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

木 下 良 作*

An Analysis of the Movement of Flood Waters by Aerial Photography, Concerning Characteristics of Turbulence and Surface Flow

by Ryosaku Kinoshita

The author from 1963 to 1966, in collaboration with the Ministry of Construction, made observations of the movement of flood waters in 13 main rivers in this country, using aerial photogrammetry. Our rivers are characterized by their swift currents and after a typhoon, when the water increases rapidly, the surface of these swift flood currents is covered with foam and there appears, when observed from an aircraft, a difference in hue in the muddiness caused by the macroturbulence. By shortening the time between exposures in the aerial photograph, we were able to measure the water current velocity over the entire surface, using the parallax method (Cameron effect).

Although the distribution of the current velocity over the entire surface at any given moment is extremely complicated, there could be observed a certain common pattern. Upon analysis of this pattern, we could determine a very close similarity to that pattern displayed by the distribution of surface current velocity observed in an experimental flume, where it is known that there are, along the longitudinal axis, parallel cycloidal flows, in which adjacent vortices have opposite directions of rotation.

This analysis gives us cause to believe that it may now be possible by aerial photogrammetry not only to measure the current velocity of, but also to understand the structure of turbulence in the flood waters of our swift current rivers, which are otherwise unapproachable. Various basic problems which arise in connection with the measurement of turbulence by photogrammetry are also to be considered.

まえがき

研究の発端：沖積平野の川の流れは、淵から瀬にひろがり、また淵におちこんでは、瀬にむかって流れをひろげてゆく。このことは空中写真をすこし注意がくながめれば、ただちにみとめられるところである。これを河床の形からいえば、非常に扁平ではあるが、前面で急な斜面をもつ大きな砂丘のようなものが、連続的にできているといってもよい。これは Oblique bars とか、Alternating bars とかよばれているものであって、河川の蛇行現象と関係ふかい一つの現象と

して、扱われだしている。これがどのように形成されるか、あるいは動くかということは、治水工事に大きい影響をもつので、いろいろな河川での形成調査や、実験水路における研究がすすめられてきた。われわれが一つの報告をまとめたとき¹⁾、では洪水時には砂礫堆は、果してどうなっているかという、否定がちの疑問がおこってきた。われわれは実験やその他の多くの資料から、この砂礫堆はむしろ、洪水時にこそ形成されるという推定を下していたのであるが、それならば実さいの洪水でその観測をおこなって、検証しなければならぬ。この観測は洪水流の蛇行調査といいかえてもよく、したがって非常にひろい範囲の、同時的な観測を必要とする。ここに洪水流飛行観測の発端があ

* 自由学園最高学部研究員 工博（河川工学）
「写真測量」Vol. 6 No. 1 1967

研究の経過：筆者は昭和37年より、小河川の洪水の、塔上からの写真観測の準備をはじめ、一方大河川の洪水にたいする、飛行機の折衝を開始した。昭和38年5月、写真測量学会例会の、阪急航空 斎藤 徹 氏の講演²⁾が機縁になり、ドルニエ28で、その最初の撮影テストがおこなわれることになった。水面の浮動標識には発泡ポリスチレン紙を選定し、建設省四国地建の協力と、科学技術庁資源局の援助を得て、おりからの台風9号による10,000トン/秒の出水をみた吉野川で、その最初の洪水流航空写真撮影が実施された。図0.1

はその際の天気図であり、南風40ノット/時という悪天候の下に、その最初のテスト撮影がおこなわれたことを示すものである。

これらの撮影写真による、各河川の洪水流解析課題は数多く、そのいずれもが進行中の状態である。研究の傾向は大別すると三つに分けられる。その一つは流れをマクロにみたもの（研究の発端となった課題はこれに入る。多くの応用課題がある）その二は流れをミクロにみたもの、その三は、航空・水文気象調査なら

No.	地 方 河 川	年 月 日	摘 要	業者略号
1	北 海 道 石 狩 川	36. 7. ²⁷ / ₂₈	低.	P
2	四 国 吉 野 川	38. 8.10	台. 9	H
3	北 陸 阿 賀 野 川	38. 8.30	(渴水)	K
4	" "	39. 4.14	低. 融雪	A
5	九 州 大 淀 川	39. 9.25	台. 20	H
6	四 国 吉 野 川	" "	" "	H
7	中 部 長 良 川	" "	" "	D
8	" 揖 斐 川	" "	" "	D
9	" 木 曾 川	" "	" "	D
10	九 州 筑 後 川	40. 7. ³ / ₇	前 線	H
11	" 球 磨 川	" "	" "	H
12	近 畿 淀 川	40. 9.11	台. 23	H
13	" "	40. 9.18	台. 24	D
14	" 大 和 川	" "	" "	H
15	北 海 道 石 狩 川	41. 4.29	低. 融雪	D
16	東 北 阿 武 隈 川	41. 6.29	台. 4	D
17	" 北 上 川	" "	" "	D
18	北 陸 阿 賀 野 川	41. 9.25	台. 26	D

洪水の写真測量で、まず当面する問題は、流れの乱流現象である。これまでの流速測定は、ある点のある経過時間による平均値、またはある距離の通過時間による測定値などと、流れの平均的な値を得る方法が、そのほとんどであったのに対し、写真測量では瞬間的な流速値の、その分布性が測定されるのである。写真測量で流れの平均量を得ようとすれば、厳密にはその乱流現象から理解してかからねばならず、しかも三次元的な流れの構造との関係における、流れの表面の乱流特性をわきまえねばならないことになる。いいかえれば流れのミクロな研究が、前提として必要になる。そのためには逆に、この写真測量の方法が役立つことになり、今後、時間経過までも写真測量で追えるようになれば、超音波流速計などの地上での併用とあいまって、洪水乱流の研究は大いに進むことになろう。

本稿においては（まだ不十分であるが）流れの乱流構造に関する知見の現況をのべ、流れをマクロにみた、洪水時の砂礫堆形成に関する問題や、諸河川の河道計画にたいする応用例、あるいは観測、撮影のフライトプランに関する研究などについては、他稿にしるすことにしたい。

本報文をまとめるにあたり、調査のはじめを御指導下さった、東大教授本間仁博士、同、丸安隆和博士、関東学院大学部教授安芸咬一博士、ならびに資源調査会でつねに討議をおよせ下さった井口昌平博士、菅原正己博士はじめ、グループ一同の方々に、厚くお礼を申しあげる。本調査は建設省河川局の御理解と、各地方建設局ならびに各工事事務所各位の、熱意ある御努力により遂行されたものであり、筆者の参加をゆるされ、多くの援助をいただいたことに、心からのお礼を申し上げます。またはじめてテスト飛行された阪急航空KKをはじめ、撮影・図化の研究に御協力下さった、国際航業、アジア航測、日本国内航空KK各社にたいし、深甚の謝意を表したい。

1. 洪水流の水面の写真映像

1.1 吉野川の最初のテスト撮影

「洪水の流れを垂直航空写真に撮影したらどうなるか。せめて何らかの水面映像により、流向ぐらいは判別できるだろう。流木やごみなどの流下物を追えば、その流速は測定できるかもしれない。けれども積極的に紙でもまいて、できるだけ多くの水面で、流速を測定してみよう。」われわれが最初に吉野川で、このテストを企画した際の考え方は、この程度のものであった。水面標識はいろいろなものを試作したが、発泡ポリスチレン紙が最適であることを見だし、5,000枚を用意して出水をまった。同時に発生した台風9号(昭・39)は、夏台風の性格どおり、進路は複雑、移動速度ものろく、その上中心が北九州をすぎるところから、四国山地に豪雨が降りだすという異例さで、実施か、否か、計画は二転、三転、最初のテストは困難をきわめた。結果は伊丹基地の飛行機との連絡に「そご」が生じ、20名の作業員が二カ所の橋からまいた、5,000枚の紙が海に流れ去ったそのあとに、暗雲と強風についてDo28が飛来、夕刻間近かに撮影を終了した。詳細は略すが、この悪天候下で飛来した池谷パイロットの業績こそ、高く評価さるべきである。

最初に入手した写真は、水面は真白で、これでは紙が流れても、何もわからないと思われる程であったが、陸地が黒くなるほど焼きこむと、水面には意外な模様があらわれてきた。

一言でいえば流れの方向に、ある長さをもつ無数の黒いスジが分布し、一見、全体に明瞭な流向が感ぜられることである。相対的に濃度が高いその黒いスジは、拡大してみると、ある直径をもつ円形の斑紋が連続したものであり、ほかに白くうつる泡があって、その泡はそれらの

黒い斑紋をくまどるように分布する。この斑紋の径、およびスジがならぶ間隔には、明瞭な水深との対応がみとめられる。

われわれはこれらの意味するものの探索にとりかかり、表0.1にみられる次々の観測で、それらの疑問はしだいに明らかにされていった。

1.2 代表的な洪水面の写真例

写真1.1～1.4は、観測の折々に撮影したカラー写真である。ごらんのように洪水流の水面には、流れの乱れに応じた濁度の相違による無数の色調が存在し、それが白黒写真でもとらえられるわけである。ここで黒く写るのは、濁水が清水より一般に白っぽくうつる、それよりさらに濁度が大きい部分であることがわかる。黒い斑紋は「まき上り水流」による「Boil面」であることが明らかであり、泡がその周辺をくまどる理由も明白である。(比較的低水位で、流れが澄んでいる場合の、河床からこのBoilが上るときには、まき上り水面は、白黒写真では逆に白めにうつる。同じことが潮流の場合にもいえる)洪水面のこの多彩な色調の存在については、これまで河川研究者の間で指摘し

写真 1.5 荒川笹目橋上流、増水中の状況。
昭和40年 5月、6号台風出水。

写真 1.6 上の写真と同じ場所、同じ水位に増水の際、
朝日ヘリコプターより撮影。(昭40.8)

写真 1.7 筑後川出水の低空垂直写真。久留米市附近 (昭 40・7)

た人はいなかった。何故ならば写真 1.5 にみられるように、水面にどれほど明らかなパターンがあっても、斜めに見る人間の眼には空の反射が入り、真実の色調はわからないし、また洪水時に垂直に、意識的に空からみる人がなかったからである。写真 1.5 は写真 1.6 と同じ場所を、同じ水位のときにヘリコプターから撮影したものである。地上ではわからない水の色が、このように顕著に垂直写真にはとらえられるのである。また写真 1.7 ではサンスポットが入ったことにより、その周辺を見較べてゆくと、Boil に関係する水面形や色彩の関係が、こまかに観察される。

1.3 撮影上の方針

最初の吉野川の撮影は、60%の重複率、約13秒間隔でシャッターが切られた。そして水面にあわられている模様を立体視しようとする、部分的にある泡は、無理には立体視できるようであるが、水面全体ではどうしてもできない。原因は模様のズレと変形が、大きすぎることにある。それで撮影時間間隔 Δt を短くすれば、立体視は可能となり、カメロン効果⁵⁾も利用できると予測された。立体視可能限界の Δt は、流速（と撮影高度）に応じて異なるはずであるが、本邦における観測対象河川から考えて、 Δt はカメラ WILD RC-8 の最小の、4 秒前後に一律にとることにし、また Δt 測定精度をあげるため、専用のシャッター時間間隔記録装置をとりつけることを、この観測実施の条件とした⁶⁾。撮影縮尺は $1/8,000 \sim 1/10,000$ 、雲が発生した場合は図化ができる条件のもとで低高度で撮影することにした。したがって重複率は60%以上で一定ではない。また洪水面の明るさは地表より大で、ことに晴天の日はその差ははなはだしくなり、従来の写真現像処理では（陸地はよくとも）河面のディテイルはつぶれてしまう場合もおこる。写真処理全般において、河面の調子をよくだす点に注意をはらう必要がある。表 0.1 の39年9月以降の撮影は、以上の条件と注意のもとにおこなわれたものである。

2. 洪水流表面の詳細な流速分布の測定と乱流立体構造の推定

2.1 木曾川における測定例

吉野川のテストで見出された、洪水流表面の特徴ある模様は、その後、表 0.1 の諸河川の観測がすすむにつれ、すべての河川で共通してみられる現象であることが判明した。すなわち流れの乱れかたの中に存在する、普遍的な現象であると考えられるのである。その中から代表例として木曾川をえらび、その測定結果⁷⁾をのべてみたい。

39年9月25日、台風20号により、木曾川（今尾）ではピーク流量8,100トン/秒の出水をみた。（同、計画流量 12,500トン/秒）ピークの時刻は犬山から成戸にかけて、17時から19時に推移し、これに対し、木曾川上流工事事務所の要請で、八尾空港をとび立った日本国内航空のエアロコマンダーは、15時前から16時半まで長良川ではほぼピークを、木曾川ではピーク前の増水中の状態を撮影した。写真 2.1 は河口より 30 km、成戸と起町の中間付近の、木曾川の一例である。水面一面に白く散在するのは自然泡沫である。（水面標識もまかれてあるが、写真ではこの泡の像の中に埋没している）

写真 2.1 は下流から上流にむかって撮影したために、泡の像はカメロン効果により、著しく浮び上ってみえる。⁸⁾そして、ここに立体視されるとおり、この著しい泡の高さの凸凹が、すなわち洪水流の表面の、乱流による甚しい流速変動の瞬間的な（ $\Delta t=3.66$ 秒）分布状態をしめすものなのである。この泡の鮮明な写真を、10数倍のレンズで拡大して立体視すると、一層微妙なその流速分布が明らかになる。それは何処を測定すれば、流速の代表値が得られるのか、どのように測定すればよいのか、誰でも当惑しないでははいられないほどのものである。

この分布状態を、 Δt 後の写真ごとに次々に追ってゆくと、（飛行機の通過により、写真 6 枚までしか同一部分がみられない）少しずつ変化してゆく状態がみとめられる。しかしそれは、この独特のパターンが崩れ去ってゆくのではなく、つねに新たにこのような性質のパターンを、生みだしつづけてゆくような変化である。

一定点の時間的流速変動をみる場合、図化機で精密に測定すれば、5モデル、約15秒間の動きは明らかになるが、水深など流れの条件が、その上下流であまり変わらない範囲では、1モデル上の流速変動を、下流から上流にさかのぼって追跡した、その程度の時間的流速変動があるわけである。しかし流速分布には（立体視して）流下方向にタテスジをなすような峰と谷が

写真 2. 1 木曾川, 昭和39年 9 月25日台風20号による増水中の空中写真。

ならんでみられる, それが時間的には左右にゆれるような変化もするであろうから, 一定点の流速変動は, そういう大きい変動まで加わるはずである。しかしそのような乱流の時間的経過を検討するには, これらの航空写真からだけでは不十分であり, 将来ヘリコプターのホバリングによる, できれば二機同調カメラの,

長時間撮影を必要とする。けれども写真 2. 1 の流速分布, またはその15秒間の変化を追うだけでも, このような泡の模様を呈する流れの乱流構造の, その性質を少しでも追求できるはずである。

写真 2. 1 の中央から右岸よりの水域, 約 140 m 四方を代表例としてとり, その詳細な流速分布をえがいた

図 2. 1 木曾川洪水流の表面等流速線分布図

写真 2. 2 図 2. 1 と同一部分, 同縮尺写真

ものが図2.1, 同部分の同縮尺写真が写真2.2である。この撮影および図化諸元では、流速 1 m/sec. 当りの ΔH 換算量は 17.45 m であって、等流速主曲線 10 cm/sec. は高度 1.75 m 前後に相当する。この撮影高度 1,200 m からすると、基線長が短いこの図化において 1.75 m のコンター描画はほぼ限界かもしれないが、しかし泡の各部の相対的な高差(速度差)の分布状況は、よくあらわれているものと考ええる。

図2.1をみてまず指摘されることは、流速の遅い部分、あるいは速い部分は、それぞれ流下方向につらなり、横断方向には交互に並んで、全体的にはタテ縞模様を呈することである。一方写真2.2における泡の配列をみると、単位面積あたりの泡の多いところと少ないところは、同じくタテ縞模様をなすように分布し、写真2.1をみれば一層明らかなように、なんとなく流向が感ぜられるような配列をしめしている。そして図2.1と写真2.3を対比すると、流速のおそい部分が泡の少ないところ、流速の速い部分が泡の多いところにあっている。(これは写真2.1で立体視されるとおりのことである。そして隣りあったその遅速の差は、10%から大きいところでは20%にも達している)ここで泡がどのような場所につくかを考えてみたい。

河岸に立って川の流れをみていると、平水時でもボカッ、ボカッと湧きあがってくるような流れがあり、それが水面にまいる斑紋を描いては、下流に流れてゆく。増水時にはその現象は一層さかんにみられ、写真1.4のような水面を呈するのである。この河底からのまき上り水流は、間接的に発生するもののようで、水面にまいる輪が発生、発達するときの状態を、河岸からシネ、またはモータードライヴカメラで観測すると、その輪の上流端は一時流速がゼロになるほど、つ

よく拡大することもある。それほどでなくとも、その発達するレンズ状の水面の流下速度は、全般的にその周辺の流れよりも遅いように観察される。このまき上り水面(Boil 面)は、中心から放射状にひろがる流れによってできており、水面に泡が浮んで流れるときには、泡をその周辺に、円形におしやるばかりでなく、全体の流れの中で、相対的にゆっくりした動きをしめすので、上流から近づく泡も、Boil 面の両わきにおし分けられることになる。これは河岸から観察される動きであるが、図2.1または写真2.2をみても、このわき上る傾向をもつ水域は、相対的に流速がのろいということがあらわれている。そしてその Boil 面は、ただ散在するのではなく、Boil 列といってもよいように、流下方向に列をなして存在する傾向があることもしめされているのである。

さきにのべた15秒間の、この泡の変形について、詳細な測定をした例は図2.2である。これは5枚の偏歪修正写真上の泡を、マイラー図面上に $1/200$ に忠実に拡大し、最初の泡の上におとした点を、立体視ではなく、図面を重ねて面積的に合わせながら、点を移写して結んでいったものである。ただし図はその中の7秒半の動きをしめし、またベクトルは、X方向に 1.8m/sec. を差し引いて表現してある。この図の中には、発達中の Boil 面には B と記入してあり、その周辺の泡の動きをみると、大体、先述の地上観察そのままの動きが、(この短い時間の動きの中でも)確認されるのである。

ここでふたたび泡について考えると、このように、Boil 面、あるいは Boil 列が無数に存在するということは、逆に表面から沈んでゆく流れの部分もあるわけである。泡は結局刻々の、そのような水域によせられ

集められつつ、流れているといってよい。いいかえれば泡は、そこから水が沈んでいるという、表面の収斂部(線)の位置を表示する役を、果しているともいえるだろう。(沈みかたの強弱があることは別として)それでこの泡の形、その一つ一つの線形を、ここでは流れの表面における小収斂線とよぶことにしたい。それに対してその小収斂線が多く集まってみえる、Boil 列と Boil 列にはさまれる部分を、ここではただの収斂線とよぶことにする。(大収斂線については後述)

この収斂線のもつ連続性は、

図 2.2 木曾川、泡の変形。写真2.2の左下部分を拡大し、動きを示したもの。

写真にもみられるとおり、必ずしも良好なものではない。ある長さのものが散在している感じであり、またその一本の収斂線も複雑な形をした小収斂線が、断続的に集合した状態となっている。このことは図 2.1 の流速分布図にもあらわれており、Boil 列または収斂線上の流速変動をみると、そこにもそれぞれある波長をもつ、遅速の波があらわれている。そしてそのピッチが、Boil 列の横方向の間隔とも、大体ひとしい点に注目される。

ここで収斂線と Boil 列が交互にならぶ、そのピッ

図 2.3 並列ラセン流の推定断面図

チについてしらべると、図 2.1 では大体 10~15 m の値を示している。このときの水位を横断面図に記入すると、(この図化範囲では、出水前後で約 1 m 河床が上昇した部分もあるが) 大体において 5~6 m の水深を示し、大雑把に言えば、水深のほぼ 2 倍の間隔で、この列が並んでいることになる。このことは表 0.1 の他の河川の例をみても、同様に指摘されることであって、その一例は後掲、図 4.2 のごとくである。これは大淀川で水位を記入した横断面図上に、収斂線の位置と、それぞれの場所の水深の倍の幅の印を記入したものである。これによればその対応は、驚くほどの一致をみせ、収斂線の並列間隔は、水深のほぼ倍の値をしめすことは明かになっている。

このことは流れの横断面において、図 2.3 のような動きがあることを示すものと考えられる。すなわち流れの方向に軸をもつ、ほぼ円形断面のラセン流が、交互に反対の回転方向をもって並列するという形である。ここではこれを並列ラセン流とよぶことにする。このラセン流は流れの表面近くでは速く、底面近くでは遅いはずであり、また上向きの流れは先述のような、収束した流れ方 (Boil) を示すことが多いようであって、極めて複雑なラセン的運動をしているといえよう。しかし Boil 列と収斂線が、交互に並ぶ現象は普遍的であるように、この複雑な並列ラセン流は、普遍性のある乱流の立体構造として、明かにすることができはすである。

2.2 二次流に関する文献例

河川に関する二次流としては、河道彎曲部におけるラセン流とか⁹⁾、あるいは増水期、減水期で回転方向を異にする、二つのラセン流の存在などが指摘されている。¹⁰⁾ 彎曲部のラセン流は、航空写真においても泡のつきかたで、明らかにその存在を指摘することができる。たとえば図 2.4 のごとくであり、収斂線の泡の列が、一本の強い泡の線にまとまってしまい、そのまとまった線はやがてまた、しだいにひろがってゆく。これは流れの

図 2.4 泡のつき方にみられる大収斂線

蛇行現象に附随する現象であり、筆者はこの水面の強い収斂線を、大収斂線とよぶことにする。

これに対して増水期、減水期のラセン流説については、たしかに増水期には流木やごみは河岸側に寄せられ、減水期は、河道中央に寄せられる事実が認められるのであるが、これをただちに回転方向の異なるラセン流として、解釈できるかどうかには異説があるようである。一般の沖積河道の水流の断面は、洪水時でもきわめて扁平なものであって、たとえば写真 2.1 の場合でも、河幅と水深の比は 100:1 位の値を示している。このようにうすい、膜のような流れにおいて、二つのラセン流形成を考えることは困難ではなかろうか。事実写真 2.1 は増水期の状態であるが、泡は全面にほぼ一様に散り、むしろ今のべた、水深に対応するラセン流の方が、卓越しているようにみられるのである。そして流木やごみが増水期に河岸に、減水期に河道中央によりやすい現象は、増水も減水も、まず流速の速い部分からはじまるということに、関連する現象ではなかろうか。

まき上り水流の文献については、二方向からの見方がある。それはたとえば砂漣の形成など、流下方向における河床の凹凸の存在に関連するもの¹¹⁾と、流下方向に凹凸がなくても起る、ラセン流に関するものである。¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾ 砂漣が発達している流れを観察すると、砂漣の形状に関連して、まき上り水流が間欠的に発生し、水面に Boil 面が浮ぶことはたしかである。木曾川の引例部分は砂河床であり、減水後には大小無数の砂漣や砂堆列ができており、洪水中にはそういう波形はできていないとする証拠はない。¹⁵⁾ しかし一般に砂や砂堆列は形成されない砂礫床河川においても、

写真 3. 1 実験水路の砂床上にあらわれたタテスジ模様

表 3. 1 タテスジの数と水深の関係
水路幅 13.2cm (矩形断面) 平均砂粒径 1.24mm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/sec	B/h	10.15					7.33	6.99	6.70
1.1	タテスジの数	6~5					3~4	3	3
1.0	B/h	10.23		8.35	8.35	8.05			
	タテスジの数	6		5	4	4			
0.8	B/h						8.80		
	タテスジの数						4		
0.7	B/h					9.85	9.56	9.43	
	タテスジの数					5	5~4	5~4	

(ただし B: 水路幅 h: 平均水深)

写真 3. 2 実験水路の水流の表面に、アルミニウム粉末を流した状態。洪水面の泡のパターンとの相似性がみられる。

その洪水流の泡のパターンは同様で、強いまき上り水流がみられるのであるから、必ずしも河床の波形を、必須条件とすべきではなさそうである。

つぎに後者の文献¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾では、先述の並列ラセン流そのままの実験水路における観察報告がしるされている。その内容を次節でのべたい。

3. 実験水路における流れの表面の流速分布と乱流構造

3.1 移動床水路における実験例

筆者は多年、砂をしきつめた(移動床)水路におけ

図 3. 1 実験水路、パンチ屑のベクトル分布状況 (1/64秒)

る、水流の蛇行実験に従事してきた。その際、写真 3. 1 のような現象が、あらわれるのに気がついた。¹⁶⁾これは蛇行流形成領域外の実験であるが、砂床に浅い溝状のタテスジがあらわれるのである。写真は急激に断水した直後のものであり、通水中のこの砂床の状態を観察すると、このくぼんでいる溝の部分で、特に掃流される砂が多いことが目につく。この場合の平均水深と水路幅の比を求めると、水路床のタテスジの数のほぼ倍にあたり、筆者は勾配、流量が変化した際に、このタテスジが発生した場合のデータを記録した。それは表 3. 1 のごとくである。すなわち流量や勾配の変動により、水路の流速は変わっても、あらわれるタテスジの数は、B/H 如何によってほぼ一定値があらわれるのである。この通水中に、表面にアルミ粉末を撒布して撮影した写真は、写真 3. 2 である。ここまでみるとこの現象は、いかに前節でのべた洪水流の並列ラセン流に似ているかに気づくのである。

アルミ粉末のかわりに直径約 2 mm の電子計算機のパンチ屑を水面にまき

図 3.2 実験水路におけるパンチ屑20点の、1秒間に浮流した流跡線と流速分布、および湧きあがる水域と沈む水域の分布推移図。(水路幅20cm, 勾配1/120, 砂粒平均径1.24mm, 通水流量1.21l/sec, 平均流速39.4cm/sec, 平均水深1.54cm, 幅と水深の比 $B/h=13.0$)

1秒間64コマの8ミリシネでその動きを追ひ、図化したものが図3.2である。これは多数のパンチ屑の中から、ほぼ横断直線上にある20点をえらび、その流跡線を描いたもので、また20点の配列する部分の、わき上る流れと沈んでゆく流れの分布の推移も記入したものである。はじめほぼ等間隔にえらんだパンチ屑は、しだいに幾列かに収斂してゆく状態があらわれており、それが沈んでゆく表面水域にあたることも明瞭である。また流速分布は図にしめすところ、わき上り部分でのろく、沈んでゆく部分で速いところまで、実際の洪水の現象と類似しているのである。

図3.2は20点の1秒間の推移図であり、流跡線はその間のベクトルでもあるのに対し、多数の点の瞬間的なベクトルの分布状態は、図3.1、収斂線の分布状態は図3.3である。図3.3の細い実線は先述の小収斂線、太い破線は収斂線に相当するものである。なおこの実験では、水流はほぼ直流するので、大収斂線はみられないが、後掲、写真4.1の蛇行実験では、左右岸交互にそれがあらわれている。

図3.3の収斂線の分布と、図3.2の同じくその推移図のパターンののびが違ふのは、図3.3のようなパターンは、流下とともに変動するからである。その変動は主として、次々に発生するBoilの影響によるものであり、発生直後の Boil

写真 3.3 水深を増加した場合の水路の流れ(固定床)

図 3.3 実験水路の収斂線分布の一例。

図 3.4 固定床の場合の流跡線、流速分布、湧き沈み分布推移図

水面の流速はのろいために、全体のパターンを目まぐるしく変化更新させてゆくのである。

3.2 固定床水路における実験例

それでは水路床にタテスジが出来るような移動床の流れでないと、このような相似性はあらわれないかという疑問がおこる。それをたしかめる意味で、固定床の状態で実験してみると、つぎのとおりになる。これは平坦にならした水路の砂粒にたいして、限界掃流力以下の流れで通水したものであり、勾配はゆるくなっている。そして水路幅と平均水深の比は8.65で、写真3.3のアルミ粉末のパターンは、3列*の収斂線が形成されていることが認められる。（* 水深増大による側壁の影響もでている）この場合の流跡線と流速分布、およびわき上りと沈んでゆく水域の関係は、図3.4で、固定床であってもやはり同様な、並列ラセン流を形成していることがわかる。

3.3 実験的研究への期待

移動床でも固定床でも、同様に並列ラセン流があらわれるということは、この現象は、水深にたいして幅ひろい流れであれば必ず形成される普遍的な乱流現象ではないかと予測される。そして水路床に砂漣ができたり、タテスジがあらわれたりすることは、この主題にたいしては二義的な現象として、はじめ無視しても差支えないものと考えられる。

このように洪水の乱流構造と同じ現象が、実験水路上で追えるということは、今後に明るい期待をいだかせる。滔々たる洪水の乱流立体構造を、現地で観測することは非常に困難であるが実験水路上でその流れの基本構造を把握し、それを実際にアプライできるならば、表面だけを測定するこの航空写真測量の方法も、ますます利用の途がひらけてくると考えられる。

またここで明らかに推定がつくことは、この乱流構造は洪水流のみでなく、河川の平時の水流でも存在する現象ではないかということである。ただ平時はそのあらわれを、航空写真、あるいは地上写真でとらえにくいのであり、あらためて平時の川の航空写真を注意ぶかくながめると、水流の上に無数のスジ（収斂線）が認められる場合がある。地上でながめても、微風による小波の立ちかたが、風の方ではなく、流れの方向にそって曲線的にシマ模様を呈することがあり、同様な乱流現象の表面へのあらわれが、風によって見やすくなっているものと考えられる。（ただし平時の流れにまで航空写真による測定を、利用すべきで

あるとは考えない。）

4 水面標識追跡の詳細な測定例

4.1 水面標識の撒布について

表0.1の観測諸河川中、もっとも見事に自然泡沫がとらえられたのは前述の木曾川で、その他、表0.1の番号でいえば、6、11、13、14、16、18の諸河川では、かなり多量の泡をうつしこむことができた。泡がない場合は1節でのべたように、乱流の色調差が利用できる。しかし何もうつらない場合の危険を考えると、表0.1の諸河川では、そのほとんどの河川で大量の水面標識（発泡ポリスチレン紙）の撒布作業を行なった。

洪水時の建設省の工事事務所は、水防、通報その他で、多忙を極め、この水面標識撒布作業は大きな負担となる。（業者も突発的に遠隔地で人手を集めることは困難である）出来ればこれを省き、航空写真撮影だけでこの観測をすますことが、事務所にとっては望ましい。しかし標識を撒布した場合、図化、解析上には次のような利点も生ずる。

さきにものべたが乱流模様を利用して流速測定をする場合、はなはだしい乱流による流速変動に当面する。これにたいし水面標識をまくと、すくなくとも3

図 4.1 大淀川水面標識連続ベクトル図

図 4.2 大淀川 3.2 号横断面における収斂線と水深の関係

倍程度は Δt を長くとることができるし、また水面標識がほとんど収斂線上に分布するという、特性を利用することができる。洪水の航空写真測量には、いろいろな利用目的があるとしても、流量測定に使いたいということが、大きな目的の一つにあることは間違いない。そのためにも乱流構造の研究の推進が望まれるわけである。そして水面の特定の場所の流速と、平均流速との関係が明らかにできれば、測定の実作業は簡便さも正確さも増すことになる。

水面標識の流れかたを、詳細に追跡した例はつぎのとおりである。

4.2 大淀川における測定例

大淀川では昭和39年9月25日、台風20号により出水をみた。宮崎における水位ピークは午前2時、警戒水位を28cm上まわったが、指定水位近くまで下った朝8時前後に、阪急航空のDo28により撮影が行なわれた。大淀川の撮影には死水域の判定と、宮崎市内の

表 4.1 大淀川、水面標識のしめした流速値一例

使用写真	C-1 16, 17	17, 18	18, 19	19, 20	20, 21	21, 22
Δt	0~3"74	3"74 ~7"48	7"48 ~11"22	11"22 ~14"96	14"96 ~18"70	18"70 ~22"44
標識紙番号	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec	m/sec
201	2.20	2.24	2.29	2.25	2.16	2.11
202	2.03	2.03	2.12	2.05	2.00	2.04
203	2.01	1.99	2.13	2.07	2.09	2.16
204	2.06	2.07	1.16	2.14	2.08	2.08
205	2.11	2.10	2.31	2.31	2.22	2.27
206	2.13	2.18	2.24	2.21	2.14	2.18
207	2.00	2.07	2.17	2.20	2.21	2.26
208	2.12	2.13	2.21	2.13	2.06	2.12
209	2.16	2.19	2.23	2.25	2.18	2.15
210	1.82	1.91	2.02	2.05	2.13	2.09
211	1.57	1.63	1.72	1.72	1.66	1.68
212	1.72	1.66	1.67	1.67	1.78	1.78
213	1.48	1.56	1.68	1.69	1.62	1.61
214	1.36	1.39	1.44	1.49	1.44	1.52
215	2.12	2.16	2.20	2.16	2.07	1.99
216	2.04	2.12	2.19	2.29	2.22	2.12
217	2.07	2.19	2.24	2.24	2.16	2.21
218	2.00	2.10	2.23	2.11	2.06	2.16
219	2.05	2.15	2.23	2.23	2.16	2.20
220	2.23	2.30	2.33	2.31	2.18	2.25

河道の河積不足対策の参考資料を得るという目的があった。それで図化では、特に橋橋、日豊本線間の、詳細な水面標識の追跡測定が行なわれた。17)

図 4.1 はその平面図中の一部である。Do28 の低速性のために、図化区間は7枚の写真を使うことができ、3.74秒ごとの水面標識の7回の座標と、6回の流速が測定された。測定方法は適当な空中基線長を確保するために、一枚おきの写真でモデルを組み、奇数組と偶数組はバスポイントにより連結した。水面標識は座標値を記録し、のちに電子計算機により、流速値を計算した。表 4.1 は流速計算結果の一部である。この番号は図 4.1 平面図にみられる水面標識番号である。

図 4.1 をみてまず指摘されることは、これらの標識がランダムに流されてはいるものの、その分布に一つの特徴がみられることである。それはこれらの標識の中で、重なるような流跡をしめすものが多いことと、重ならない標識はある間隔をたもって流れているようにみられることである。これは写真を立体視し、水模

表 4.2 大淀川 標定誤差

Δt	277点の平均値	全平均値からの差
秒	m/sec	m/sec
0 ~ 3.74	2.040	-0.070
3.74 ~ 7.48	2.114	+0.004
7.48 ~ 11.22	2.156	+0.046
11.22 ~ 14.96	2.129	+0.019
14.96 ~ 18.70	2.109	-0.001
18.70 ~ 22.44	2.112	+0.002
秒	m/sec	m/sec
0 ~ 22.44	2.110	$S = \pm 0.035$

図 4.3 標識紙の流速変動のヒストグラム (各標識の平均値にたいする Δt 流速値の偏差%) 標準偏差 $S = \pm 2.95\%$

様の流速分布と標識紙の位置の関係をみると、ただちに理解されることであるが、水面標識が、先にも述べ

図 4.4 標準偏差と Δt の関係

たように、ほとんど収斂線上に分布して流れているということである。いいかえれば流れの表面の中で、標識紙は速いところにばかり分布して流されているのである。

さきにカラー写真 1.4 にみられたように、この測定図化区域の水面にも、美しい乱れの模様の配列、すなわち収斂線の発達をみとめることができた。図 4.1 内の 3.2 km の横断測線上に、収斂線の位置をとり、一方図 4.2 の横断面図に撮影時の水位を記入してその上にプロットすると、この収斂線の分布する幅は、ほとんどその場所の水深の、倍になる関係がみとめられる。このことについてはさきに、木曾川の例とともに指摘したとおりである。

橘橋、日豊本線鉄橋間で、6 回の流速がはかられた水面標識は 277 点あり、それはほぼ河面全体にゆきわたっている。このことから逆に、この流速測定の精度を検討することができる。それは 277 点の Δt ごとの流速平均値は、一定であるとする仮定は確実性がたかく計算結果は表 4.2 のごとくになる。すなわち全部の平均値 2,110 m/sec. にたいし、最大 7 cm/sec. の誤差が出ている。数は少いが、これらの誤差の標準偏差は ± 3.5 cm/sec. となり、 $\Delta t = 3.74$ 秒による長さでいえば ± 13.1 cm となる。これは測定および標定誤差といえるわけで、縮尺 $1/8,000$ の写真からの図化としては、充分な精度を示しているものといえよう。

ここに各 Δt ごとの各流速値にたいして、一様に表 4.3 の各偏差で補正できると仮定すると、つぎは Δt 平均流速の変動状態が明らかになる。各標識紙は位置により流速が異なるので、流速変動は各々の 22.44 秒間の平均値に対して % であらわすと、その流速変動のヒストグラムは図 4.3 となる。標準偏差は ± 2.95 % で、Boil 列との流速差にくらべれば、かなり小さい変動しか示さないことがわかる。ことにこれは $\Delta t = 3.74$ 秒

における(標識紙 0.4 m 平方の面積で平均される水域の場合)であって、標識紙によりベクトルを測定する場合の、オーバーラップ 60% 程度の経過時間でいえば、

写真 5.1 写真 3.2 の場合の 1/2 秒流しどり写真

写真 5.2 水流の蛇行実験の場合の瞬間写真(上)と流しどり写真(下)。

ここでの 11 秒間余の流速変動では、図 4.4 にみられるように、 $S = \pm 2.4$ % 弱程度となっている。一般の測定値ではこれに加えて測定誤差が入るのであるが、このような撮影、図化仕様で、標識紙による流速測定の誤差がこの程度であったということは、今後の一つの参考となるものである。なおこの収斂線上の流速変動の性質については、今後実験水路で、詳細に研究を進め得るはずである。

また十分に撒布された水面標識で、流速を測定する場合には、飛行機の場合はなるべく遅く、高度はある程度高い方が好ましく、逆に乱流模様を利用する場合には、機速はできるだけ速く、 Δt は小さく、高度はなるべく低い方が望ましい。水面標識の場合は Δt を長くとるためであり、乱流模様の場合は空中基線長を長くして、測定精度を上げるためである。この水面標識によりベクトル測定をするか、あるいは乱流模様を使って等速コンターを描くか(ベクトルも書けるが)は、その違いによっていろいろな事柄の長短が相反す

写真 5.3 木曾川、重ね焼き写真 (3枚)

る性質があり、この利用の仕方今後明らかにしてゆかねばならない。

5. 流速の写真測量に関する諸問題

5.1 瞬間性と平均化に関する問題

流速の写真測量では乱流の瞬間状態が得られ、平均量を求めるにはまだ問題が多いことをのべてきたが、流向についても同じことがいえる。実験水路で平均的な流向を測定する場合、いわゆる流しどり写真の技術

をもちいる。カメラを固定し、シャッターのひらく時間を適宜長くして、対象物のながれた写真をとるのである。たとえば前掲写真 3.2 の瞬間写真を、 $\frac{1}{2}$ 秒で流してとれば写真 5.1 となる。流線は側壁とほとんど平行となり、たしかにこの場合の平均的な流向をあらわしている。蛇行実験の場合の比較例は、写真 5.2 のごとくである。これら簡単な技術にたいし、写真測量で得られる流向線とはいかなるものかという、実験例でいえば前掲図 3.1 がその一例といえる。個々の点はかなり勝手な方向をむいており、これから平均的な流向を出すためには、面倒な手数が要とされよう。これはどれほど点を多くとっても、結果は同じことである。では Δt を長くすればよいかといえば、その一例は前掲図 3.2 となり、これをそのまま平均流向とするわけにはゆかない。20点のみの動きではなく、図 3.1 のすべての点のこの動きを重ねれば、写真 5.1 と同じようになるわけであるが、その作業は大へんである。実際河川ではどうかというと、前掲図 4.1 は、そのもっとも適切な例となる。これは一般の航測で作図される場合の、2 倍くらいの長さのベクトルが描かれているが、それでもこのようになるのである。一部の標識はかなり変わった方向に動き、もし標識数がすくなくて

図 5.1 淀川洪水流等流速線図と流向線図。昭和40年9月18日台風24号による出水。この図は計画洪水水位に達している流れの状態である。(2.5軒、点野附近)

しかもこのような標識が入り、その一つの標識でその付近の水域の動きを代表させるように扱ったならば、大きな間違いをもたらすことになる。カンを用いずに、測量学的にほんとうの流向の平均値を得るには、どうすべきかということは、平均表面流速を求めるのと同じように、これからの問題である。

前掲写真2.1の例のように、一枚の写真でも何となく流向めいたものを感じる、これを利用できないかということがある。さきにものべたように、流向感をもたらす泡の分布には、収斂線の形成がもっとも大きい作用をもっている。そしてこの収斂線は、写真を立体視しながら、写真上にかきこむことができる。（熟練しないと個人差が出ようが）しかしこの収斂線分布図は、平均流向をあらわすかという、そうではない。たとえば前掲図3.3にみられるように、それは平均的な流向はもとより、個々の流向さえもあらわすものではない場合がある。具体的にいえば、斜めの方向に収斂線がつらなまま、その全体は直進したりする場合もある。

厳密に停止した位置からでない限り、空中写真で長時間の、（実際河川ではすくなくとも数分間以上の）流しどり写真をとることは、まず不可能である。ではそれに近づくものとして、オーバーラップして撮影された部分の、写真の重ね焼きをしたらどうなかるということがある。写真5.3は前掲写真2.1の部分の、3枚の写真を歪正して、重ね焼きしたものである。これによれば収斂線も、流向と一致したものほどコントラストが強くなり、単写真よりもはるかに平均に近い、流向感をあらわすようになる。

図5.1は淀川の40年9月、台風24号の大洪水を図化した例である。¹⁸⁾これにはみたまを忠実にたどった、詳細な等速コンターのほかに、大局的な流向線を記入した。この流向線はベクトル図作成とともに、この写真重ね焼き法を利用し、筆者の判読によって、平均的な線を記入したものである。利用する立場からいえば、流向線は重要であり、また等速コンターはX方向の速度成分でしかあらわしていないので、（図5.1にはその基線方向が明示してある）真流速は流向によって補正しなければ得られない。しかし図5.1の場合は、等速コンターは Δt の瞬間性であらわし、流向は平均化したものであらわす、という問題をふくんでいる。利用する目的、立場の問題でもあるが、本来ならば Δt の瞬間的な流速コンター図には、瞬間的な流速分布図が、平均化された流速コンター図には、平均化された流向分布図が作成されることが望ましい。（できれば平均流速コンターは絶対流速で）

平均流向を得るためには、この重ね焼きは一つの方法であるが、しかしこれにも問題がある。原理的には

よいとしても、実際に同縮尺の歪正写真が作られるその精度、あるいは重ね合せの厳密さなどに、必要な精度が期待できるかどうかかわからない点である。 Δt が短いので、写真上の像のズレは小さく、それにたいして重ね合せのわずかのズレが大きくびびき、あらわれる流向めいた模様は、あらぬ方をむき、はなはだしいときにはニュートンリングのような、円い模様があらわれることさえある。このために重ね合わせる写真は（オーバーラップする範囲はせまくなるが）できるだけ Δt を大きくとる必要があるし、また得られた結果も、一つの参考資料として注意ぶかく利用さるべきであろう。

平均流向を得るためには、できるだけ密にベクトルをとればよいかという、それでも難しいことは先にのべたが、もし同じベクトル分布図を与え、平行割りこみ式に連続流線を、何人かの作業員にかかせると、これまた大きな個人差がでてくる。（重ね焼き写真から描かせても同じである）これがほんとうに平均化された、正しい流向であるという基準が、まだわからない現在、ベクトル図や重ね焼き写真、あるいは写真の立体視から、平均的な流向線をひくといっても、そこにはカンによる調整が働かねばならず、河川の流れにたいして知識をもつ個人の、その名人芸的な要素なしには、この作業はまだできていないということになる。いままで表0.1の諸河川で図化された流向線は、すべて筆者の作業によるものであり、（筆者は名人ではないが）これは何某の作業によるという責任明示の但し書きを、まだつけねばならない程度の段階の作業である。

流向線を得る図化の方法として、直角に写真を回転することにより、Y方向成分の流速を描くことができX方向成分の図との合成で、流向線を描くことができる。しかし既にのべたように、速度・方向ともにはなはだしい変動をみせる乱流表面で、はたして適切な作業ができるかどうか疑問であり、大雑把な結果しか表現しないのではないと思われる。そのためには一回の標定で、いきなりベクトル図を描いた方がよいだろう。これらのことについては今後検討が必要であり、流向のみならず、表面流速のコンターも、どうして根拠のある簡便な方法で、この複雑なものを平均化したものに作り直すか（あるいは直接に測定するか）という研究も、今後すすめられる必要がある。

5.2 何が測定されているかの問題

重ねて流れの何が、写真測量で測定されるのかという問題について考えたい。これは写真測量にたいして過大な要求をもちこもうとするのではなく、むしろ過大な期待や、過大な評価、あるいは誤まれる解釈のもちこまれるのを防ぎ、妥当な解釈と、利用方法を見出

写真 5.4 長良川空中写真。プロットした点の ΔH を測定。最下段の数字は列，中は番号。

表 5.1 ΔH から換算した流速値表の一部

(アンダーラインしたものは、写真 5.4 にみられるように Boil 内の流速値)

21 3,611	15 3,568			20 3,768	25 3,526
20 3,580	14 3,514		14 3,562	19 3,683	24 3,422
19 3,526	13 3,429	18 3,568	13 3,453	18 3,363	23 3,332
18 3,459	12 3,339	17 3,477	12 3,375	17 3,387	22 3,357
17 3,502	11 3,260	16 3,351	11 3,302	16 3,459	21 3,212
16 3,550	10 3,272	15 3,556	10 3,363	15 3,568	20 3,441
15 3,508	9 3,296	14 3,502	9 3,399	14 3,562	19 3,592
No. $\frac{m}{sec}$ v	No. v	No. v	No. v	No. v	No. v
8 列	11 列	15 列	17 列	18 列	30 列

すためである。

これまでのべた標識・泡・あるいは実験におけるパンチ屑やアルミ粉末など、表面を浮流するもので測定する場合、共通する問題は、それらはすべて沈んでゆく水域の、そのパターンの流下速度を測定しているということである。浮流するものを利用する場合、湧き上る部分の表面流速は、殆んど測ることはできない。これに対して色調差を利用する場合、Boil 面の上にも図化機の測標を合わせることができる。筆者が立体視すると、濃度の高い円形の Boil 面は、一ときわ流速がおちてみえるが、ベテランのオペレーターにはどう見えるかをテストすると、結果の一例は写真 5.4、表 5.1 である。表 5.1 内のアンダーラインしてあるものは Boil 内の値で、流速は周囲より遅くはかられている。これはくりかえしのべた通り、Boil 面の流下速度がのろいということで、矛盾はないのであるが、しかしよく考えるとおかしいともいえる。Boil 面の中は、中央から放射するように流れており、こまかくいえば中心より上流側は著しく遅く、中心より下流側では速くなければならない。すなわち Boil 面の内部は大きく傾いてみえなければならない。つまり、そのようなこまかいところまでは見えてないのであって、結局は

泡で流速を測っている場合のように、湧き上る水域と沈んでゆく水域の境界の示すパターンの、その流下速度を測るのと同じではないかということになる。にもかかわらず Boil 面の円周より、なおも中央がくぼんでみえるのは(逆飛行の場合)何故であろうか。Boil 面が暗い色調であることが、何か物体の陰影のように感ぜられて、立体感がそそのかされる、人間の眼の錯覚も混入していないかという疑問もおこらないではない。またたとえばかなり斜めの光線が、この Boil 面とその周辺の水位との差をきわ立たせ、単写真でも何となく水面の凹凸の立体感が得られ、Boil 面がもり上って見えるような場合、そのような写真の 2 枚を立体視すると、こんどは Boil 面が(逆飛行の場合)下って見えにくいということもあるようである。このような模様を立体視する際の、人間の眼の錯覚の問題について、その影響の有無は、一度は検討される必要があろう。

こまかいことになるが、この円形の Boil 面を作るまき上り水流は、岸边あるいは橋の上から観察すると、いくつもの強い流線の束から成っているようで、したがって大きな一つの円形の Boil 面も、無数の小さな円形をなそうとする Boil 面の、集合から成っているのである。しかし強いまき上り水流が形成されるのは、短時間らしく、流下してゆく Boil 面が余勢による動きに変わると、Boil

面全面が著しく平坦になり、やがて周辺からの新しい動きにも影響されながら、しだいに消失してゆく。こ

図 5.2

れと同じように、沈んでゆく水域の中にもこまかい動きがみられる。その水域の中には特別に速い収斂線が存在したりして、たまたま標識紙がその上にとると、とびはなれた ΔH をしめすことになる。このように複雑な流れの表面に対し、低高度から撮影した航空写真では、たとえ Δt が 3～4 秒であっても、流れの状態がはっきり見えすぎて、立体視しにくいという事態が起るのである。Boil 面も単純に大きな円形の斑紋には見えない。その場合 Δt をより小さくすればふたたび立体視されやすくなるが、そういう撮影の実際を考えたら、適当なタイムラグを与えた二台の同調カメラで、空中に固定して撮影するか、あるいは二機で縦列飛行でもしなければならなくなる。

要するに乱流模様を立体視して流速を測るということは、その像の対応視ができ、重ねられるということであり、その対応には当然、程度の問題があつて、結局適当にボンヤリした写真同士上で、はじめて可能と

していることになる。また同様なことであるが、図 2.5 のような形の変形があった場合（たとえば泡）立体視は斜めの部分で行なわれ、流速もそのように測られるらしいというような問題もある。ある乱流の規模において、低空から高空まで同時に撮影し、どの程度のこまかさで測ればどうなるかという比較研究をすることは、流れの乱流構造を水理学的に研究することとともに、写真測量学的には最初にとりあげるべき基礎的課題であると考えられる。写真測量でいうところの流速数センチ／秒の精度も、そのような吟味を経た上でなければ、意味をなさないのであるまいか。何故なら数センチ／秒という order は、実際の流れでは大へんな乱流の細部に踏みこむことになるからである。この基礎的な研究は、水路実験でおこなえる可能性があり、またその結果は流れの規模や、撮影仕様の違う流れの測定結果を比較する際に、欠かせない資料となるだろう。

5.3 測定し得る流れの条件に関する問題

(1) 流れの色調について

はじめに 1.1 および 1.2 において、洪水流には乱流による、濁度の相違の色調差があらわれるとのべた。ところが急流になると、この色調差があらわれなくなるという問題がおこる。表 0.1 で観測した洪水は、一応警戒水位をこえるものを対象とした。ピークは警戒水位をこえたが、撮影時点では下っていたという例もあるが、これらの結果を通覧すると、砂床河川では色調差がよくあらわれるかわり、砂礫床河川になるとあらわれにくくなり、急流ではほとんどあらわれないということが判明した。それでは乱流構造が違うのかというと、表面に泡が流れた場合、そのパターンは変わらないのであるから、そういう原因を考えることはできない。原因はともかく、どういう水位のときに、どこから下流は色調差があらわれ、どこから上流は色調差が出ないということを、各河川で事前に把握しておくことは、この観測遂行上、重要なことである。表 0.1 の諸河川の観測のほか、筆者は折々の飛行の際、色調差の有無について、多数の河川の資料を収集した。この限界は主として水深と水面勾配、および河床物質の構成状態で定まることになろうが、結果はおって報告の予定である。

(2) 水面の泡について

洪水時に発生する泡は、写真測量ではもっとも測定に利用しやすい対象物である。ところがこの泡は、ハイドログラフの波形において、その一時期にしかつかないという性質があるらしい。洪水時に泡が発生する原因は、冠水していなかった河原や高水敷へ増水により水が浸入することと、河床の土砂が流れにより、かきまぜられることにあるとみられる。われわれが河原

から切りこみの砂を採集し（洗い砂ではない）、器に入れて注水すると、水は泥色に濁るとともに、水面には多量のうす茶色の泡がうかぶ。これはこまかいほこりを核とした、安定度の高い泡であって、土木工事の現場などで、しばしばみかけるものである。その他、水中に長く沈んでいた砂でも、それをそのままかきまぜると泡ができる（生物、有機物が関係するののか）という現象もあり、要するに泥をふくんだ砂が、増水により大量にかきまぜられることにより、発生するものとみられる。したがって洪水で泡が最も多く流れる時期は、増水期で、しかもピーク直前である場合が多く、「泡が出たら増水は終り」ということわざが、河沿いの多くの村民の間に、生れているほどである。したがってこれは急激に出水する、本邦河川に多発する現象であるかもしれない、事実、高水位が長くつづく融雪出水や、梅雨前線性出水では、この泡はあまりみられないようである。こんご全国河川の各水位観測所で洪水時、この泡の出る時期を記録すれば、原因を考える上でも利用する上でも、有意義であると思われる。

(3) 風について

水面にたいする風の影響は、写真測量では流れの表面を測定する関係上、検討を要する問題である。これまでの観察によれば、原因はまだ明らかでないが、風が強まると風波が立つ、その最も立ちやすいところが、かえって平坦であった Boil 面であり、反対に沈んでゆく、泡の多い水域はおだやかになり、風のないときの反対の水面の状態を呈することがみとめられる。しかし反対になってもやはり、わき上る水域と沈んでゆく水域の差はあらわれて、写真映像にとらえられることには変りはない。さらに風が強くなると、泡はどこどころでかたまりはかかれたようにとび、水面標識は水面からめくられて飛び去ることがあるが、しかし推定秒速 20m 以上の強い局地風をうけた、木曾川の成戸付近の写真では、それでも乱流による、わきかえる流れの模様は水面にあらわれて、立体視は可能であった。おだやかな流れでは、風による表面のすべりがあらわれるかもしれないが、洪水になると、かえってわきかえる流れの方が風の影響より卓越するらしく、現在は一応この問題を無視して取扱っている。今後この問題も明らかにされる必要がある。

(4) 急流の場合について

流れのフルード数が 1 に近づくと、常・射流限界付近の特有な波が、水面に立つようになる。この波が立ちだす状態からを、ここでは一応急流とよぶことにする。急流では流れの色調差が出ない上に、この波が、流速の立体視をさまたげ、むしろ波の移動速度が立体視されることになる。泡を追おうとしても、悪天候と関係して、飛行機はまだ飛べる可能性も少く、仮に飛

べたとして、水面標識をまいても、その水面標識は、従来の 0.5mm 厚の発泡ポリスチレン紙では、沈みこむ水域上のはげしい収斂作用をくりかえし受けて、やがてクシャクシャに折られ、丸めこまれ、一とにぎりのボールのようにされてしまう。それは手取川、常願寺川でのテストであったが、紙が Boil 面上で、常に展張作用を受けているならばよいが、逆なのであるから、急流用の特に強い標識を作成するか、あるいは人工の泡をまく研究なども必要となる。本邦にはこのような急流河川が多く、その観測の必要性も強い。これに対しては空中写真測量よりも、むしろ地上写真による測定法を開発する方が、望みが大きいのではないかと思われる。

(5) 増水期と減水期について

洪水時に河床がうごかされる深さを調べた、これまでのいくつかの報告によれば⁹⁾¹⁰⁾、それが意外に深いために、増水期は河床はフラッシュ、減水期はそれがおかれてゆくための、さまざまな河床形の発達、ということが一般にいわれてきた。その影響のために水面の流れかたも、増水期と減水期では、いちじるしく違うのではないかという疑問ももたれるのである。事実これまでの地上観察によれば(浮流物が河岸によったり、中央によったりする問題は別として) Boil 面の発達は、減水期の方が顕著であるように感ぜられた、何回かの場合があった。しかしこれには一般に、増水期の方が風が強いという条件が加わっており、地上観察のみでは Boil の発生状態を、充分に見きわめることはできない。表 0.1 の諸河川中には、増水期のものも減水期のものも、あるいはピークをはさんで双方うつされている河川もある。それらの空中写真の判読結果からいえば、特にその差を指摘することはできない。これは洪水は不定流であるといっても、このような現象を問題にするとときのタイムスケールからくれば、増水期でも減水期でも、それぞれの水位で定流であるとするのと、変らないことによるのではあるまいか。この増水期、減水期の問題は、“測定し得る流れの条件”に加えるよりも、むしろそれ自身、一つの調査目的であるようにも思われる。

あとがき

航空写真による洪水流の研究は、まだ緒についたばかりで、水理学的にも写真測量学的にも、これから明らかにすべき課題が多い。筆者の気づいたいくつかの問題点を、ここにのべてきたが、多くの方々の御教示を得たいと思う。ただ洪水の乱流現象にたいし、実験的に接近し得る可能性が見いだされたことには関心があり、今後実施の困難な実際河川の観測に先だって、多くの予備的研究が、実験水路においてなさるべきで

あると考える。航空写真撮影は経費がかかるとして、研究的には風や気球の利用、あるいはリモコンの大型模型飛行機利用など、いろいろな方法の開発が考えられるが、しかし洪水時にしめされる航空機の機動性は、抜群であり、また結果の効用の大いさから考えれば、経費はむしろ小さいというべきではなかろうか。研究的には実験水路における、写真測量の利用に今後力をそそぐべきであるとする。大方の御指導、御協力をいただきたい。

〔註〕

- 1) 石狩川河道変遷調査, 科学技術庁資源局資料第36号 本文, 附図, 参考編1960~62
- 2) 斉藤徹: “STOL 機と航空写真撮影”, 写真測量4, 63
- 3) 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年10月
- 4) アジア航測 KK の熱心な御援助に謝意を表する。
- 5) Cameron, H. L.: “The Measurement of Water Current Velocities by Parallax Methods”. Photogrammetric Engineering 18, 1952
- 6) 木下良作: “洪水流飛行観測における写真撮影の注意事項”, 1964年6月全国地建配布資料
- 7) 建設省木曾川上流工事事務所調査資料: (1964. 筆者と日本国内航空KKの作業による)
- 8) 5) に同じ
- 9) 安芸政一: “河相論”, 岩波書店, 1951, ほか
- 10) 藤芳義男: “河川の蛇行と災害”, 佐々木図書出版, 1949
- 11) Matthes, G. H.: “Macroturbulence in Natural Stream Flow”. Transactions. Amer. Geophysical Union, 1947
- 12) Casey, H.: “Über Geschiebebewegung”, Mitt. d. Preuss. Vers. f. Wass. u. Sch., 1935
- 13) 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
- 14) 1) と同じ, 本文 p. 91 参考編 pp. 99~100
- 15) 洪水中に砂礫堆 (Alternating bars) の形成がほぼ確認されたことについて, 続報にする。
- 16) 14) と同じ
- 17) 建設省宮崎工事事務所調査資料, (1964, アジア航測と筆者により作業)
- 18) 建設省淀川工事事務所調査資料, (1965, アジア航測と筆者により作業)
- 19) 9) に同じ
- 20) 1) に同じ, 参考編 p. 56