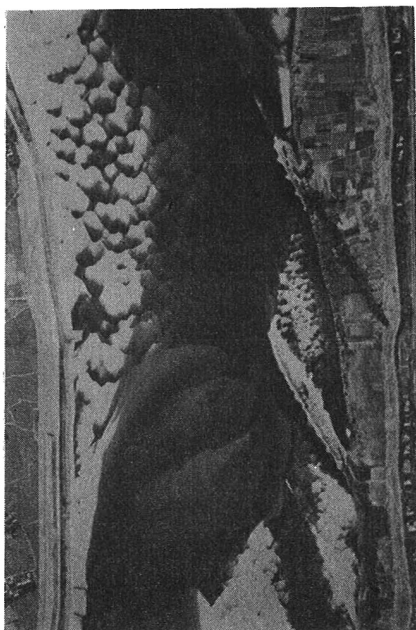


写真-15 木曾川、同じ河域の減水後の状況、1965年1月（左に同じ）

表面のタテスジにどのような影響があらわれるかを調べた。格子の対角線長を D とし、平均水深を h としたときに、 $D/h = 4$ のときに前述のように標準的なタテスジが出来るが、 D/h が3.2～6.4位の範囲内ではタテスジが認められ、それ以下では混乱、以上では分裂が生じた。この場合、 D/h の下限と上

限の比は2倍となり、この比の変動を不定流に見立てた場合、水深変動に対応して底面の砂堆規模は、倍々に変形しつつ対応すれば、タテスジは常に存在しつづけることは可能であると推定された。写真-14、15は木曽川における洪水時の泡によるタテスジと、出水後の砂床形状の航空写真である。低水流はBar形成に変化しているが、河床面いたるところに斜め交錯の砂堆形成がのこされている。

実験Fの斜め格子溝床を、ウロコ床にすると（実験G）水流表面のタテスジは更に顕著になる。写真-16は木片で作成したウロコ床実験水路、写真-17はその流れの表面にパンチ屑を散布し、2台のカメラで微少時間差を与えて撮影した流速分布のステレオ写真、カメロン効果によりパンチ屑は水面高より異常に浮び上り、その高低で流速分布が仔細に観察（測定）される。写真-18は同じくアルミ粉末を散布した写真、図-8は時間平均的な表面流線、図-9は同じく表面流速等値線、図-10は底

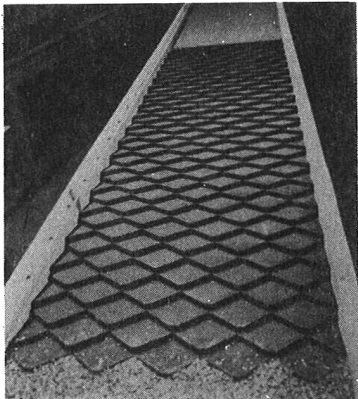


写真-16 固定ウロコ床実験水路

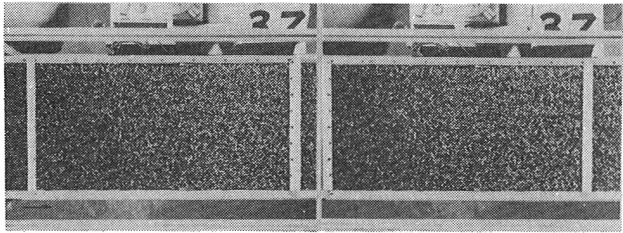


写真-17 ウロコ床上の水流の、表面流速立体写真
(パンチ屑)

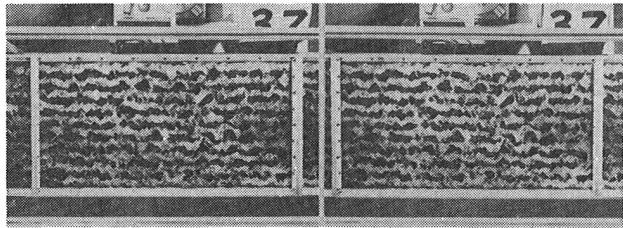


写真-18 同 上 (アルミニウム粉末)

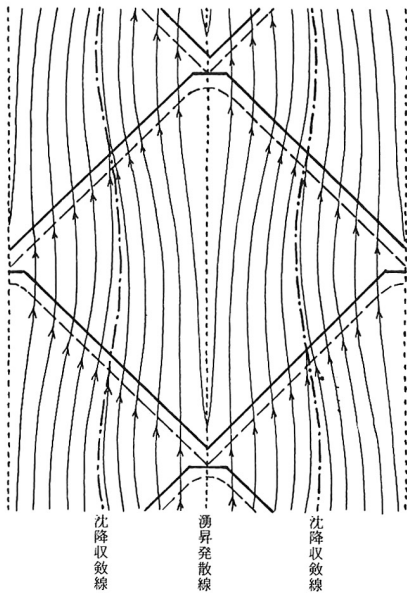


図-8 表面流線 (時間平均)

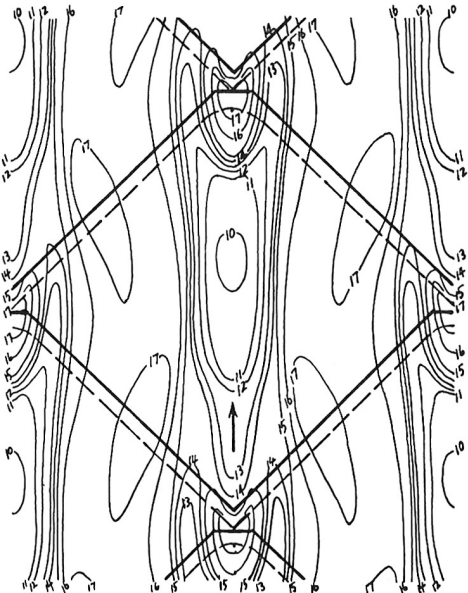


図-9 表面流速分布図 (時間平均) 単位 cm/s

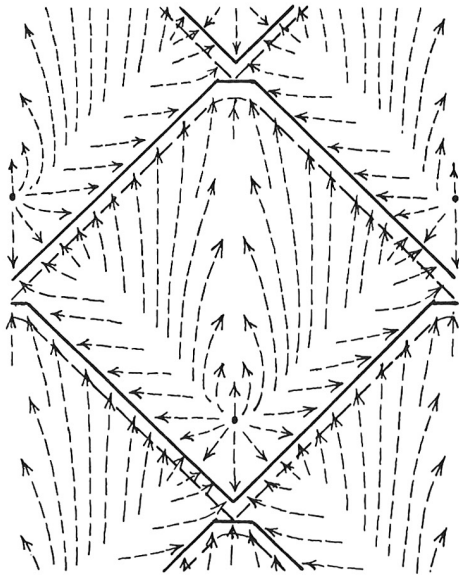


図-10 底面流線（時間平均）

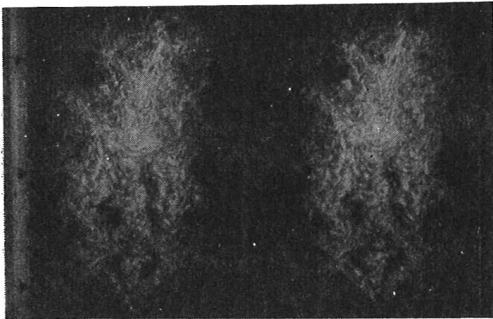


写真-19 水中にアルミ粉を流した立体写真，渦形成の細部の状況が観察される。アルミ粉が抜けているところは流速が早く，きれいな上流の水が到達していることを示している。



写真-20 水中トレーサーの1/2秒の軌跡の立体写真

面流線図である。写真-19は流れの中にアルミ粉末のアルコール浸漬液を急激に加え， Δt 後の状況の同時撮影立体写真，写真-20は比重1.06の合成樹脂粒子の水中の流下状況の1/2秒流し撮り立体写真である。水中の粒子の軌跡が三次元的に観察され，渦や湧昇流の形成箇所がよく分かる。なお写真-21はパンチ屑を多量に水中に沈め，流送されてゆく状態の単写真であり，どの線に沿って掃流・浮流量が多いかがよく示されている。写真-22は同じ水中トレーサーを用い，40サイクルでストロボ11発を発射した時の（延べ1/4秒）立体写真である。こういう方法で水中の三次元ベクトルを精密に測定することが可能である。（カメラ直下付近のみで測定。底面のウロコ床にも歪みは殆ど見られず，水面の屈折は先ず問わないことにする。）写真-23は流れとともに低速シャッターカメラを動かして撮った，表面の渦の写真の一例である。

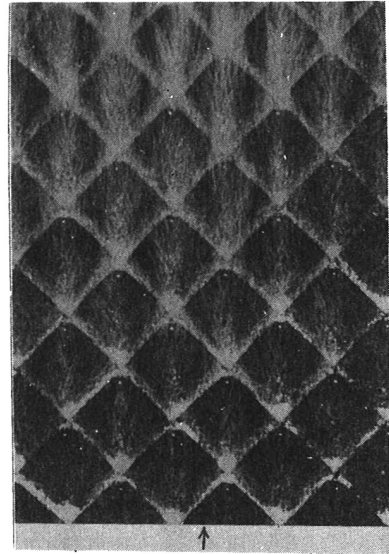


写真-21 水中にパンチ屑を沈め，流したときの状況

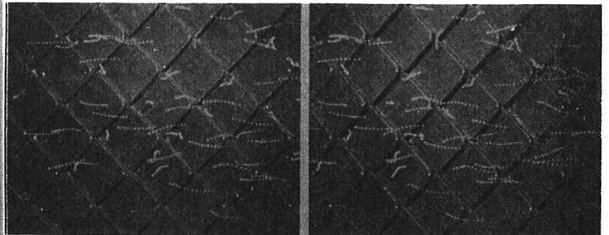


写真-22 ストロボ撮影による水中トレーサーの立体流況。40サイクル11発発光，延べ1/4秒の軌跡を示す。

このようにして流れの表面のタテスジ、立体的にいえば並列するらせん流の構造は次第に明らかになり、洪水流の基本的構造の理解も一層進展するであろう。なおここで流路が彎曲する時に形成される二次流と、この並列らせん流との関係はどうかということが問題にされるが、平坦固定床彎曲水路による実験例では、基本的には先の実験Dの場合と似てくることが認められた。¹²⁾

2.5 複断面水路における低水河岸付近の洪水流況

複断面水路で高水敷にまで流れがのる大きな洪水の航空写真を眺めると、高水敷上の流速は、低水河岸に沿う

付近で若干流速が落ちる場合が極めて多いことに筆者はかねて気づいていた。その現地を調査すると、低い杭出水制があったり、河岸に低い柳が生い繁っていたり、あるいは“自然堤防”などと呼ばれる河畔堆積現象で、若干地盤が高まっているかと思われる場合があったり、そこがブッシュとして放置されていたり、情況はさまざまであった。何れもその原因の一つに考えられるとはいえ、しかし一様なこの現象の発生には、他に何か普遍的な理由があるのかと筆者は疑念を抱いていた。

ところが昭和50年8月、石狩川に発生した大洪水の航空写真を眺めると、そこに大きい立木が多いという事実はあったとしても、殆ど全川においてその現象が認められた。そしてこれは改修計画上無視するよりも、むしろ取り入れて考慮すべきではないかと提言し、¹³⁾ この部分で果してどういう流況が生ずるのか、簡単な実験を試みた。¹⁴⁾

実験の仕様は図-11の如くである。先ず通水して観察すると、低水路上の流速の大きい流れと、高水敷上の流速の小さい流れの接する速度傾斜の強い場として、低水河岸沿いには複雑な動きがあることが認められる。アルミ粉末を散布すると、その表面のパターンが低水河岸上で剪断変形を起すとともに、ゆれ動いて腕を伸ばすような、波頭がかぶさってゆくような、実際河川の洪水写真によく見られる模様を描き出す(写真-24)。また低水河岸沿いには特に強い湧昇流(Boil)がまき上がるようで、アルミ粉末が押し分けられてポッカリ明確に水面が出る、それがこの岸沿いに或る間隔で並びやすい。それはこの実験では岸の肩と岸の脚先の2箇所に2列で並ぶように見受けられた。まき上がりの強さとともに、沈み込む流れも間けつ的にこの水域では強いと考えられる。

流速分布をみるために電算パンチ屑を散布し、微小時間差を与えてステレオ撮影すると、写真-25が得られた。カメロン効果を利用して速度分布を立体視すると、驚くべきことに問題の水域が歴然として流速低下を起こしていることが認められた。この流速を測定し、いろいろな値(瞬間的)を同一断面に投影して表現すると、図-11となる。低水河岸から少し高水敷に入った付近に明らかに流速の低い水域がみられる。この場合の瞬間的流速分布の平面図を描くと、図-12例のようになる。これは流速の早い



写真-23 ウロコ床水流表面の渦写真の一例

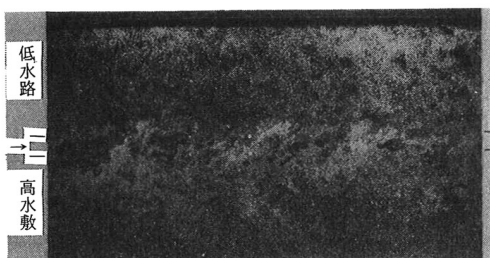


写真-24 複断面水路水流表面のアルミニウム粉末の示すパターン。水路中央の白点は、低水河岸の肩と底の位置を示す標定点。上半が低水路、下半が高水敷。

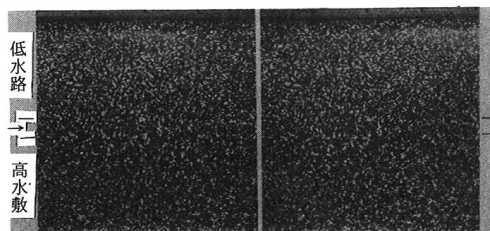


写真-25 複断面水路の表面流速分布立体写真

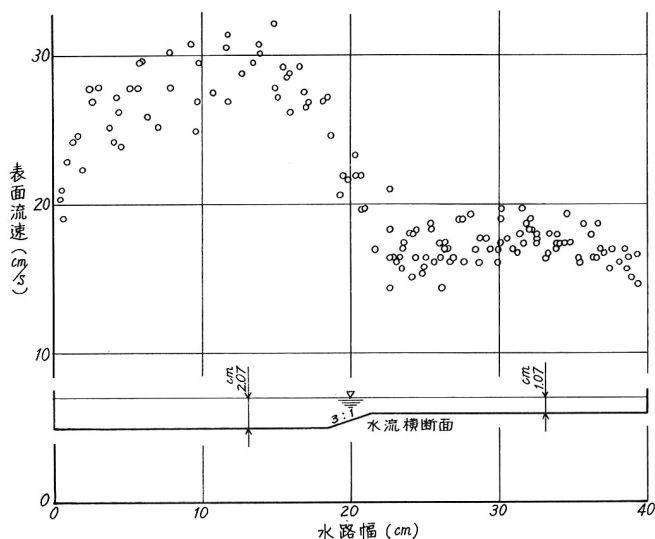


図-11 複断面水路の横断流速分布測定図，実験仕様は水面勾配：1/345，流量：1,139 cc/s，底面は2.2 mm 径の砂粒をしきつめた固定床，全断面平均流速：18.1 cm/s である。

峯のみを実線で描いて，並列らせん流の集り方を示すとともに，流速最低の谷線だけを点線で示したものである。この点線の位置の時間的変動を10モデル程度重複してあらわすと図-13となり，何れもほぼ問題の水域を走っているのが明かである。

では何故この水域の流速が低下するのか？ 先にも述べたように低水河岸付近では渦のまき方が強いので，低速シャッターカメラを流れとともに動かし，渦写真を撮ってみた。写真-26が低水路の渦，写真-27が高水敷上の渦である。これらは何れも並列らせん流形成に関連する渦で，水深規模に対応して分布する。これ

に対し，低水河岸上の流速に合せて撮ると，写真-28が得られた。低水河岸中央，または肩付近に中心をもつ大きい渦形成が見られ，渦の回転方向からすると，問題の水域はマイナス方向の影響を受け

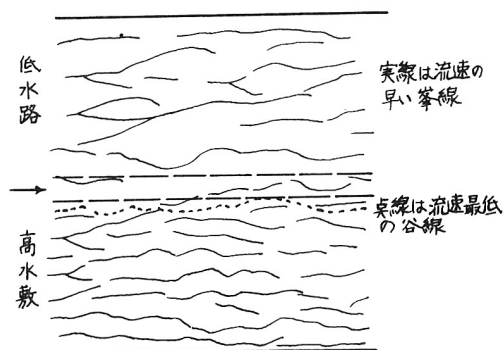
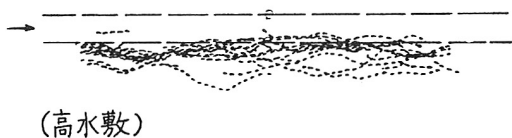


図-12 ある瞬間的流速分布の性質を示す平面図

(低水路)



(高水敷)

図-13 同上。流速低下線の時間的変動

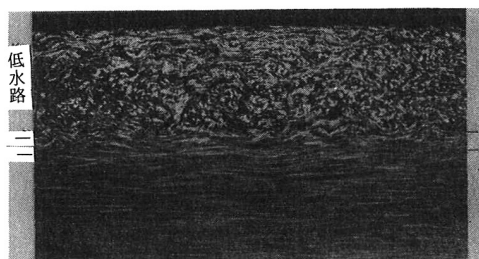


写真-26 1/2 秒流し写真による低水路の渦

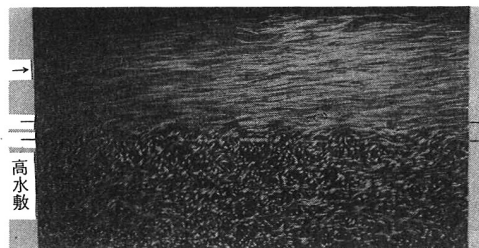


写真-27 1/4 秒流し写真による高水敷の渦

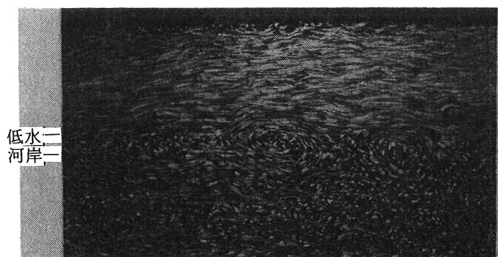


写真-28 1/4 秒流し写真による低水河岸上の大きな渦

ることになる。これがこの水域の流速低下の原因なのであろうか。

比重が殆ど1の水中トレーサーを用いてストロボ撮影をすると、低水河岸付近の三次元流速ベクトル分布の特徴と、その時間的変動が詳細に捉えられる。この付近は左右にも上下にも水流の運動の攪乱がはげしく、将来条件も変えて研究を進めれば、低水河岸付近の流況やその取り扱い方が明らかになり、護岸・水制工法や河道計画に裨益するところ大であろう。

おわりに

洪水流航空写真を観察して、そこに見られるさまざまな特徴をもつ流れ方を実験室にもちこみ、その三次元流況とその時間的変動性を探る研究は、最近始まったばかりである。工学的必要から“現地観測”が行われたとしても、現地観測から得られるデータは複雑な自然界の姿であり、理学的態度で先ずそれを学ぶことは、工学的立場とその進歩のためにも必要なことであろう。近年河道整備として、河積不足を補うために拡幅や掘削が行われる場合が多いが、洪水時には剥離しているところがあり、流れの三次元的な理解の重要さが教えられる。

“洪水の現地観測”は、先ず現地で洪水に際する努力が必要であり、誤りと無駄の多い予測とその対応に従事せざるを得ない。また＜現地で見る眼＞が大切であるから、研究主体者は進んで現地に赴かざるを得ない。現地観測の意義は決して軽く評価されてはならず、人と運営に関する考察も、将来進められねばならないであろう。

〔脚注〕

- 1) たとえば国民百科辞典（平凡社）へいや（式正英）1962
- 2) 主として栃木県蛇尾川，昭和16，22，23，24，25年の洪水。
- 3) 扇状地河道の砂レキ堆に関する筆者の論文をまとめてしるすと
 1. “サビ川における砂礫堆と掃流うねりの現象について” 新砂防No19（1955）
 2. “河床における砂レキ堆の形成について” 土木学会論文集No42（1957）
 3. “石狩川河道変遷調査” 参考編，科学技術庁資源局資料No36（1962）
 4. “河道平面計画試論” 水工学シリーズ72-A-4，土木学会水理委員会（1972）
 5. “扇状地流路の動態と流路工計画に関する諸問題” 第7回砂防学会シンポジウム（1975）
 6. “網流河道の洪水時の砂レキ堆挙動観測について” 砂防学会研究発表会概要集（1976）
 7. “扇状地網流河道の洪水時の河床形態変動” 砂防学会研究発表会概要集（1978）
- 4) Leopold, L. B. and Wolman, M. G. : “River channel patterns — braided, meandering and straight” U.S.G.S. Prof. Paper 282-B,（1957）
- 5) 玉井信行，長尾哲，三国史雄： “直線水路における複列砂礫堆と網状流路の形成について” 第22回水理講演会論文集（1978）
- 6) 橋本規明： “新河川工法” p. 257 森北出版（1956）
- 7) 洪水流航測に関する筆者の論文をまとめてしるすと
 1. “空中写真測量による洪水流の表面流速・流向の測定およびその分布状況と河床形状との関連性について” 第8回水理講演会講演集（1963）
 2. “航空写真による洪水流の解析，その乱流構造と表面の流れかたの特性について” 写真測量vol. 6 No 1（1967）
 3. “航空写真測量と洪水解析” 土木学会誌52-6（1967）

4. “洪水流を航空写真に撮影する飛行の計画” 土木技術vol. 22No. 9 (1967)
5. “航空写真による洪水時の流況測定” 水工学シリーズ68-12土木学会水理委員会 (1968)
6. “洪水流航測と水文・航空気象調査” 日本学術会議, 水特別委. I H D小委. 第1回水文学における研究手法に関するシンポジウム (1968)
7. “洪水流航測の河道計画への応用” 写真測量とリモートセンシングvol. 14, No. 2 (1975)
8. “洪水流の写真判読——らせん流の実験的研究” 日本写真測量学会秋季講演会発表論文集 (1976)
(共著者, 遠藤義幸, 石坂晋)
9. “らせん流の表面流速分布特性” 同上 (1976) (共著者, 同上)
10. “河川研究者と写真測量の出会い——洪水流航測の課題を中心にして——” 写真測量調査技術協会誌, No. 4 (1978)
- 8) 阿賀野川の洪水時の砂レキ堆形成に関連する次の論文がある。
 鮭川登, 橋本信雄: “阿賀野川下流部における砂礫堆の洪水時の挙動に関する一考察” 土木学会関東支部年講(1976)
- 9) 木下良作, 三輪式: “砂レキ堆の位置が安定化する流路形状” 新砂防No. 94 (1974)
- 10) 石狩川開発建設部: “石狩川昭和50年8月洪水流航空写真解析業務報告書” (アジア航測, 木下良作) (1977)
- 11) 同上: “並列らせん流に関する実験的研究” 河道形状と洪水流に関する検討業務報告書(木下良作) (1977)
- 12) 同上: “河道形状と三次元流況の関係を示す二, 三の実験” 同上(木下良作) (1978)
- 13) 10)と同じ
- 14) 12)と同じ