

航空写真による洪水時の流況測定

自由学園最高学部 木 下 良 作

ま え が き

航空写真による洪水時の流況測定は、わが国では数年前に着手されたばかりの新しい試みである。

これには昼間の出水でなければならず、雨天、荒天であってもできず、流れの表面の状態しかわからない、その他いろいろな制約があるにもかかわらず、多くの河川でこの観測法がとりあげられようとしている。広い地域の全面的な迅速な記録性、写真をとれば事後処理ができること、そしてこれまでには得られなかったデータが得られるなどということが、その理由であろうと考えられる。

測定された結果が水工学的にどのような意義があるかということが、本来の課題である。けれどもこの観測を実施するにさいして多くの事柄が問題になり、そのすべてに一応の解決を得ないと事は進まなかった。つまらないことのようにであるがここではひろくその問題点にふれ、これからの参考に供したい。また測定諸例をしめすとともに、水工学的な問題にも若干ふれることにする。

この測定法は写真測量の利用であり、応用である。写真測量の基礎的、一般的事項は専門書にゆだね、ここでは洪水を対象とする場合の、特殊な事項についてののみ、のべることにする。

1 洪水時の飛行

1.1 問題点の所在

航空写真測量による洪水時の流況測定の可能性が明らかになっても、洪水の写真が得られなかったら事は皆無にひとしい。洪水時に適確な飛行をするということが、最初の、そして最も重要な課題なのである。気象衛星から台風の写真像が入り、ジェット機はその眼の中で気象観測をおこなう現在、洪水時の空を飛ぶくらのことは何でもないことのように考えられる。けれどもわが国における航空測量業界の実態では、これに至難なことなのである。事実、昭和38年にこの研究がはじまって以来、10指をこえる洪水のチャンスにおいて、航測業者の飛行機が成功した例は一度もなく、ことごとくが航空輸送業者の手によらねばならなかった。(表4.1参照)この「観測業務」の性質が、「航空写真測量」の範ちゅうに入りながら、出発点である撮影作業が他種の業者に頼らねばならないというところに、これまでの慣例に反する最初の問題点があった。

1.2 洪水流観測機に必要な条件

問題をひろく考えれば、洪水後の飛行でも災害調査などその意義は大きい。しかし〈洪水時の流況測定〉ということに課題を限れば、その観測機に必要な条件としては、これまでの経験から次の項目が指摘される。

- 1) 荒天時飛行に意欲と実績を有する優秀なパイロットをもち、その活動をささえる社内の運航態勢がととのっていること。
- 2) 計器飛行ができること（パイロットの資格と機体の装備）
- 3) 地上移動無線局を開局できる専用無線電波を所有していること。
- 4) 精密時間記録装置をつけた一般航空カメラを所有すること。
- 5) カメラマンは洪水流撮影の経験をもつか、その注意事項を理解したものであること。

この中で項目1)2)3)が結果的にこれまでの洪水時飛行の成否を決めたものである。(4)5)については後述)

1.3 洪水時の航空気象

洪水時の気象状態は、その出水をもたらしただ原因によって違ってくる。台風の場合、低気圧・前線による場合、融雪をとまなり場合など、それぞれの特徴がある。また河川によって、どの要因による出水頻度が高いかという傾向の差がある。

ある河川でこの観測を企画するときには、過去の出水におけるその付近の航空気象がどうであったかを調べ、そのときにもし飛行観測をおこなったとしたら、どういう問題があったかという事例研究をつむ必要がある。

前線性による集中豪雨で出水する場合、一般的に良好な天候回復はのぞみがたい。台風による場合は回復する機会が多いのは常識である。これまでの台風の場合の調査によれば、撮影飛行が可能になる気象状態は、大体において台風の中心が400～500 Kmていど遠ざかったときにあらわれた。図1.1はその概略をしめすもので、図中たとえば大淀川・宮崎として破線がひいてある位置に台風がきたときに、宮崎において有視界飛行が可能になる場合が多いという意味の図である。そのときにその河川の出水の状態如何が問題となるが、わが国の大河川では一般的にいって、平野部では、大体水位ピークがおさえられるという状態にある。しかしこれには観測する飛行機が、何処で待機するかということが大きく影響する。図1.2に阿賀野川で観測したときの、飛行困難な天気図の一例をしめす。

観測計画河川はふえ、それにたいして現在いろいろな事情のもとで、観測できる飛行機の数はずかでない。実施の場合、一河川一機が理想であるが、一機二河川ぐらいはやむを得ないとしても、待機の段

階では少数機が多数河川にたいして備えねばならないというのが現状である。こういう状態のもとではこれまで水文気象として全く閑却されていた、諸河川の出水の関連性、その同時性、非同時性およびその予測の調査研究が、大いに必要になってきているといえる。

なお“洪水時の飛行”の詳細については、拙著“洪水流を航空写真に撮影する飛行の計画”土木技術Vol. 22、No. 9を参照されたい。

2 洪水流の撮影

2.1 洪水流の水面の模様

昭和38年、四国の吉野川で、洪水流の状態を観察する目的で垂直航空写真がとられて以来、洪水流の表面には多様な模様が存在することが知られてきた¹⁾。写真2.1～2.4に、そのいろいろな代表例をかかげる。(ほかに土木学会誌Vol. 52、No. 6口絵写真²⁾、および写真測量Vol. 6、No. 1口絵カラー写真³⁾を参照されたい)これらの模様は空からみると、乱れによる独特な動きをみせながら下流に移動してゆく。それを追跡できれば、流れの表面の流速ベクトルが得られることになる。

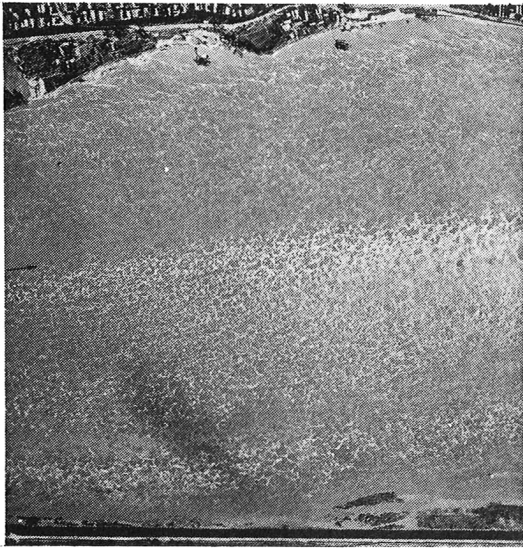


写真2.1

洪水面を浮流する多量の泡。水没した中洲
(写真左下)からの発生が多い。

木曾川 39. 9. 25

(木曾川上流工事事務所)

a) 濁りの色の模様

清澄な水は白黒写真では黒くうつり、濁ると白くうつるようになる。けれども洪水のようにさらに濁りを増し、ある限界をこえると、また黒くうつるようになってくる。洪水面に黒い丸い斑紋が無数にあらわれるのは、その濃度の高い部分に当たり、色でいうと茶色の中で焦茶色を呈するよう

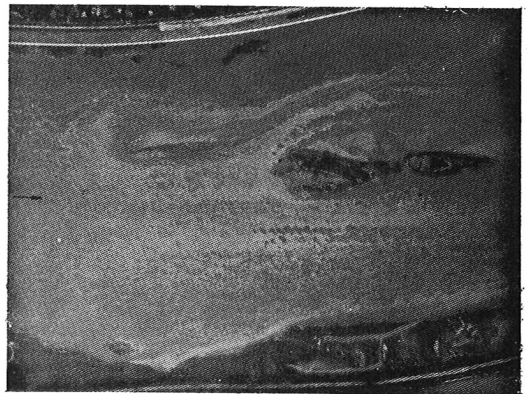


写真2.2 濁る色の違いによる模様

長良川 39. 9. 25 (木曾川上流工事事務所)

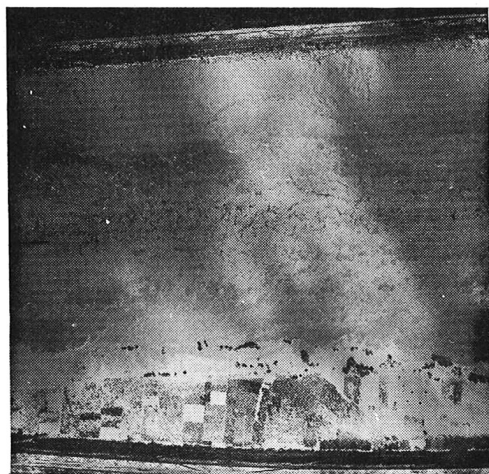


写真 2.3 浮流するごみ。流れの中央部分の泡と同じ形をした小さい黒いもの。（雲の影がある） 長良川 39. 9. 25

（木曾川上流工事事務所）

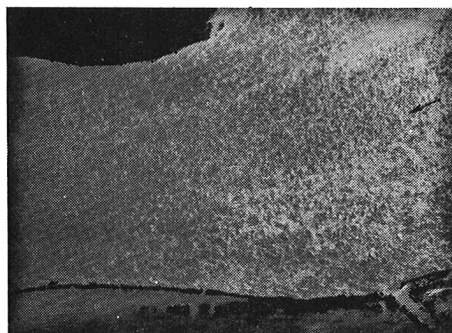


写真 2.4 太陽の斜めの反射光線で浮きぼりにされた洪水流表面の微細な凹凸。

最上川 42. 8. 30 （酒田工事事務所）

な部分である。これはまき上り水流が表面にあらわれた部分と考えられる。

この流れの色調模様は主として河川の下流部の、河床に砂粒が急増する付近からあらわれやすい。粗大な礫が河床をおおうような河道では、濁りの色は単一色を呈し、写真にも色調の模様はみとめられがたい。水位、勾配、河床粒径との量的関係において、この色調模様のあらわれる限界を把握することは重要であるが、現在まだ明らかでない。

b) 泡

この泡はいわゆる激流泡をかむ、あの泡ではない。小さいほこりを核とした、安定度の高い、うす茶色をした、かまきりの卵状の泡で、増水期にとくに多量にみられるものである。写真によれば、冠水した中洲・寄洲からの発生が多く、したがって平生ひろい河原を有する河道でその発生がさかんである。河川により、下流ではピーク時に最も多い場合もあり、一般的に減水期にはすくない。また高水が長くつづく梅雨時の出水や、融雪出水のさいにはこの泡はあまりみられない。

c) ごみ

洪水時には一般に流木やごみが多いようにいわれるが、量的にみれば写真上ではほとんど流速測定への利用は期待できない。写真 2.3 は例外で、その中でめずらしく多くみられた一例である。

d) 水面形の反射

ハレーションによる水面形のあらわれを流速測定に利用することは、偶発的、局部的にしかおこないがたい。

以上は流速測定に有効な、写真上にあらわれる

流れの模様であり、主として下流部、緩流部にあらわれやすい現象である。上流部、急流部では以上の模様が得られにくくなる上に、特有な水面の波が発生して、これが“流速の立体視”（後述）をさまたげるようになる。上流部では特に人工標識を流さねば測定はむずかしく、出水がはやいこと、天候回復がわるいことと

あわせて、飛行機による観測はいちじるしく困難になる。

2.2 撮 影

a) フィルター

洪水面の明るさは曇天時でもその周辺地域より明るく（晴天時のこの差違は特にはなはだしい）コントラストフィルターの使用はこのましくない。明るい洪水面におけるわずかの色調差、光量変化を忠実にうつしとるには、かえってフラットな面調が得られるよう注意し、のちの現像、焼付け作業においても、特に洪水面の調子に留意する必要がある。

洪水面のみコントラストを強めて撮影するよい方法は、まだ明らかでない。一たんでき上ったネガフィルムから洪水面のパターンを強調するには、複写をくりかえすなど、いろいろな方法が考えられるが、まだ適案はない。

b) シャッター時間間隔

流れの乱れの模様の流下を写真測量するためには、シャッター間隔を極力短かくし、模様の変形を小さくおさえるようにしなければならない。現在一級航空カメラの極限の4秒前後で撮影をおこなっているが、流速 m/sec をこえるようなわが国の河川では、これより時間をのばすことは、像がくずれて好ましくないようである。そして空中基線長を増大させ、測定精度を上げるために、機速はあげる方がよい。

また流速測定の精度のバランスを得るために、シャッター時間間隔の計測は、写真内にうつる時計の秒針に頼らず、別におこなう必要がある。

c) 撮影コースと高度

水面の模様を利用して流速を測定する場合には、図化機の性能上、流れと飛行方向が平行するのがのぞましいが、最大30度以内にはおさまるようにコースを選定する必要がある。撮影高度はわが国の河川の模様と、天候の条件から、 $1,200m \sim 1,500m$ （写真縮尺 $1/8,000 \sim 1/10,000$ ）の場合が多くなっている。

d) 水面浮動標識

洪水の水面に何も模様があらわれない場合、あるいは波が立つ上流部では、人為的に浮動標識を流さなければ流速は測定できない。人工泡沫とか色素とか、流す物質はいろいろ考えられるが、容易に安く入手できる発泡ポリスチレン紙が現在もっぱら用いられている。

撮影高度と浮標の大きさの関係はテストの結果、地上対空標識（正方形）の場合のデータと同じでよかった。（高度 $1,500m$ 、撮影写真縮尺 $1/10,000$ のとき標識は $40cm$ 四方）

発泡ポリスチレン紙の厚さは流速に対応した厚さを選ばねばならない。下流では $0.3 \sim 0.5mm$ 前後のうすいものの方が風の影響を受けにくくなるので好ましく、上流では急流になるほど波にまるめとまれるようになるので、 $1mm$ 以上の厚手のものを用いねばならない。

水面模様の発生条件（限界）がまだ明らかでない現在、この浮標は、模様が写真にうつらない場合の最低保障として今でも常に用いられているが、本来浮標のみで流速ベクトルを得る場合には、撮影の仕様は変っ

た方がよい。コースの方向には限界はなく、また流速密度にもよるが、シャッター時間間隔はそれほど短かくする必要もなく、またできるだけ長い時間の平均値が得られるよう、飛行機の場合はおそい方がよくなる。

e) 浮標の散布作業

浮標の散布作業と飛行機の撮影のタイミングの問題は、これまで最も難しかったものの一つであった。結論的にいえば、航測機の条件の一つの地対空の無電連絡ができなければ、どこかでほとんど決定的なミスをおかしてしまっている。散布作業は撮影予定区域の全面に散るように、流速に応じて事前に開始する必要がある、かなり人手も要る。一方天候回復の予測はつきにくく、飛行機の撮影開始時刻は事前になかなか決まらないし、変更しやすいという面をもっている。飛行場と事務所と散布現場（大てい複数）、そして飛び上つてからは飛行機と事務所と現場が常に連絡がとれる態勢にないと、どこかでつまらないミスをおかしてしまう。さきにものべたように、一機で二河川以上の撮影をおこなう場合には、特にこの飛行機と地上の無電連絡が刻々にとれないようでは、とうてい成功はおぼつかないといえよう。

f) 地上対空標識

すでに一人航空写真測量で作成した平面図があれば、地上対空標識はかならずしも必要ではない。けれども測定の精度の向上のためにも1軒ごとぐらいには座標のわかった地上対空標識がほしい。しかしいつ出水があるかわからないので、それに備えるためにも、コンクリートによる永久対空標識であるとよい。この作成は簡単なので、この観測を企画する河川では必ず設けるようにしたい。

洪水流の撮影は、その時々刻々に意義があり、とり直しがきかない性質がある。またそのときの写真の出来、不出来が、そののちの作業段階に大きく影響し、結局その観測の成果を決めるものとなる。洪水時の飛行と撮影を成功させることが、この観測の鍵といつてよい。そのためには企画機関も作業機関も事前の準備をつみ、つねに待機する姿勢が必要であるといえる。

3 表面流速の測定と図化

写真をとるまでを外部作業とすれば、これからの測定は内部作業である。

3.1 流速測定の問題点

写真測量の原理は三角測量である。同一対象物を二方向から写真にとり、そのレンズ中心をむすぶ線を基線とし、二枚の写真フィルム上の像のズレを測ることによって対象物の方向を割りだし、その三次元座標をもとめてゆく。けれども対象物が動く場合には、二方向からのカメラは同時撮影をしなければその位置は求まらず、その運動をとらえるためには同時撮影をくりかえさねばならない。ただ一台の飛行機でつぎつぎにうつしてゆく写真から流速が測定できるのは、その水面の高さがわかっているという条件がついている。さいわい流水面は平坦に近く、かつ水平に近いので、（高さの誤差が平面距離におよぼす影響も小さいので）表面流速の測定は、動くものを対象とする場合としては、比較的容易な課題であるといえる。けれども図化機の操作は、動かない地形測量の場合と全く同じであるというわけではない。完全に対地標定をおこなっても、流れの方向は基線方向にたいして乱れているので、その水面の像は縦視差を生じ、写真測量の特長とす

る“立体視”（三角測量）は、そのままでは成り立たないことになる。

32 単写真ごとによる流速ベクトル測定

立体視はできなくとも、非常に明確な像、たとえば水面浮動標識などの場合、二つの写真上の同一物の対応は正確にできるので、単写真ごとにそれを水面の高さにおとすことにより平面位置がきまり、二点をむすべばその時間におけるその点の表面流速ベクトルが得られる。図上でその長さを計測して撮影時間間隔で割って流速を求めればよい。こまかいことになるが、この作業はわが国に最も多いウイルドのステレオプロッターA8で作業するのに適しており、また空中基線長をできるだけ長く、撮影時間間隔も長くとれるよう写真を選ぶ方がよい。ほかにたとえばオートグラフA7のような一級図化機を使えば、図化と同時に（x、y）の座標（ $z=0$ ）をタイプで打ち、計算で流速を出すこともできる。

この測定における水面高の与え方は、対地標定後、水面高がゼロ、水平になるようにわずかに傾けて実際の作業をおこなっている。

この測定の精度は図上で長さを測る場合には、 $1/2,500$ の図上で $1/10$ ミリよみのルーペを使った場合、実際の長さ 25cm 単位、もし撮影時間間隔を 10 秒とすれば流速としては 2.5cm/sec 単位で測ることになる。これは図上からのことで、ほかに図化機における標定・測定誤差が加わる。大淀川でベクトル測定をおこなったときの（図4.1参照）標定および測定誤差は、ベクトルの長さにして標準偏差 $\pm 1.3\text{cm}$ 、 Δt を 10 秒とすれば流速にして $\pm 1.3\text{cm/sec}$ ていどであった。⁴⁾

33 流れの模様による流速測定

a) カメロン効果

洪水流表面の模様（前述）は乱れに起因するものであり、時間とともに変形する。けれども撮影時間間隔をちぢめると、ほとんど同じ模様を呈するステレオ写真が得られる。（文献2）の口絵写真参照）これを立体視すると、カメロン効果⁵⁾とよばれるおもしろい現象に当面する。水面は突如として盛り上って、堤防や人家や森などより高い山のように連なってみえる。（あるいは低下して谷のように）これは流速による模様のズレが横視差と同じ作用をして、みせかけの高低感をもたらすものである。

図3.1において飛行機が O_1 の点で撮影し、速度 V で t 時間後 O_2 の点で撮影したとする。その間水面の P_1 点は流速 V で P_2 点に運ずる。この一対の写真を立体視すると P_1 と P_2 は P' の高度に浮かび上ってみえる。飛行高度 H および Vt は絶対標定によって決まり、 ΔH を測

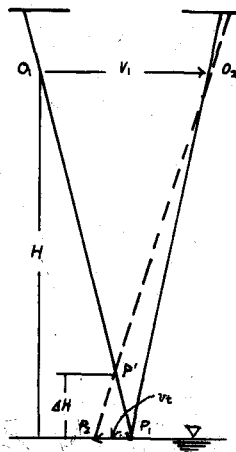


図3.1 カメロン効果

定すれば次式で V が求められる。

$$v = \frac{\Delta H}{H - \Delta H} V$$

飛行機が流れと同方向に飛べば、水面の像は反対に沈んでみえる。いま仮に H を $1,200\text{ m}$ 、 V を $60/\text{sec}$ 、とすると、 v が 2 m/sec のときには ΔH は約 40 m となり、過高感がいかにはげしいかがわかる。

この ΔH の測定精度は飛行高度 H の $1/3,000$ でいどとすれば、 $\pm 40\text{ cm}$ でいど、これを流速におきかえれば $\pm 2\text{ cm/sec}$ でいどとなる。しかし t がみじかいために Vt 、すなわち基線長は一般の図化の場合より短い場合が多く、またこの ΔH を等高線、すなわち等速度線であらわす場合が多いので、等高線のひき方の個人差などを考えると、実用精度は $\pm 10 \sim 15\text{ cm/sec}$ でいどに考えておけばよいようである。

b) 縦視差の消去

密着写真を肉眼、あるいは実体鏡で立体視すると、簡単にカメロン効果を看取できるが、しかしこれを厳密に図化機上で測定しようとする、ベクトルの場合と同じく縦視差が目立って立体視できなくなる。飛行機は流れと全く平行にとぶということは出来なく、川は曲りくねっている場合が多いし、表面の水分子も乱流によってさまざまな方向の動きをしめすからである。

動かない地形は標定が完了すれば、すべての像において縦視差は消えた状態にある。そして横視差の大小が高低感となってあらわれる。けれども動く水面の模様をカメロン効果によって測定しようとする場合には、個々の像についてその縦視差を消去しなければならない。すなわちそのような機構を有する機械、たとえばツアイス社のステレオプラニグラフ C 8、ワイルド社のオートグラフ A 7、あるいはガリレオ社のシンプレックス III など、接続標定が可能な一級図化機を用いねばならないことになる。また縦視差 (y 方向) を消去して測定するということは、機械基線方向 (x 方向) の速度成分で流速を測定することになる。

c) 等流速線

このように流れ全面が立体視できる場合、その速度分布の表示として等高線、すなわち等流速線であらわすことができる。浮標のベクトル測定では個々の点を表示できるが分布性の判定はむずかしい。それにたいして等流速線図では全体を面としてとらえ得る利点がある。個々の位置の精度は等流速線による場合より、あるいはベクトル表示の方がまさるかもしれないが、全体を概観できる利点はこれを失うことはできない。さらに求めれば流れの横断方向において、速度分布の断面形を連続的に描ければよいのであるが、縦断方向のプロファイルを描く装置はあっても、横断方向のものは現在ない。またこの等流速線の平面位置については次のような補正の問題がある。

d) 等流速線の平面位置の補正

地形のような動かない実像を立体視して等高線を描く場合、図化機ではそのまま垂直投影すれば正しい平面図になる。けれども流れによるみせかけの高さをそのまま垂直投影して描くと、そのみせかけの高さをもたらした像、すなわち二枚の写真の水面の、どちらの位置にも合わないところにそれが描けてしまう。これは写真の周辺になるほど甚だしい。もともと流速というものを位置で示すことは無理なのであって、二つの像

のどちらかの位置において、 Δt 後にかけて、あるいは Δt 前からの流速として表示するよりほかはない。
この補正方法は図 3.1 において、 P' の高さを測るけれどもその表示位置は P_1 か P_2 において示すということになる。この方法は Vt 、機械でいえば b_x を $v t$ に相当する分だけ動かして、 $H=0$ すなわち水面の高さに P' の位置を移動させることによって、その描画が可能である。前述のシンプレックスⅢは(写真 3.1)右側の写真のみを動かして b_x を調節できるので、左側の写真の位置に合わせることができるが、オートグラフ A7 では左右の写真が中央を中心として等分に動くので、ほかに描画台上の描画器の位置の調節も必要になる。以上の調整はそれぞれの等高線(等流速線)をかく場合ごとになされねばならない。

またこの測定の場合もベクトルの場合と同じく、流速のみによる異常高度を測定する意味で、水面は水平にしておこなわねばならない。

e) 流向線の併入

等流速線は x 方向の速度成分を表示するが、その図に流向線を併入すれば、計算により真流速も求められる。のみならず流向線はそれ自体としてももつ意義は大きいのである。

この図に流向をとともに表示する場合、等流速線の表示と同じ Δt における各部分の流向を表示すべきかもしれないが、(等流速線は乱れにより曲折している)それはあまりにも労力的に困難なので、平均的な流向で表示している。平均的な流向の求め方にはまた問題があり、⁶⁾ベクトル図や立体視写真上にみられる収斂線分布(後述)などから判定して、これまではすべて筆者が作業をしてきている。

原理的にいえば写真に 90 度の回転をあたえ、その立体視により描いた速度成分(y 方向にあたる)と x 方向の速度成分との合成により、流向は決定できるわけであるが、等流速線はいちじるしく曲折しており、実際の作業の可能性とその精度についてはまだ疑問がある。

f) 機械基線

さらにこまかいことになるが、b)でのべた縦視差の消去に関することで、機械基線の設定についても付言する必要がある。

対地標定をおえ、水面を水平にあり、水面位置の補正をして、あとは機械の b_y を調節して縦視差を消去しつつ等高線を追跡すればよいのであるが、測標で追跡する際わが国の多くの図化機では、その操作は左右双方のハンドルでおこなうことになっている。したがって b_y を操作しつつ測標を移動させようとするとう手が足りなくなる。したがってできるだけ b_y の操作がすくなくなるよう、また流速を出来るだけ流れの方向にそってあらわすために、写真に Z 軸の回転をあたえ、機械基線を流れの方向にそうように変換することもできる。

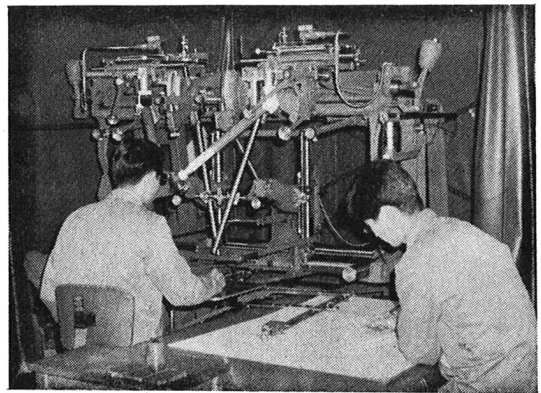


写真 3.1 流速測定に現在もっとも適している
ガリレオ社のシンプレックスⅢ

しかしこのときの標定はいちじるしく熟練を要するようであり、まだ検討の余地もあるようである。さきの写真3.1のシンプレックスⅢは、その点、測標の移動は右手だけですむ構造となっており、左手はつねに b_y 操作をできるので、流速測定には打ってつけの図化機といえることができる。しかしシンプレックスⅢにはオートグラフA7と違って b_x の長さに限度があり、オーバーラップが約80%をこえる立体写真では装定できなくなる。したがって流れの模様を追うため Δt を短くしたときに、撮影高度と飛行機との速度の関係によってはこの図化機にかからない場合がでてくる。(A7では可能)以上こまかいことをししてきたが、要するにこれまでの図化機はまず地形図用に作られており、たとえ万能図化機であっても、流速測定にはその操作に種々不便があると感ぜられる。また流れの模様のあらわれのうすい写真が撮影された場合など、図化機の視野をかえてひろげないと立体視がきかず、精度は若干おちてもそのような交換レンズがあればよいと思われるときもある。もし今後大型移動床模型実験などでもその流速測定に写真測量がもちいられるようになるならば、実際河川の観測とあいまって、流速測定に最も適した専用図化機が試作されてもよいのではないかと考える。

3.4 水位測定

流れの接岸部分、すなわち流速ゼロの線はカメロン効果の影響がないので、立体視によってそのまま位置や高さが測定できる。ただし実際には岸がなだらかに傾斜しているようなところでないと測りにくい。

河川の水位は諸所に点在する量水標によって測られている。けれども量水標の中間部分の水位の推定はむずかしい場合がある。写真測量では飛行機の速度が速いので、ひろい地域の測定が同時水位に近い状態で連続的に行なわれることになる。

航空写真測量の測高精度は、普通飛行高度の $1/5,000 \sim 1/7,000$ といわれている。しかし測定しにくい水際線の水位でテストした結果、約 $1/3,000$ という値が得られた。これは写真縮尺 $1/8,000$ 、飛行高度 $1,200\text{ m}$ の場合、 $\pm 40\text{ cm}$ ということになり、河川工学で問題にする値からはそのひらきが甚だしい。しかし全く無作為に測られた星雲状の多数のデータは、量水標諸地点の中間部分の水位を推定するのにどれだけ役立つか、これからの検討が必要である。

洪水流の表面流速測定は航空写真測量により、これまでよりかなり精密に広範囲にできるようになったとしても、水位の把握は量水標地点でしか現在確実にはおこなえない。これは流量試算に関して影響することであり、その点についてはまた後にふれる。

なお水位測定におけるこの程度の誤差が、水面上の諸像の平面位置の差違の値に及ぼす影響はきわめて小さいので、流速測定上では無視されるものである。

4 測定諸例

これまで航空写真による流況測定が行なわれた河川名は表4.1である。

これらの測定図は膨大な量になり、全部を示すことはもとより、その中の一河川でさえも、その全容をここにしめすことはできない。ここではごく部分例をとり出して、2、3の図をかかげることにする。けれど

も原図からの製版が間に合わず、陽画青写真からの製版となるので、不明瞭なところができることはおゆるしいただきたい。なおその説明は各図において簡単にしるすことにする。



写真 4.1 計画洪水位にたった淀川の流況

40. 9. 18 枚方大橋付近

(淀川工事事務所)

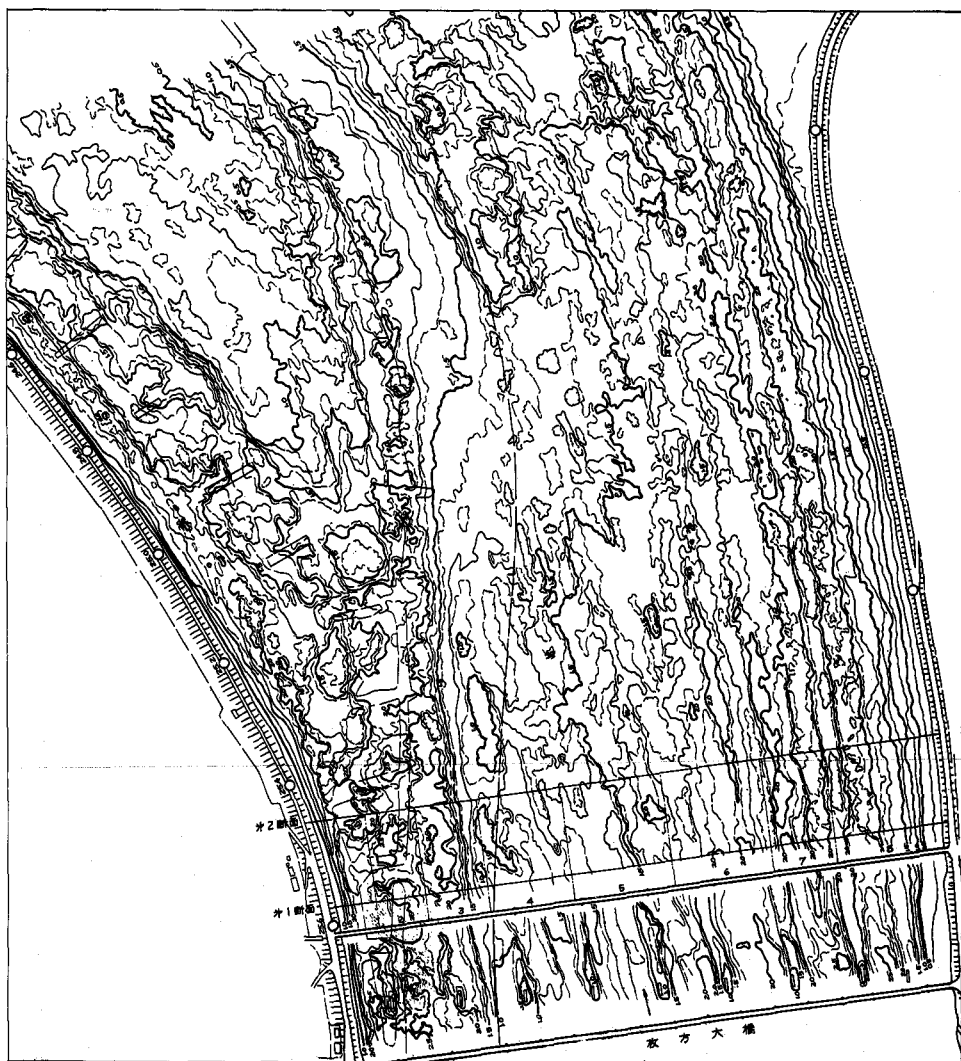


図 4.2 淀川等流速線図（淀川工事事務所）

写真 4.1 の立体写真から測定されたもの（太実線は 50 cm/sec ごと、細実線はその中間の 25 cm/sec ごと、細破線はさらにその中間の 12.5 cm/sec ごとを示す。図かくの縦方向の速度成分で表示。）

表 4.1 洪水流撮影経過表

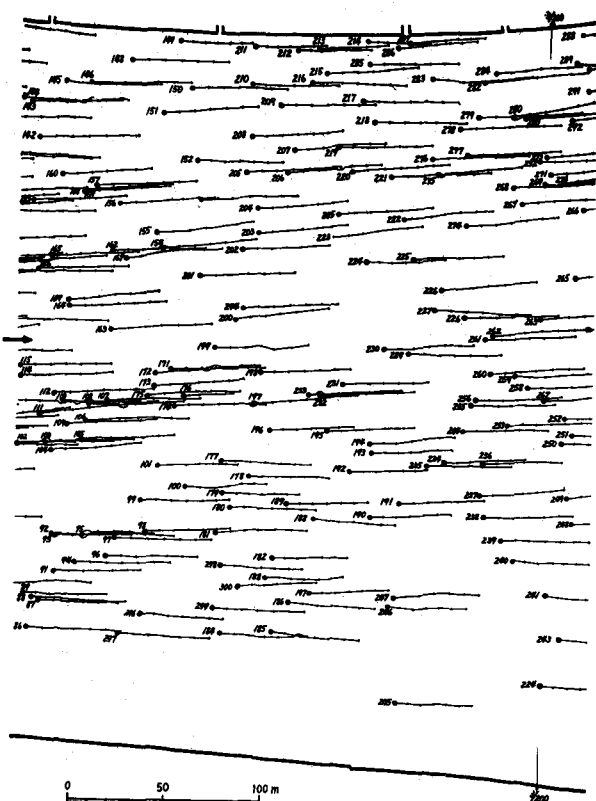
地 方	河 川	年 月 日	摘 要	撮 影 会 社
北海道	石狩川	36. 7. 27	L	パシフィック航業
四 国	吉野川	38. 8. 10	台 9	阪 急 航 空
北 陸	阿賀野川	39. 4. 14	L融雪	ア ジ ア 航 測
九 州	大 淀 川	39. 9. 25	台2	阪 急 航 空
四 国	吉野川	〃	〃	〃
中 部	長良川	〃	〃	日 本 国 内 航 空
〃	揖斐川	〃	〃	〃
〃	木曾川	〃	〃	〃
九 州	筑後川	40. 7. 3	F	阪 急 航 空
〃	球磨川	〃	〃	〃
近 畿	淀 川	40. 9. 11	台23	〃
〃	〃	40. 9. 18	台24	日 本 国 内 航 空
〃	大和川	〃	〃	阪 急 航 空
北海道	石狩川	41. 4. 29	L	日 本 国 内 航 空
東 北	阿武隈川	41. 6. 29	台 4	〃
〃	北上川	〃	〃	〃
北 陸	阿賀野川	41. 9. 25	台26	〃
東 北	最上川	42. 8. 30	F	〃

図 4.1 大淀川の連続ベクトル

(宮崎工事事務所)

39. 9. 25台風20号出水、
早朝より浮標をまき、朝7時50分
航空写真撮影。

重複した7枚の写真まで同一浮標
を追跡できた。図は宮崎市内、
3.74秒ごと計22.4秒間の連続
ベクトルを示すもの。数字は測定
浮標番号。



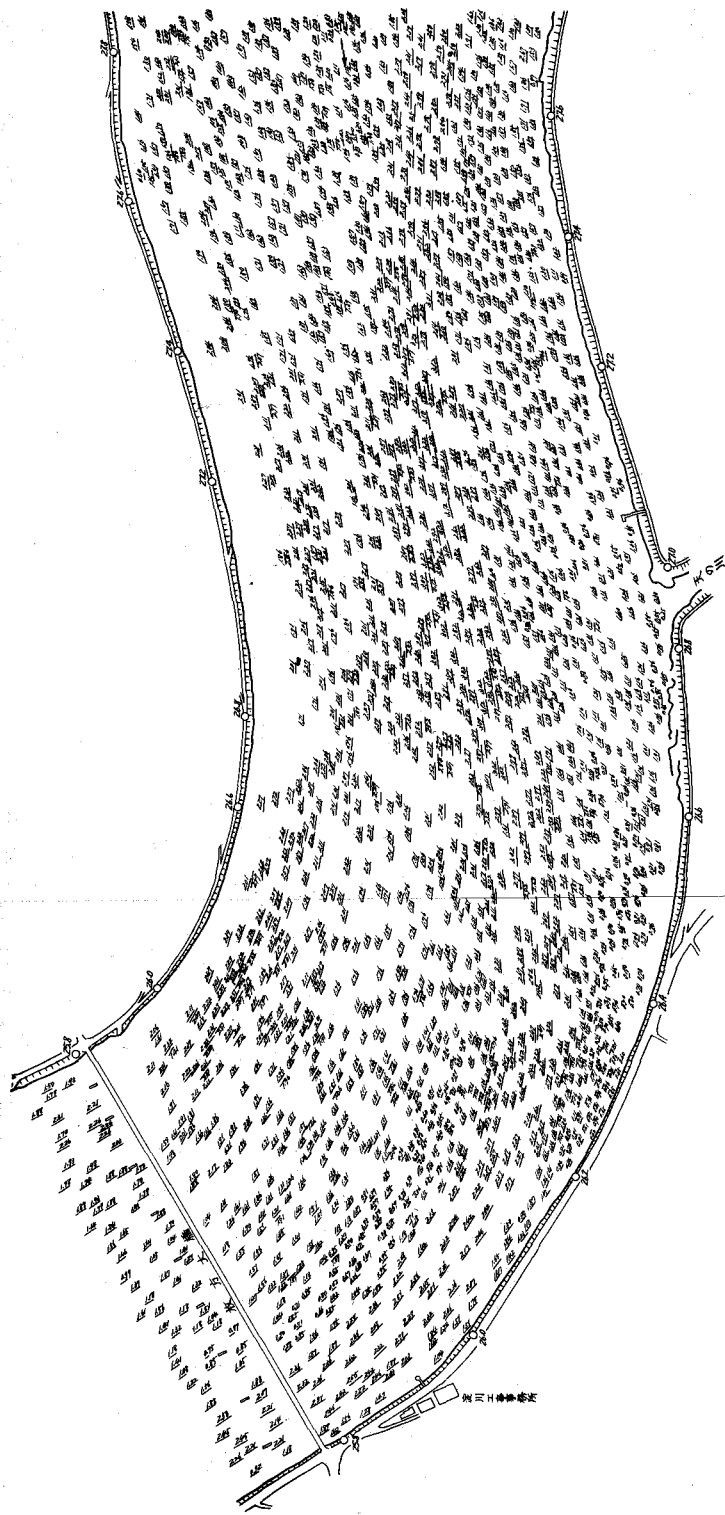


図 4.3 淀川の表面流速ベクトル (淀川工事事務所)

図 4.2 と同じ洪水、その上流測を示す。流れの模様が明瞭なのでそれからとったベクトル図

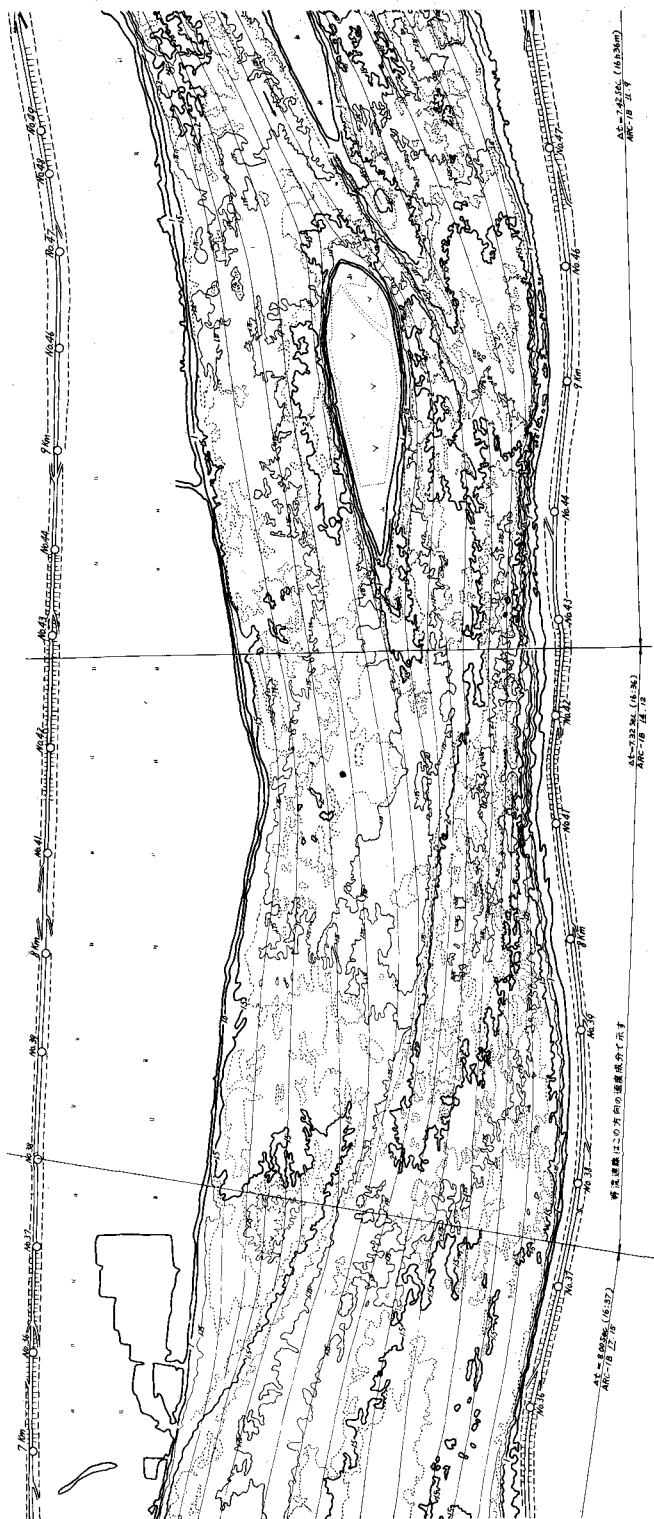


図 4.5 阿賀野川の等流速線と表面流向線 (阿賀野川工事事務所)

4.1. 9. 25洪水(16時36分)図の中央から下流4Kmの状態を図6.3 a, b, cにします。

図 4. 4

淀川洪水と撮影
水位

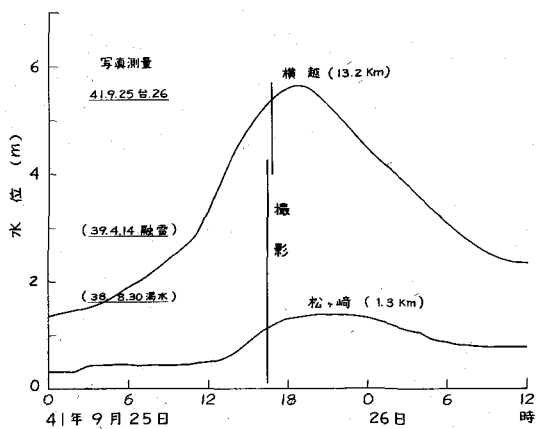
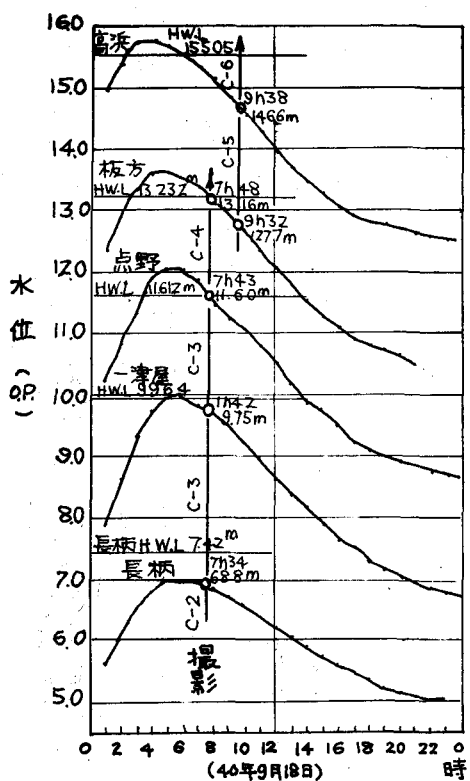


図 4. 6

阿賀野川洪水と
撮影水位



図 4.7 新北上川河口の流向と等流速線分布（北上川下流工事事務所）

4 1. 6. 3 0 台風 6 号 出水（1 5 時 4 7 分）

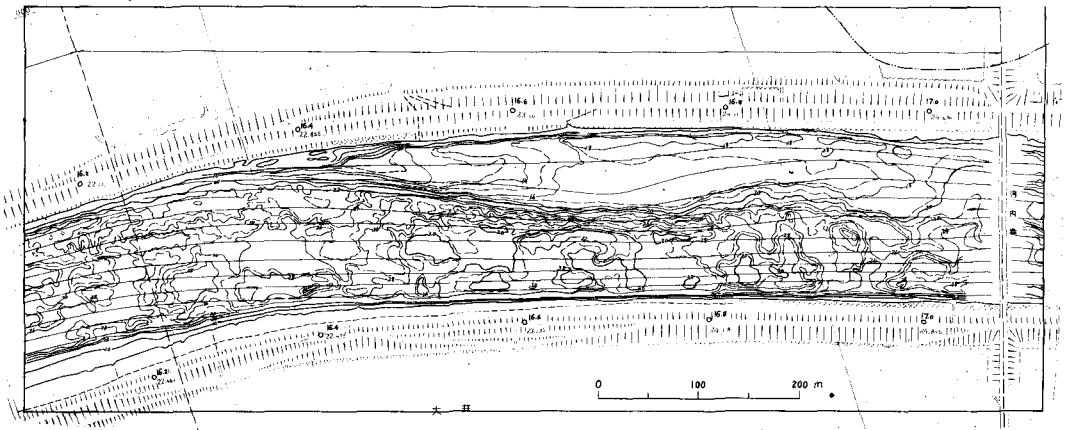


図 4.8 大和川の流向と等流速線（大和工事事務所）

4 0. 9. 1 8 台風 2 4 号 出水（朝 7 時 1 6 分）

図 6.6 a～d はこの図から下流 1.1 Km まで 6 Km 区間をしめしたものだ。

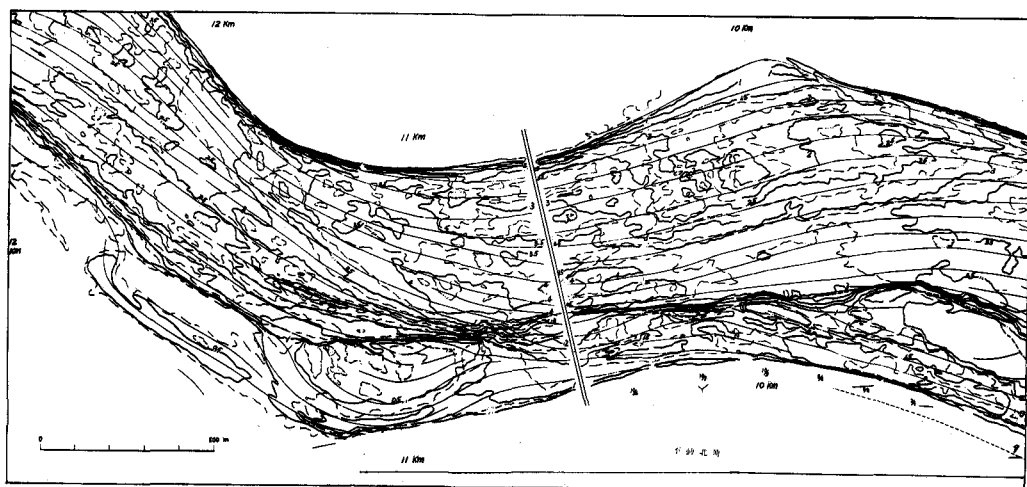
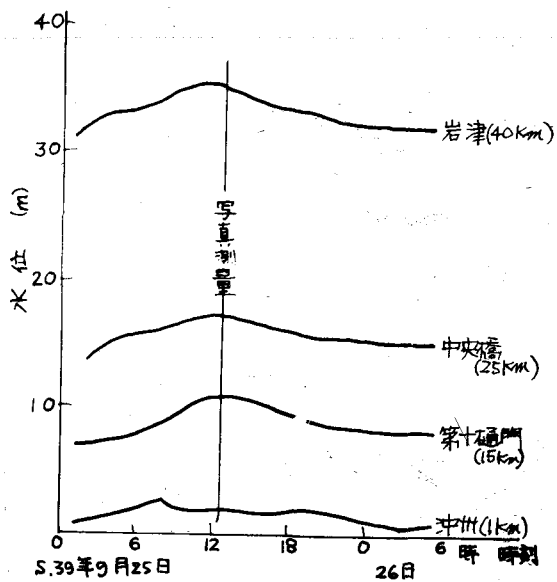


図 4.9 吉野川の流向と等流速線分布 (徳島工事事務所)

3 9. 9. 25 台風 20 号出水 (12 時 42 分)

8,000 m^3/sec の水位ピークの状態である。この部分はのちの図 6.8 の上下をつなぐ部分にあたる。湾曲河道における洪水の流向、流速分布をしめす良い例である。



← 図 4.10
吉野川洪水と撮影
水位

5 洪水流の縦渦構造

5.1 表面流速分布にみられる特徴

前章の諸例の等流速線図は主曲線を 20 cm/sec 、あるいは 25 cm/sec ごとに定めて描いたものであって、これらの図にはよくあらわれないが、さらに大縮尺図化とし、等流速線間隔をせばめると、図 5.1 のような流速分布をしめしてくる。これは洪水流の立体写真を観察すれば、ただちに気づくことであって、流速の速い部分と遅い部分が縦すじ状に交互に並んでみえるのである。

洪水流のみでなく、比較的水位の低い場合にも、水面のパターンには、同様な現象がみとめられる。写真 5.1 a b c は阿賀野川下流部の大淵地先における、夏の渇水時、融雪の中水時、台風による高水時のそれぞれの航空写真にみられた縦すじのパターンである。

洪水時に泡の多い写真のこの縦すじについて観察すると、泡の量の比較的多く分布するところと少ないところがそれぞれ縦すじ状に並んでおり、泡の多い部分が流速が速く、泡の少ない部分が遅いところにあたっている。

流れの表面に泡がよるということは、流れの水分子がそこから沈んでゆくことを示すものと考えられ、（以下このすじを収斂線と仮によぶ）逆に泡がすくないということは、下から湧き上る流れによって押しわけられている状態と考えることが出来る。

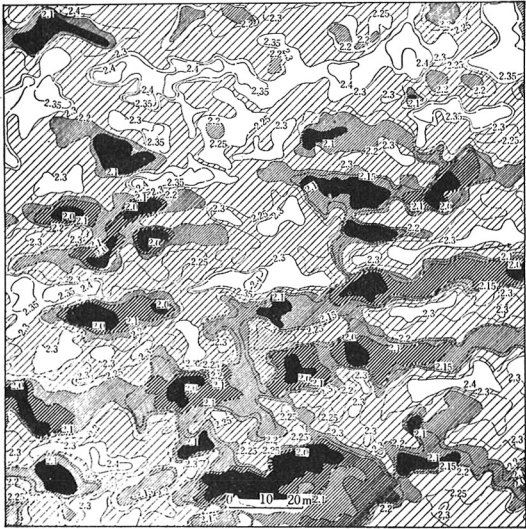


図 5.1 木曾川洪水流表面のくわしい等流速線図

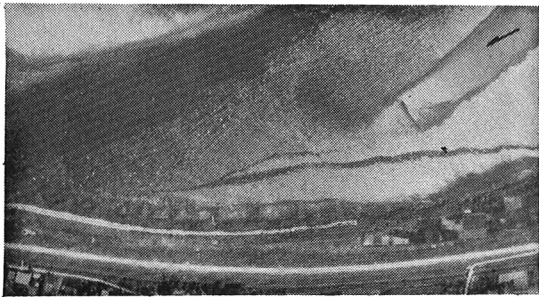


写真 5.1 a



写真 5.1 b

事実水の流れ、ことに洪水時の流れの表面には写真5.2の例にもみられるように、はげしい上下交換の動きがみられるのである。

写真5.1 a.b.cの説明

阿賀野川のa. 渾水時 b. 中水時
c. 高水時にそれぞれみられる水面の縦すじ(水位比較は図4.6) a. bは反射光、cは泡による模様、写真縮尺は3枚とも同じ、b. cは同一地域である。

(阿賀野川工事事務所)

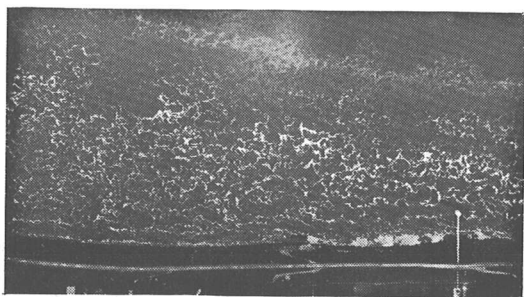


写真5.1 c

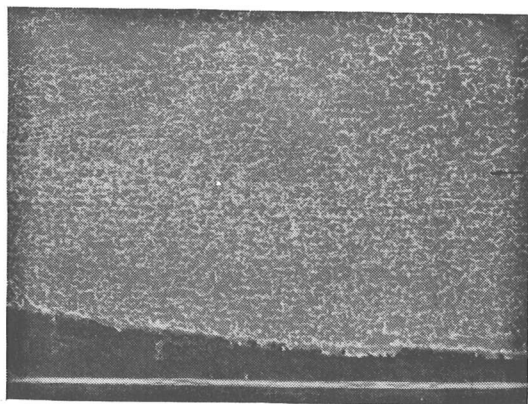


写真5.1 d 泡により縦すじがもっとも明瞭にあらわれた写真 (阿賀野川工事事務所)



←

写真5.2 増水時の湧きかえるような動きをみせる水面

荒川 40. 5. 27

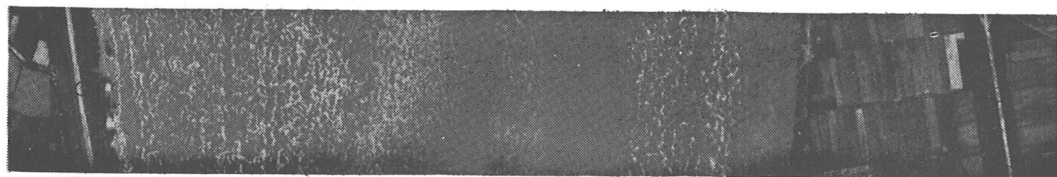


写真5.3 阿賀野川 6.8 Km測線付近、41. 9. 25洪水 (阿賀野川工事事務所)

ようにみえる洪水でも、その中でも特に表面流速の速い部分が、このように縦すじ状に分布しながら流れていることを示す、わかりやすい図である。それはある意味で、美しいといえるほどの分布をしめしているが、そのときの水位と出水後測量の横断面図から作成した等水深線図とを対比すると、（図 5.3）収斂線の間隔の粗密は水深の大小と対応していることがわかる。ある適当区間ごとの収斂線の間隔の平均値（の $\frac{1}{2}$ ）

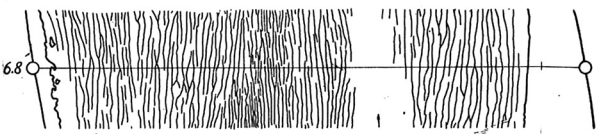


図 5.2 表面流速の速い収斂線の分布状況

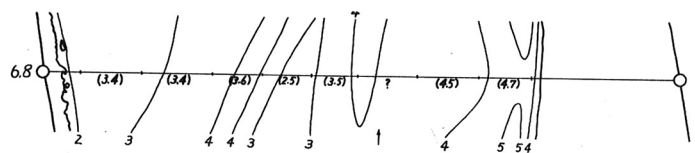


図 5.3 等水深線と縦渦の幅（カッコ内数字）の比較

の大淀川の斜め写真の一例であるが、水面の反射のしめすパターンの中に、流れの方向の縦すじが並んでいる状態が看取される。図 4.1 の浮標の寄り方と垂直航空写真の立体視により、判定された収斂線の位置を 3.2 Km の横断面図上に書きこむと、図 5.4 が得られる。図にみられるように、ここでも収斂線の並ぶ幅は、その水深の値のほぼ 2 倍という、明瞭な関係があらわれている。

これと同じ現象は、小規模な実験水路においても認めることができる。7) 8) 9) 10) 11) 表 5.1 は実験水路の砂床上にあらわれる縦すじの数と、水路幅／水深の値とを比較した筆者の実験値で、流速の如何にかかわらず、縦すじの幅は水深のほぼ 2 倍になってあらわれている。

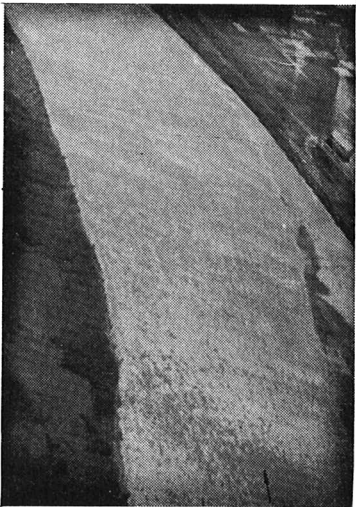


写真 5.4 大淀川のななめ写真
にみられる縦すじ

3 9 9 2 5

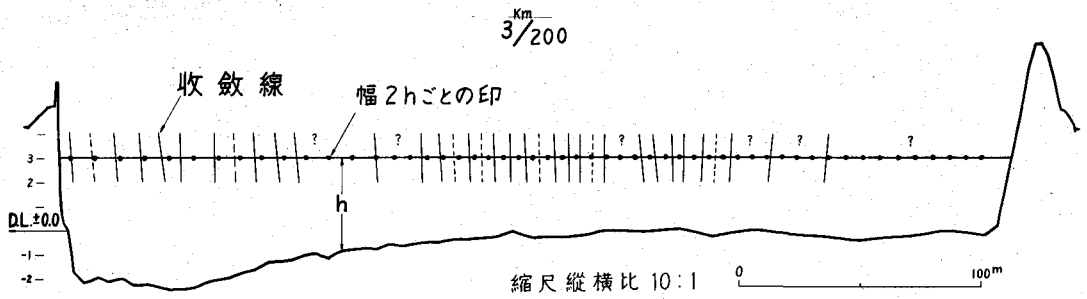


図 5.4 大淀川 3.2 Km 横断面における収斂線と水深の関係

表 5.1 タテスジの数と水深の関係

水路幅 1 3.2 cm (矩形断面) 平均砂粒径 1.2 4 mm において

流量	勾配	1/30	1/40	1/50	1/60	1/70	1/80	1/100	1/120
1.1	B/h タテスジの数	10.15 6~5					7.33 3~4	6.99 3	6.70 3
1.0	B/h タテスジの数	10.23 6		8.35 5	8.35 4	8.05 4			
0.8	B/h タテスジの数						8.80 4		
0.7	B/h タテスジの数					9.85 5	9.56 5~4	9.43 5~4	

(ただし B:水路幅 h:平均水深)

5.3 縦渦の立体構造

湧きあがる流れと沈みこむ流れが横に交互に並び、その間隔が水深のほぼ 2 倍ということは、流れの横断面において、図 5.5 のように並列する縦渦の存在を想像することができる。けれどもこれは単純ならせん流ではない。周知のように流速は底から水面に近づくとき増大するので、この渦に沿う流れは、あるいはサイクロイダルな動きに似た流速変動を示すかもしれない。

見方をすこしかえ、図 5.1 において流下方向の速度変動をみると、湧き上る列にも沈みこむ

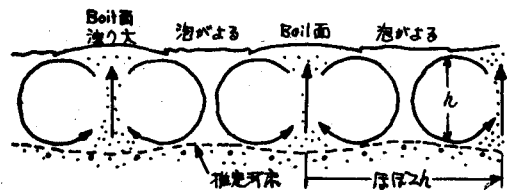


図 5.5 縦渦の横断面推定図

列にも、同様にある脈動がみられるようで（横方向の変化ほど明瞭ではないが）その波長はまた水深の2倍前後のようにもみることができる。

実際の流れを観察すると、湧き上ってくる流れは強い収束せる一本の流れのようであり、これが水面に丸い斑紋のようなものをひろげる。したがって湧き上る流れの列といっても、そのような現象が間けつ的に起って、つながっている列ともみることができる。反対に沈みこむ列といっても、その中には強く沈みこむ流れの束があるかもしれず、反対に底面に近づいてそれをひろげるような流れに変っているかもしれない。

表面では湧き上る部分の流速は遅く、沈みこむ部分の流速は速いが、底面では逆になっていることが考えられる。また面積的にみても、表面では湧き上る流れが占める部分がひろく、沈みこむ部分の面積はせまい。そして底面では沈みこんでくる流れの部分の面積がひろく、強く湧き上る部分の面積はせまくなっていると考えられる。

以上流れの乱れの立体構造を考えると、(1)流れの鉛直方向にみられる流速差と(2)湧き上る流れ、沈みこむ流れのもつ立体形状の特徴と(3)その湧き上りと沈みこみが縦渦的に配列されているということの、この三つを主要現象としてあげることができるのではあるまいか。その組合わせにおいて、何かモデル的なものを引きだすことはできないのだろうか。

航空写真測量で洪水流況を測定する場合、それは流れの表面の状態にかぎられ、また写真測量の性質上、それは瞬間的な流速分布を測定することになりやすい。瞬間的ということは流れの乱れそのものに当面することになり、その解明が必要となる。その立体構造との関連において表面の状態が理解され、また瞬間的な流速分布のもつ意味が理解されなければ、平均的な量との関係も、厳密には明らかにならないであろう。

6 洪水流の蛇行性

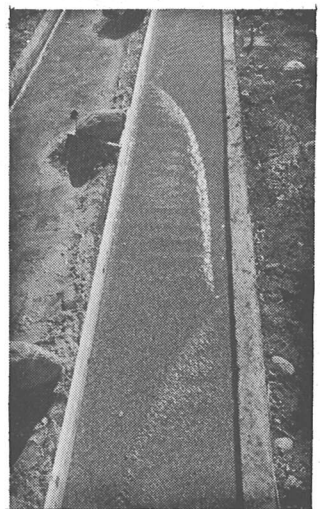
6.1 蛇行に関する一つの見方

河川の蛇行現象にはいろいろな複雑な要因があるようであるが、筆者は幅ひろい沖積河道における斜めの砂洲、砂礫洲の発達と、その際あらわれる水流の蛇行性について注目してきた。写真6.1は直線実験水路にできた、その典型的な斜めの砂洲の形である。

この砂洲は下流側に堆積がのびてゆくことにより、その形はしだいに前進移動する性質があり、水流の蛇行もその位置を下流側にうつしてゆく。

実験水路でみられる性質によれば、この砂洲の波長と前進速度と

写真6.1 直線実験水路に形成される
斜めの砂洲



は密接な関係があり、その一例は図 6.1 のごとくである。図にみられるようにその変動範囲は、波長、前進速度ともかなりりに幅がひろい。同一条件の水路で流量のみに変化を与えると、波長と前進速度の関係は変化しても、波長の形成範囲はあまり変わらないという性質がみられる。波長は同一でも流量が変化すればその砂洲の立体形状は若干変ってくるが、それが左右交互に斜めの砂洲として存在し、水流が蛇行するという状態は変わらないのである。いかえれば不定流のもとでも砂洲形成と水流の蛇行現象は存続し、しだいにその位置を下流にうつしてゆくのである。

実際河川の砂洲、砂礫洲について、長年月その位置移動がしらべられた例としてヨーロッパのライン河があり、¹²⁾

わが国でも阿賀野川下流部の例などがよく知られている。¹³⁾ その現象が小規模な実験水路の砂洲と同じ性質をもつものかどうか、その相似関係をたしかめる一つとして、実際河川でも洪水時にその砂洲、砂礫洲の形成がみとめられるかどうかということができた。これは実際河川でも洪水時に（実験水路にみられるような）水流の蛇行が起っているかどうかを確かめるといいかえてもよく、ここに航空写真による流況測定がはじめられたのである。

表 4.1 にかげられたこれまでの観測河川の中から、数河川をとりあげてその状態を説明したい。

62 阿賀野川

写真 6.2 は阿賀野川で発達する斜めの砂洲の一例である。なおここで＜砂洲＞というのは水面上にあらわれている部分だけをさす従来の呼び方ではなく、図 6.2 にしめしたように、淵から瀬、そして寄洲上までもふくめた河床全体の形、洗掘と堆積の一つの交互作用としてのリズムカルな単位形態をさすものとする。写真 6.2 または実験の写真 6.1 で明らかなように、この砂洲は下流側（前面）の傾斜が急で、その堆積前縁は明瞭に視覚にとらえられる。それで砂洲の位置は、平面図上ではこの前縁の線でしめすことにする。

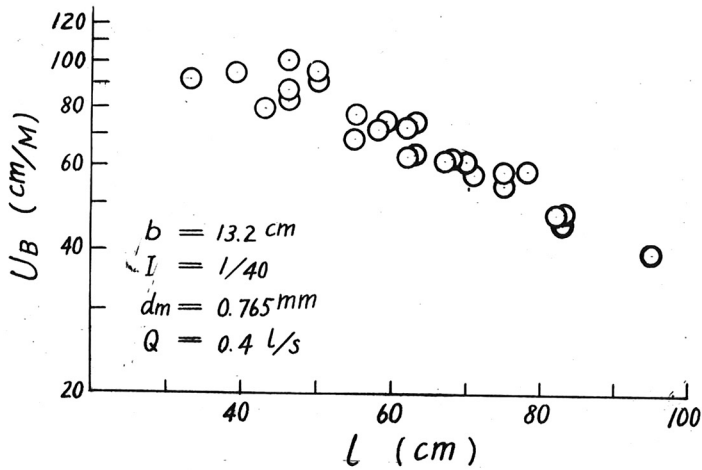


図 6.1 砂洲の波長と前進速度の関係（実験）



写真 6.2 阿賀野川下流の斜めの砂洲 →

2 4. 1 0. 1 3 （国土地理院）

阿賀野川の中で、白新線鉄道橋の上流、約4Kmの区間、砂洲2コ、
 水流の蛇行約1波長をとり上げ、注目してみる。その区間の昭和
 22年(1947)以降、13回にわたって撮影された航空写真か
 らよみとられた砂洲の位置は図6.3 aになる。砂洲はしだいに下流

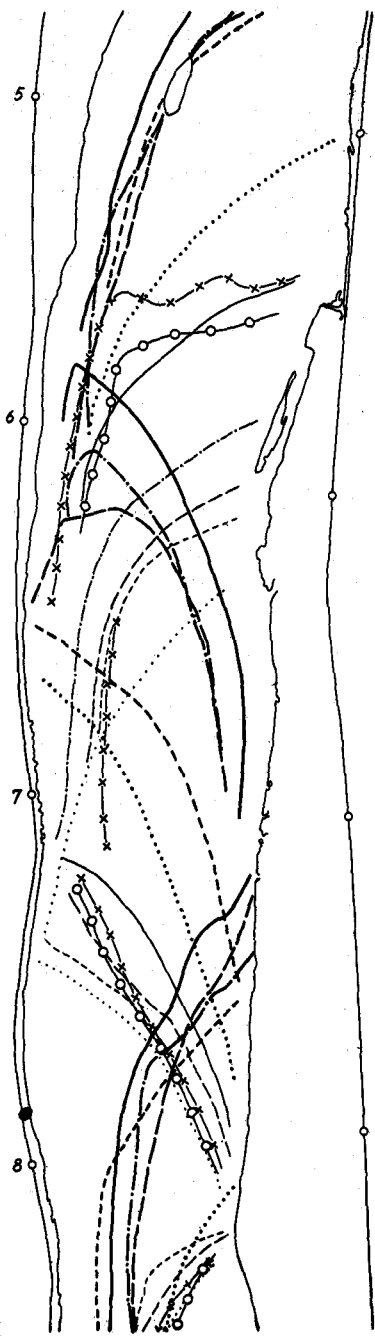


図 6.3 a

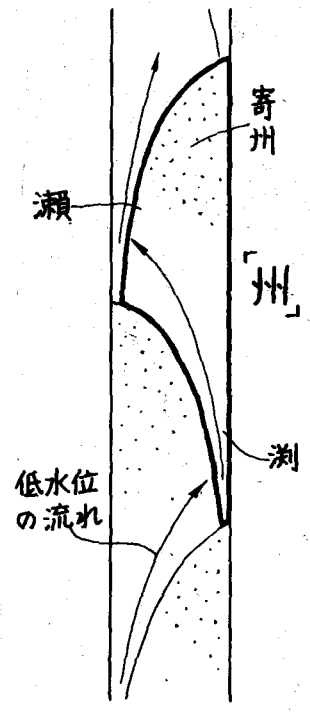


図 6.2 「洲」とよぶ範囲

①		1947.4.12
②	-----	" 8.15
③	————	1948.7.28
④	————	" 10.13
⑤	—○—○—	1952.4.7
⑥	—×—×—	" 10.19
⑦	————	1955.10.13
		1956.4.24
⑧		1958.10.10
⑨	-----	1961.11.15
⑩	————	1963.8.30 渇水
⑪	— · — · —	1964.4.14 融雪
⑫	(略)	" 9.15
⑬	————	1966.9.25 台風26号 出水

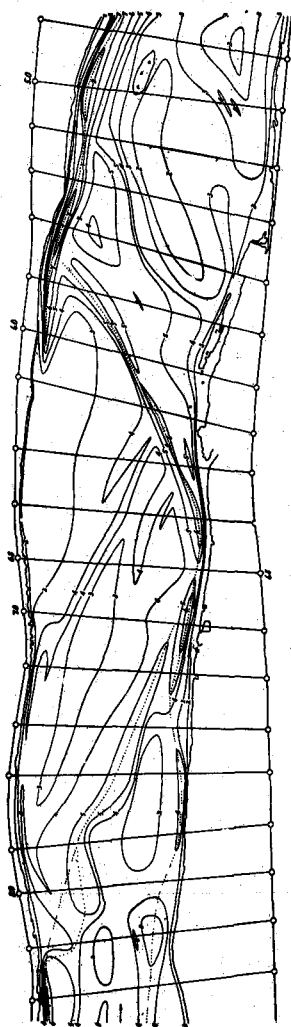


图 6.3 b

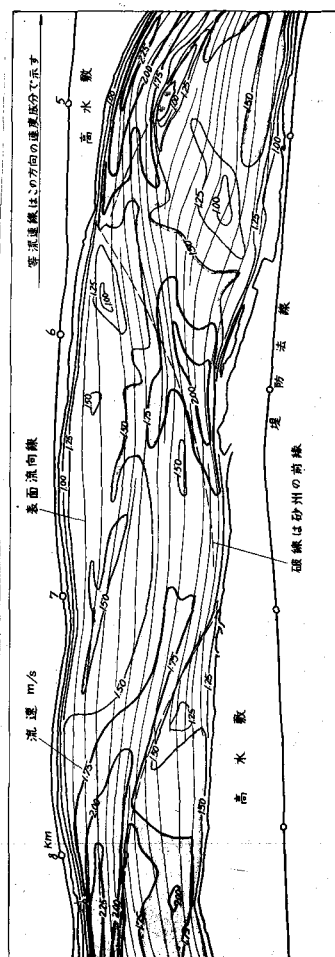


图 6.3 c

阿賀野川の a . 砂洲と b . 4 1 . 9 . 2 5 洪水時の等水深線および c . 流向・等流速線分布

側に移動し、中央の砂洲はこの20年間に約1,600 mの移動量をみせている。

この砂洲の立体形状は等高線により表示できるが、41年台風26号出水を撮影したときの水位をもちい、等水深線であらわしたものが図6.3bである。これは出水後の河床横断面図から作成したものであるが、出水前の資料から作成したもので、ほぼ同様な形をしめしている。

この等水深線が、洪水中の果して正しい形をしめすものかどうか、確証は得られないにしても、さきにものべた縦渦の発達する規模とこの水深の分布状態がかなりよく合っていること、そしてさきの図 5.2 の部分のみでなく、全水域のそれを検討してそれが指摘できることは、大局的に、洪水時に、このような水深分布の傾向をもつこと、すなわち洪水時に河床にはこのような斜めの砂洲形状が存続していることは、ほとんど

確実とみて間違いないであろう。

このことは等水深線図のみでなく、洪水流の流向および流速分布からもいうことが出来る。図 6.3 c は、さきの図 4.5 中の等流速線の大勢を、簡略化して表現したものである（流量約 $4,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ ）。ここにみられるように流速の速い部分は左右岸交互に、ほぼ淵にあたるところに（ややその下流に）あらわれており、流向はそこからひろがってゆく。そして流速も拡散的に低下し、やがて対岸にふたたび流速の速いところがあらわれる。流速の最も遅いところは減水後真先に寄洲となって水面上にあらわれる。斜めの砂洲の尖端付近、水深の浅い部分にあたっており、これら全体の状況は、実験水路上で砂洲をつくりながら蛇行する水流の状態ときわめて似通うものであるといえる。

砂洲の移動を走時曲線であらわすと図 6.4 となる。これはライン河の例あるいは実験の例と似て、14) 砂洲の前進速度が波長との関連のもとに変動する状態を（ライン河や実験例にくらべれば時間的にも距離的にも一部であるが）しめすものといえよう。この20年間の流量変動を、ほぼ警戒水位の流量 $2,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ を超えたもののみでしめすと図 6.5 となる。このような流量変動下でも、斜めの砂洲が存在しつづけ、流量と波長と前進速度の三者の関係において、動的な均衡をしめしつづけるというところに、砂洲形成との相互作用としての水流蛇行現象の、重要な性質があるものとみられる。

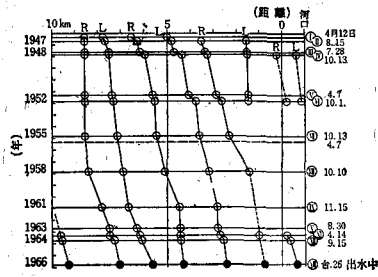


図 6.4 阿賀野川砂洲の走時曲線

6.3 大和川

大和川は大阪平野に出た柏原から約250年前に切替えられた人工水路を流れ、堺で大阪湾に出る比較的曲りのすくない、幅200mの等幅水路で、ここでも斜めの砂洲が交互にきれいに蛇行して形成されている。40年24号台風出水の観測結果の中から11Km~17Kmの、砂洲6コ、蛇行3波長の6Km区間をとりあげてみると、次のようである。なお6Km区間とはいえ、その全域をそのまま

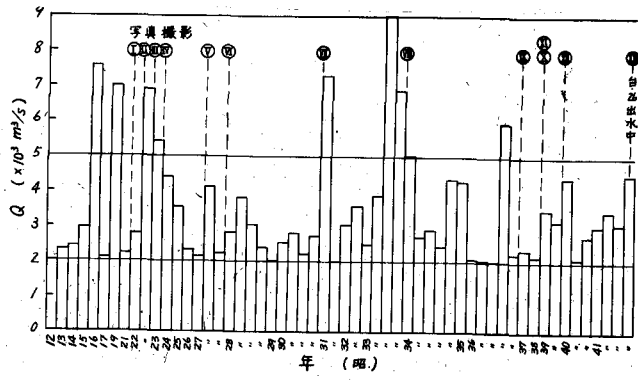


図 6.5 $2,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ をこえる阿賀野川の出水と航空写真

ここに図示するのは容易ではないので、幅に対して流れの方向の距離を $1/8$ に圧縮した直線状の略図であらわすことにする。

図 6.6 a はさきの図 4.8 のような測定結果の概略をあらわした洪水の表面流向および等流速線図である。
(流量 $900 \text{ m}^3/\text{sec}$) 6 Km 区間、3 波長できれいに蛇行しており、流速の大なる位置のあらわれも、阿賀野川の場合と同じように、左右岸交互の、その淵の部分(若干下流)に対応している。

出水直前の砂洲と低水流路の位置、および洪水の表面流向線と主流部をつらねる線をあらわしたものが図 6.6 b である。主流部の位置と低水時の流路は大体において一致し、これは阿賀野川の図 6.3 b、c を比較した場合と同様である。それに比べると表面流向線の蛇曲の程度はすくないが、砂洲の位置との対応では、やはり阿賀野川の場合と同じ流れかたをしめしている。

蛇行の状態を流量で表現したものが図 6.6 c である。各断面の水位を写真測量および量水標から推定して流量を計算し(表面流速の更正係数を仮に 0.85 とした)左岸から 10% ごととの流量区分をして、その位置をそれぞれ下流につらねたものである。また表面流向線を点線で参考に併入した。これで見ると一部を除

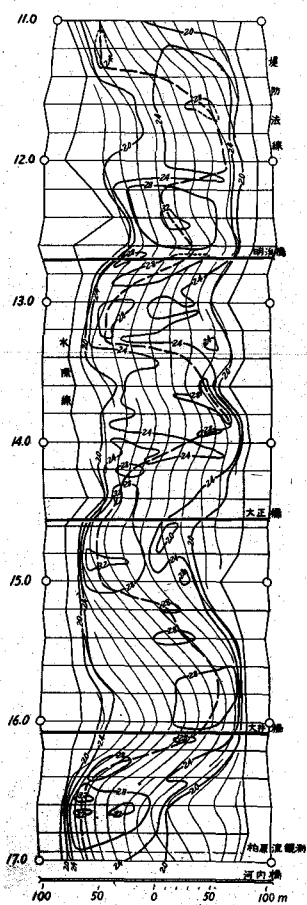


図 6.6 a 大和川 40. 9. 18
洪水の表面流向と等流速線分布

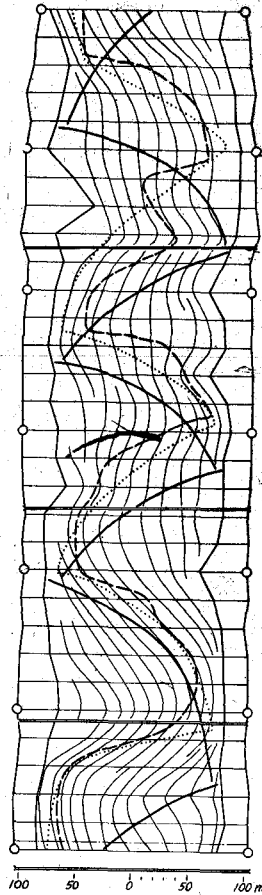


図 6.6 b 同出水前の砂洲の位置
(太実線)と低水路(点線)
および洪水主流部(太破線)
表面流向線(細実線)

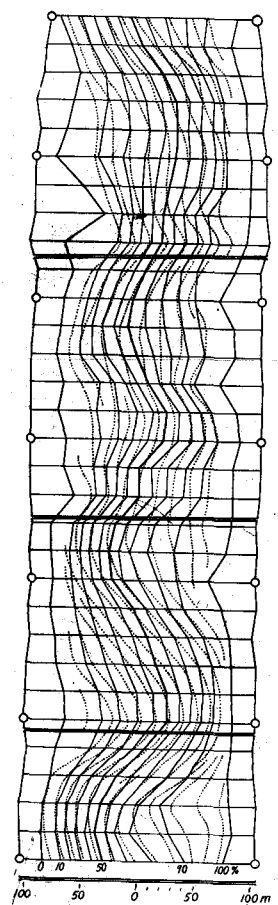


図 6.6 c 10% 幅流量線(実線)
と表面流向線(点線)

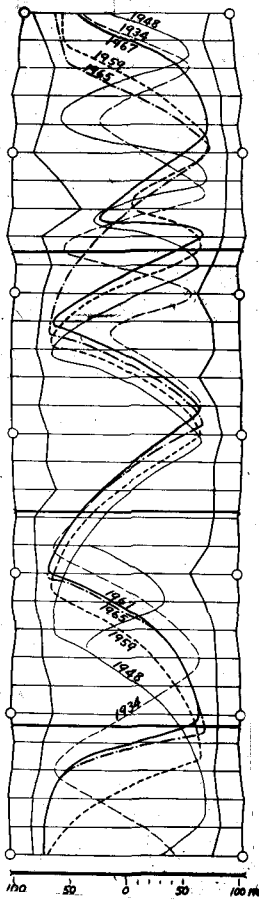


図 6.6 d 低水流路の変遷

てしらべると、その結果の一部は図 6.8 のごとくである。旧吉野川の分派地点から上流中央橋までの 10 km 区間の蛇曲河道では、各年次の流路は乱れてはいても、それらはある範囲内にまとまり、束のようになって蛇行している。すなわち砂洲の前進が河道の曲りでとめられた形のようにみられる。その安定的な流路の走り方は、図にみられるように、凹岸の曲頂部より少しく下流で岸に接し、凸岸の曲頂部まで岸にそい、次に同様な状態に対岸に移るという形をしめしている。この流心線の走り方は北海道の蛇行河川でもいたるところにみられるもので、蛇

けば、流量線と表面流向線はほぼ平行しているといえよう。

以上、図 6.6 a～c は、大和川 $900 \text{ m}^3/\text{sec}$ 洪水流の実態である。これに対して実験水路上の砂洲を作る蛇行水流の特性をさらに調べ、これら実際の状態と対比してゆけば、河川蛇行の性質は今後一層明らかになるものと思われる。なお図 6.6 d は、昭和 9 年（1934）以来の低水路位置の変遷をしめすものである。昭和 9 年はすこしかけはなれているが、昭和 23 年（1948）以降の状態は、明治橋下流を除けばしだいに前進流下した状態がみられる。なお明治橋は橋の長さも短い、橋脚の間隔もいちじるしくせまい、斜めにかかった古い木橋で、その影響が下流にいろいろな面であらわれている。

6.4 吉野川

阿賀野川と大和川は河道がほぼ直線、あるいは曲りがゆるやかで、砂洲がしだいに前進流下してゆく場合であった。けれども実験水路における観察によると、河道の曲り方がある限界をこえると、砂洲の前進はそこでとめられてしまう。図 6.7。砂洲の前進をもたらし前面の堆積が、凹岸で強まる流れに運び去られて形としての前進がとまるのである。

吉野川の明治 29 年以来的の流心線の変遷をいろいろな資料をあつめ

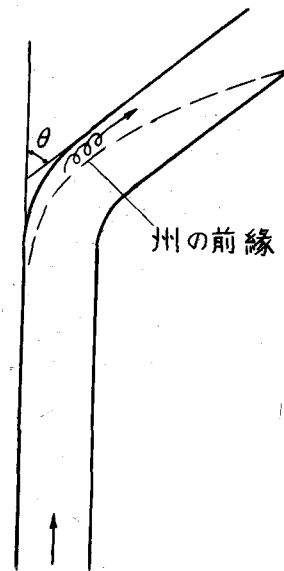


図 6.7

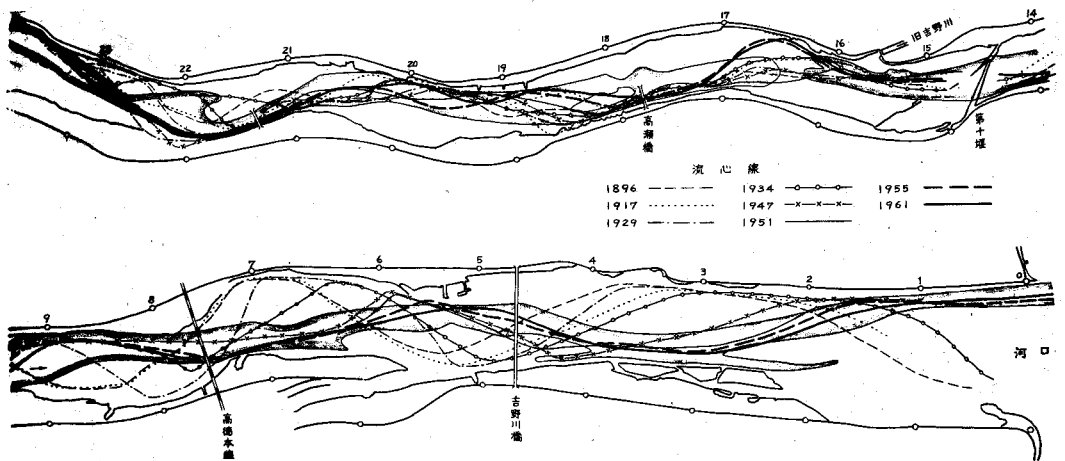


図 6.8 吉野川流心線の変遷と 3.9. 2.5 洪水の主流部 (ボカン模様)

曲河道の (迂曲河道ではない) 一般的な性質をしめすものとみられる。¹⁵⁾

これにたいし河口から 10 Km 区間の直線的な河道では、流心線は阿賀野川などと同じく絶えざる前進をしめしている。河口付近の左岸では、この 65 年間に約 2,500 m 水衝地点が下流側にずれ、明治時代には右岸ぞいに流心が海に出、左岸側に洲がついていたのに、現在は反対に流心は左岸に移り、洲は右岸側につくようになっている。(これと同じく阿賀野川河口でも、大正時代は左岸側から Bar が出ていたのが、現在は右岸側から出ている)

図 4.9 に一部をました昭和 39 年 20 号台風出水の流速測定図から、主流部として 1.4 ~ 2.4 Km 区間は 3.75 m/sec 以上、河口 ~ 9 Km 区間は 3.00 m/sec 以上を仮にとり、その位置をボカン模様で図 6.8 内に記入すると、その走り方は蛇曲河道部分では安定せる流心線群とほぼ同じ位置、河口の直線河道部分では、変遷する流心線の中の最新の線にほぼ沿ってあらわれた。洪水時の主流部が現在の低水流路の位置とほぼ同じ場所にあらわれることは、阿賀野川でも大和川でも同様にみられてきたところである。

現在の低水流路は、だいたい河床高度のもっとも低い位置といってもよく、出水の場合にも水深大なる部分となることが考えられる。このことについて土木研究所石崎勝義氏も「河道内の流速分布—吉野川 39 年洪水の観測より—」¹⁶⁾ として、水深と流速分布の対応性がよいことを指摘されている。

またこのことはどのような部分に河床の低い部分ができるかということを、前記のひろい意味での〈砂洲・砂礫洲〉の形成という現象とともに考えるべきことを示している。洪水流の航測は最近のことであるが、もし吉野川河口付近で明治時代に洪水航測ができたとしたら、主流部はおそらく図 6.8 中の 1896 年の細破線に近いところにあらわれたことは間違いのないであろう。そして砂洲の前進とともに、洪水時の主流部の蛇

行も下流側にうつり、そして現在にいたったと考えられる。

この河床がひくい部分が洪水時に流速が大きいということを逆にかえして、では改修工事で低水路をふかく掘れば、そこは洪水時、必ず流速大なる場所になるかという問題がでてくる。これは河道計画上の一つの重要な課題であると考えられるが、そのよい例として次の淀川の場合をみたい。

6.5 淀川

図 4.4 にみられたように、40年24号台風では、淀川では計画洪水位を上まわる大出水があった。そしてピークはすぎても一部ではまだ計画洪水位の状態にある時点において航空写真撮影が行なわれた。

淀川は舟運の要請のため、大規模な低水路工事が早期に行なわれた河川として知られている。その平面法線形の決定にあたっては、当時において周到な検討がおこなわれている。¹⁷⁾ 水深確保のため低水路幅はせまく、低水路満杯流量が約 $1,000 \text{ m}^3/\text{sec}$ という低さのためもあるけれども、高水敷の荒廃が甚だしい河川としても問題になってきた河川である。この川において低水路再改修計画が立てられる折、計画水位に近い洪水時の表面流速分布状態が明らかになったことは意義がふかいといえよう。

測定図化は等流速・流向線図、ベクトル図および横断流速分布図が、長柄から三川合流地点まで、約30 Kmにわたって作成された。図 6.9 は横断流速分布図の一例で、淀川では流速分布が必ずしも水深の大小と対応していないことが明らかである。低水路の水深は約10 m、高水敷は約5 mであるが、低水路より高水敷において流速の速い部分が随所にてている。

このことはのちの図 7.5 でも明白であり、その平面図、図 4.2、または文献2) P. 15 の図面をみても、主流部が低水路位置から外れてゆく状態が明らかにみとられる。

これを部分的にみないで淀川全体を大観してみたい。そして主流部がどのように低水路から外れ、どこを走っているかについてみたい。図 6.10 はその概略をしめす図である。太い矢印の実線が主流部であり、その走り方は一見して堤防のメアンダと関係があることがわかる。なおこの主流部の走り方は、表面流向線と一致しているわけではない。表面流向線と主流部の関係は、図 6.3 c 阿賀野川でも図 6.6 b 大和川でもみられてきたとおりである。淀川でも表面流向線の蛇行の状態はこの主流線よりはかなりゆるい。

この堤防のメアンダと関係のある主流部の

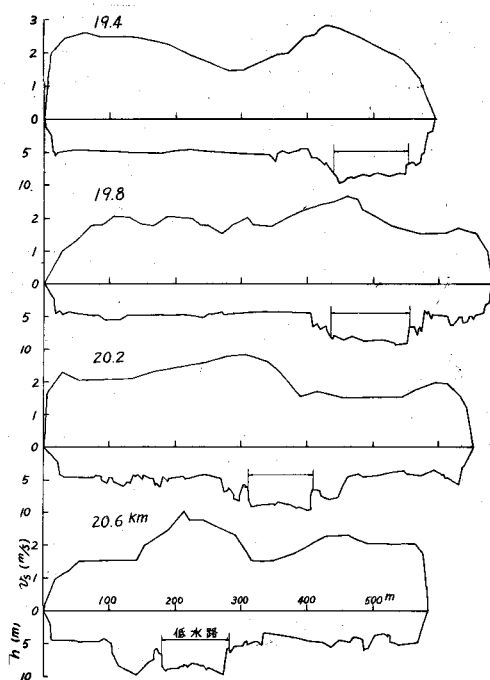


図 6.9 淀川の流速分布と水深

走り方は、吉野川蛇曲河道の安定流路の走り方と同じ傾向にある。そして図 6.11 のように淀川の低水路は、その洪水主流部とは全面的にピッチがずれていることが指摘される。高水敷の荒廃の特にいちじるしいところは、この主流部が、低水路から高水敷上にのし上っているところと一致している。

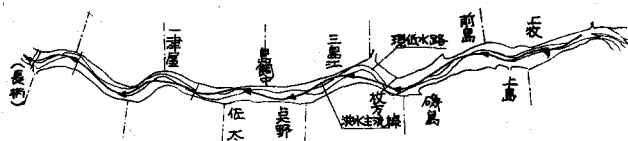


図 6.10 淀川低水路と洪水主流線

(ただし磯島～点野間の主流線はこれより少し複雑であるが、改修のさいはこうありたいという線が入れてある)

では現在の低水路をもし今回の洪水主流

部の位置に動かしたら、次の洪水では主流部はさらに下流側に移らないかという疑問がおこる。これに対し淀川における史実の中にその答があるように筆者には考えられる。文献 17) の淀川低水路計画書の中に、

古来“航路変化なき 10 地点”がしるされており、それが図 6.10 内にしるした地名である。航路変化なき地点というのは安定した水衝部の意味でもあり、それは今回の洪水の主流部の接岸地点と極めて関係ふかいのではないかと考えられるのである。この詳細についてはまだ検討の余地があるが、今回の洪水主流部は現在の堤防法線に対して必然的にあらわれる位置にあり、過去の洪水でも、また将来の洪水も、同様にあらわれる位置、すなわち吉野川蛇曲河道でみられたような、安定的な流路にあたるのではないかと考えられる。いずれにせよ与えられた法線形をもつ河道内において、洪水時の主流部はどういう場所を走ろうとするか、その性質をたしかめて、もし安定性があるならば、その場所に低水路を定めるといふ配慮が必要であろうか考える。

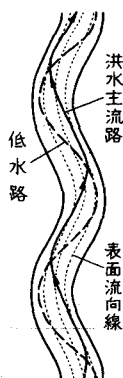


図 6.11 淀川の低水路と洪水主流路

近年河道計画において、高水敷幅や高さ、低水路法線などをより合理的に決めたいという機運がみられる。その最も基礎となるべき洪水流の蛇行性の研究のためにも、またさかんに用いられるようになった大型移動床模型の実験のためにも、写真測量は将来有意義な

資料を提供するものと思われる。

7 流量測定

7.1 方法

航空写真測量による表面流速から流量を測定するためには、1) 流れの表面の流方と写真測量によるその測られ方、2) 瞬間的な流速分布のもつ意味とその変動性、3) 流れの模様を利用する場合と浮標のみによる場合との比較、4) それらの結果と平均流速との関係、5) その時の河床横断面形、水深のとり方、など、基礎的ないろいろな研究課題を解決してゆかねばならない。それらは今後に期待されるとして、さしあたり測定諸例にみられたような結果から、流量を試算してみたい。

浮標のみによる測定例は散布密度の問題や、その中間部分のとり扱い方など、まだわからないことが多いので、等流速線図から検討してみることにする。

等流速線図は図化機の基線方向速度成分であらわしてあるので、ある横断測線上のその値をそのまま使い、のちに機械基線の方向と横断測線のなす角度によって、流過断面積を補正すればよい。この等流速線図は、飛行機で撮りまくる、その河川（模様のあらわれる）全域で測定、作成し得るので、河川の全面で試算できる特長がある。けれども水位の問題があるので、ここでは主として建設省の流量観測所地点での比較をこころみる。

7.2 長良川（墨俣）

長良川の墨俣（すのまた）流量観測所は河口より39Km、国道21号線の長良大橋の下流側にある。昭和39年9月25日、台風20号による出水の際、写真を撮影する飛行機は、この上空を14時47分に通過した。量水標水位は5.31m、15時の5.36mのピークの直前であった。建設省木曾川上流工事事務所の地上観測は15時から30分間、第1回目の表面浮子による観測がおこなわれた。

航空写真により測定された等流速線図は図7.1、流量観測用測線の第1断面の流速分布図は図7.2である。ここには当然のことながら橋脚の後流の影響があらわれている。

建設省工事事務所の観測は橋脚を区切りとした6断面において、その各々の中央から表面浮子が投下された。その結果は表7.1のごとくである。航空写真から判定される流向によれば、その流線は図7.1内に点線で記入されたごとくである。

飛行観測と地上観測の時間差は13～43分、水位差は3～5cm、ピーク直前の上昇期とピーク時のちがいがあ。一般に水位上昇期に最大流速があらわれる、そのこま

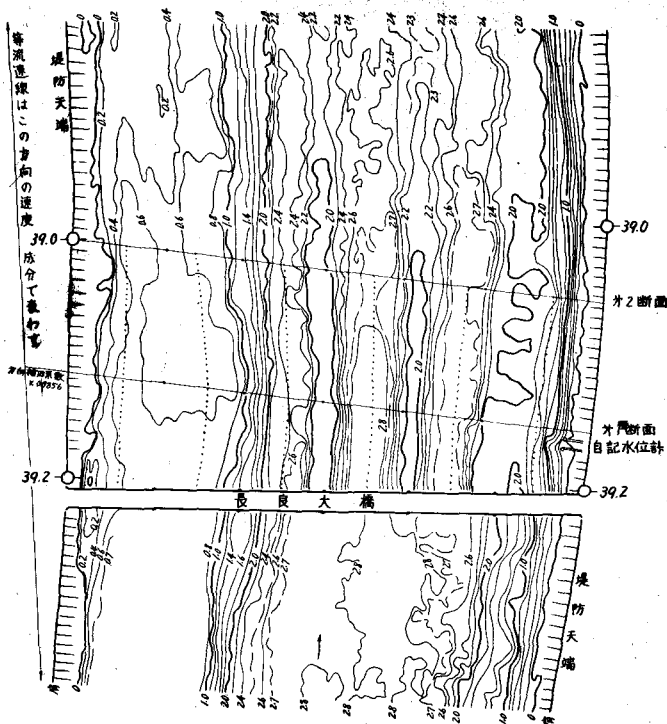


図7.1 長良川・墨俣の39.9.25洪水の等流速線分布（14時47分）

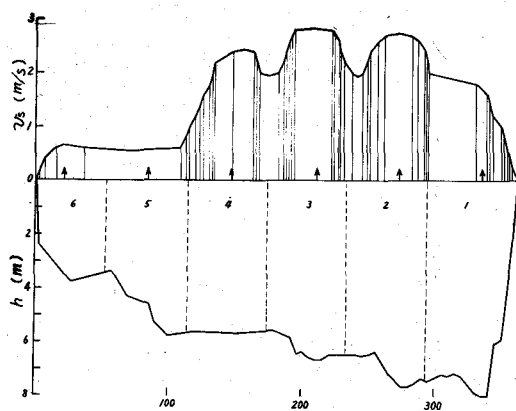


図 7.2 墨俣第 1 断面の流速分布と水深。
矢印は橋上の所定の位置から投下する
浮子が流過するところ。

かい検討はさておいて、双方の値をそのまま比較すると表 7.2 となる。速度勾配の強い第 1 区間から主流部の第 2、第 3 にかけてはほぼ対応する値がみられ、第 4 区間から第 5、第 6 にかけてはかなり違った値がでている。表面流速の更正係数とともに 0.85 とした流量は、地上の $3.640 \text{ m}^3/\text{sec}$ 航測の $3.110 \text{ m}^3/\text{sec}$ という値がでた。地上観測ではスパンの中央から流すため、その区間内ではほぼ最大流速をしめすところを浮子が流れる可能性が強い。それで航空観測量による等流速線図で、各区間内の平均流速（水深も加味した流量から）を計算すると、同表内にしるしたような値になる。その比は第 5 区間を例外として 85～96% の減となる。

もし図 7.1 の等流速線図が正しいとして、地上と航測が同時に行なわれたとする。スパン中央から投下された浮子は点線のごとく流れたと仮定すると、投下浮子による流量は $3.421 \text{ m}^3/\text{sec}$ となり、航測により詳細に測られた流量 $3.110 \text{ m}^3/\text{sec}$ のちょうど 10% 増となる。

表 7.1 長良川・墨俣流量計算書

昭和 39 年 9 月 25 日

測線 番号	浮子	投下 時刻	流下 時間 (sec)	浮子流 下速度 (m/sec)	更正 係数	更正 流速 (m/sec)	区 分 断 面 積			区 分 流 量 (m^3/sec)
							第 1 (m^2)	第 2 (m^2)	平均 (m^2)	
1	表面	15.00	50.2	1.99	0.85	1.69	410.0	409.3	409.7	692.4
2	〃	.05	34.9	2.87	〃	2.44	456.0	442.4	449.2	1,696.0
3	〃	.10	35.6	2.81	〃	2.39	407.0	403.6	405.3	968.7
4	〃	.15	52.3	1.91	〃	1.62	373.0	380.5	376.3	610.4
5	〃	.20	111.0	0.90	〃	0.77	291.0	288.6	289.8	223.1
6	〃	.30	279.0	0.36	〃	0.31	153.0	164.4	158.7	49.2
計										3,639.8

表 7.2 地上観測と航空写真測量の比較

長良川・墨俣

区 間 番 号	地 上 観 測		航 空 写 真 測 量			
	時 刻	表面浮子 流 速	撮 影 時 刻	スパン中央か らの流線にお ける流速	区 間 最大流速	区 間 平均流速
	時 分	m/sec	時 分	m/sec	m/sec	m/sec
1	1 5.0 0	1.9 9	1 4.4 7	1.7 0	2.0 0	1.6 3
2	1 5.0 5	2.8 7	〃	2.7 5	2.7 5	2.4 9
3	1 5.1 0	2.8 1	〃	2.8 4	2.8 5	2.5 7
4	1 5.1 5	1.9 1	〃	2.4 0	2.4 5	2.0 4
5	1 5.2 0	0.9 0	〃	0.6 0	0.7 4	0.6 1
6	1 5.3 0	0.3 6	〃	0.6 4	0.6 5	0.5 7
水 位	平 均 5.3 5 m		5.3 1 m			
流 量	3.6 4 0 m ³ /sec		3.1 1 0 m ³ /sec			

なお等流速線図による流量計算は、一つ一つの対応水深をもとめると面倒なので、つぎの図 7.3 のように幅 10 m ごとの平均流速と平均水深を図上で計測して流量を試算した。また図 7.5 は地上観測と航測の水位流量をプロットしたものである。

7.3 木曾川（起）

木曾川の起（おとし）流量観測所は河口より 3.4 Km、浜尾大橋のところにある。長良川と同じ、昭和 39 年

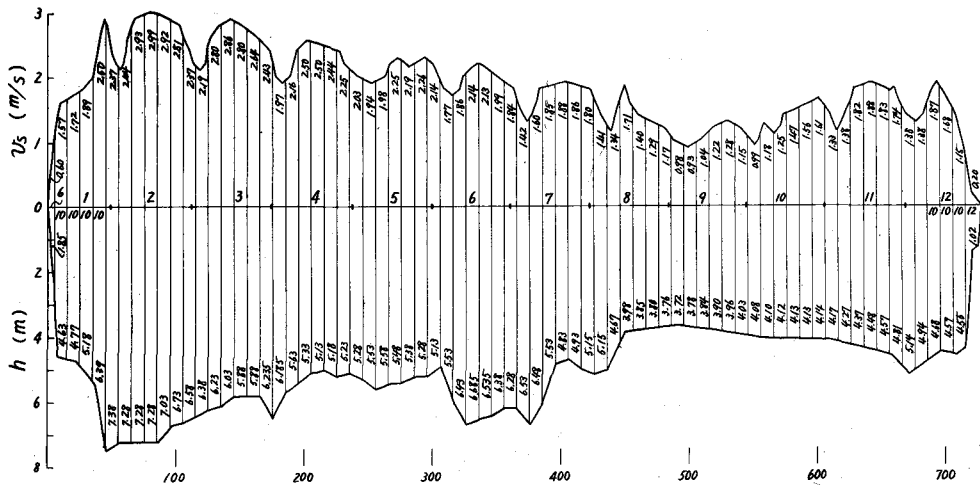


図 7.3 木曾川・起第 1 断面の 39.9.25 洪水の流速分布と水深（11 時 10 分）

9月25日、増水期の16時10分、量水標水位4.60mのときに航測がおこなわれ、地上ではピーク直前の18時から19時30分まで、4回の観測がおこなわれた。航測による流速分布は図7.3となり、更正係数を0.85と仮定した流量は6,216 m^3/sec となる。

起において38年当時承認されている水位-流量曲線は図7.4、それについて4回のピーク時の地上観測の結果と増水時の航測の結果をプロットすると、かなり流量増の方に外れてくる。起でも墨俣と同様に、橋脚の後流のかなり深い影響がみられるが、航測値の10%増を仮に地上値とすると、その外れはさらに大きくなる。流量曲線は増水期と減水期でループを描くが、39年の水位-流量曲線は図の右に動くべきかもしれない。

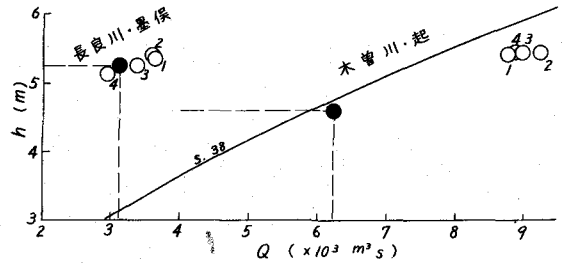


図 7.4 水位と流量

(白丸：地上、数字は観測順序、黒丸：航測)

7.4 淀川（枚方）

さきに図4.2にしめした等流速線図で流量を試算してみる。流速分布と流れの断面図は図7.5である。淀川の流速分布の性質は、さきに図6.9にかかげたように、流速と水深の対応は必ずしも正常ではない。枚方の断面でも最深箇所が最低流速をしめすほどに異常であるともいえる。また左岸では橋の歯状に水制が出ており、たまたま第1断面では水制背後の深掘れ箇所にあたっているが、このような場所の有効断面をどうと

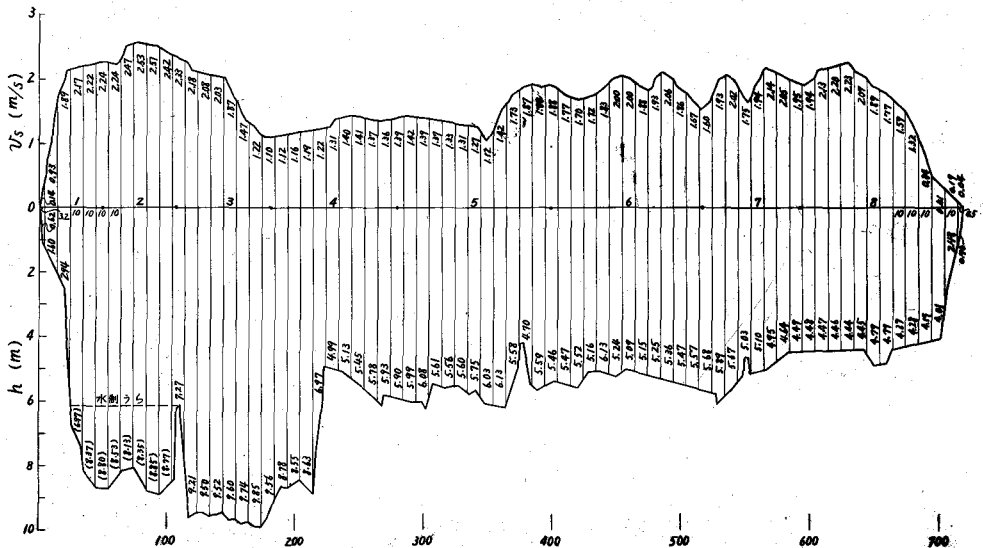


図 7.5 淀川・枚方第1断面の40.9.18洪水の流速分布と水深（7時48分）

るべきかに問題がある。流量試算は水制の高さ以下は死水域とし、また更正係数を同じく 0.85 として行なうと、流量は $5,931 \text{ m}^3/\text{sec}$ となる。

枚方における地上観測は出水当日の午前 0 時から 15 時まで計 7 回、竿浮子により建設省淀川工事事務所によっておこなわれた。水位-流量の関係は図 7.6 である。これによると淀川の場合の航測値はほとんど $H-Q$ 曲線上にのっている。淀川では木曾川や長良川ほど橋脚の影響は強くあらわれておらず、仮に地上を航測の 5% 増とすると約 $6,200 \text{ m}^3/\text{sec}$ となる。淀川のような複雑な河道ではいろいろな要因がキャンセルしあって、たまたま地上と航測が一致したものかもしれない。

淀川のこの洪水は計画流量に近いものであり、無駄な苦労におわるかもしれないが、全断面で流量を試算してみる必要もあろう。

7.5 大和川（柏原）

40年24号台風の大和川の柏原での観測結果で

は図 7.7 のようになっている。航測による表面流速流量に仮に更正係数を 0.85 とすると、ここでも $H-Q$ 曲線に完全ののってしまった。

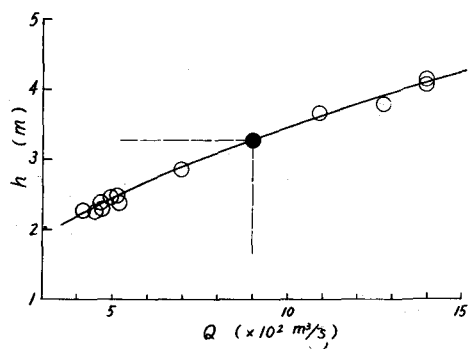


図 7.7 大和川・柏原の水位と流量

つきりしていない。

流れの乱れによる表面流積の時間的変動をみる目的で、それに近い状態、すなわち 5 m ごとに横断測線をとって（時間でいえば大体 2 秒で流れる距離）その表面流積の変動をみると次のようである。河道形状の変形がすくない 40 m 区間、5 m ごとの 9 測線の表面流積の変動は、標準偏差で約 1% であった。表面流積が同じでも形が違えば対応する水深との組合わせが異なり、流量は変ってくるが、流速分布の形からみて流量で計算して

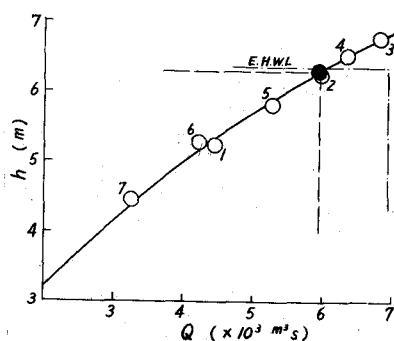


図 7.6 淀川・枚方の水位と流量

大和川ではさきに図 6.8～6.11 でみられた

1.1～1.7 km 区間の 200 m ごとと 31 本の横断測線において流量を試算してみると図 7.8 のような結果が得られた。中に明らかに横断図に間違いがあるものが見出され、バラッキの大きいところもある。この中で航空写真測量で責任を負えるのは表面流積までであり、あとは水位と断面形の与え方で流量の値は変ってくる。表面流積の変動の中には航測の誤差と、瞬間的な測定値であることによる変動量が含まれており、それを除いたものが実際の変動量であるはずであるが、それはまだは

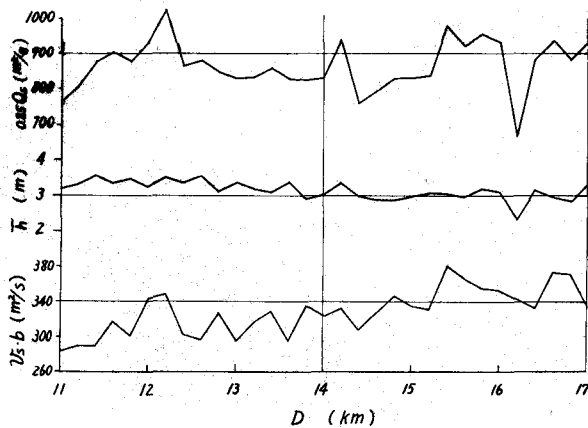


図 7.8 大和川・各断面の測定値

0.85 にとった流量値が、これまでの地上観測による水位—流量曲線とほぼ合うということは、相対的な意味において注目されてよいと思う。

あ と が き

航空写真による洪水時の流況測定に着手して5年、関連する範囲はひろく、研究すべき課題は多く、まだ至らぬことばかり、これからの多くの方々のお力に期待するところである。

この調査を進めるにあたり、建設省各位の御理解と御厚情ならびに航測業界各社の御協力にあずかったことに深甚の謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 木下良作 : "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" 土木学会第8回水理講演会、1963
- 2) 木下良作 : "航空写真測量と洪水解析" 土木学会誌、Vol.52, №6 1967
- 3) 木下良作 : "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 №1 1967
- 4) 3)の pp.10~12
- 5) Cameron, H.L. : "Measurement of Water Current Velocities by Parallax Methods", Photogrammetric Engineering 18, 1952
- 6) 3)の pp.13, 14

も大体種類は同じであろう。同一断面で刻々に測られた表面流積からの流量に変動が生じた場合、それは表面流速と平均流速との関係が時間的に変動していることを意味するものと思われるが、この変動はもし実際に測られたとしても、それほど大きい値ではないことは、以上のことから推定できる。

この章のはじめと、洪水流の縦渦構造に關してのべたように、絶対的な流量をこの航測の結果から把握するためには、まだ基礎的な研究が必要である。しかし現在の段階において、表面流速からの更正係数を

- 7) Casey, H. : "Über Geschiebebewegung", Mitt.d.Preuss, Vers.f. Wass. u. Soh., 1935
- 8) 木下良作 : "砂礫堆の実験的研究(1)砂礫堆の形成条件について"新砂防№26, 1957
- 9) Wolman, M.G. and Brush, L.M. : "Factors Controlling the Size and Shape of Stream Channels in Coarse Noncohesive Sands, Geological Survey Professional Paper 282 G 1961
- 10) Levi, E : "Longitudinal Streakings in Liquid Currents, J. Hydraulic Research, Vol.3, №2, 1965
- 11) 日野幹雄、四方浩、中井真行 : "Large Eddies in Stratified Flow", 12th Congress of IAHR 1967
- 12) Spiess, K. : "Die Regulierung des Rheins zwischen Strassburg und Basel. Deutsche Wasserwirtschaft, 1925, Nr.3 pp.57~67, ただし14)のp.107に図を変えて転載
- 13) 土木工学ハンドブック、下巻、土木学会編 1964 p.1906
- 14) 石狩川河道変遷調査、科学技術庁資源局資料第36号 1951. p.95
- 15) 14)のpp.34~56
- 16) 石崎勝義 : "河道内の流速分布——吉野川39年洪水の観測より——"土木技術資料Vol.10, №3 1968
- 17) 山内喜之助遺稿 : "淀川低水工事"淀川工事事務所 1963