

河川の蛇行について

井 口 昌 平

1. は し が き

ここでは、標題によれば、川のメアンダの現象について解説が述べられるように受取られるであろう。この現象は、古くから多くの入によって、専門家によっても、一般の人によっても、かなりの興味をもって見られてきているのにもかかわらず、この現象に対する理解の方法として、発展性があると考えられるものは、ようやく1940年代になって起こってきたものと筆者は見る。この問題の研究は、そのようにして、主として日本、アメリカおよびソ連の少数の研究者によって、かなり進められたし、また現に進められつつある。^{(1),(2),(3),(4)} いずれにしても、この現象が重力によって流れる川の水と、川の底や岸を構成する物質および流送土砂との間の相互作用の結果として現われる現象のひとつであり、その際主要な役割を果たす力は重力である、とする見方が、上に述べた発展性のある理解の方法である。

したがって、この現象を数量的に記述するためには、それにふさわしい種々な力学的な特性量が第一に見出され、さらにそれらの量の間に成り立つ関係が次第に深く、かつ広い範囲にわたって見出されてゆくことが期待される。しかし、現在では、それらに関しては、まだ、いわば入門的なことしかわれわれは知っていない。そこで筆者がここで扱うことは、この現象についてこのようにしてわれわれが知っている要素的な事実を明きらかにすることがおもであり、主題のメアンダ現象については極めて僅かしかふれることはないであろう。その理由を補足的に言うとするならば、われわれが川の形および流れの力学的な特性について、極めて僅かな知識しか未だ持っていないとするからには、メアンダの現象はかなり複雑な条件のもとにおける川の現象であり、それよりも前にわれわれは、もっと単純な場合について知識を整理することが望ましいと考えるからである。

2. 最も単純な場合

普通の観念によれば、一種の水路としての《川》とか《河川》は、岸や底が土や砂や砂利のような水の流れによって動かされやすい材料で構成されていて、その水路の中には水だけではなく、土や砂や砂利のような、いわゆる流送土砂(sediment)、も流れ、またそれらの流送土砂が場所によっては河床からまき上げられたり、河床に滞積するということが特徴であるとしてよからう。そのような意味において、底も岸もコンクリートで造られ、主として水だけがその中を流れる水路式発電所の水路のようなものと、水路としての川とは著しく異なる。

そのような意味の水路として川を限定しても、まだ川には相当大きな多様性がある。そのような多様性を認めた上で、ここでは要素的な知識を明きらかにするために、最も単純な場合を求めよう。もっとも、現実の川については、それが全く自然の状態であったならば、おそらく最も単純な条件のもとにあるようなものはなかったであろう。しかし、河川改修の事業によって、川のうちでも沖積平野を流れる区間では兩岸に堤防が設けられ、川幅がほぼ一定におさえられ、また平面的な形も単純なも

のにされ、ほぼ一定であることが少なくない。そうなると、川の形態について川という現象のもっている自由度は著しく制限されたものになる。それを押し進めて考えると、最も単純な条件としては、平面形が直線で構成され、岸の面が鉛直で、固定されていて、平均的な底こう配が一定であるような川の区間が、水路としての川の最も単純な場合である、とすることが許されよう。

このような河川区間のひとつの例として Rhein 川上流部の例を図-1⁽⁵⁾に示す。なお、ここでは直線的な平面形をもつ河川区間でも、高水時の掃流力が河床構成物質の限界掃流力に比べて著しく大きいようなものや、流送土砂の流量が著しく少ないようなものは、むしろ特殊な場合として、除外して考える。図-1は、すでに1911年には作られていたものであるが、そこには将に注目に値する事実が多く含まれている。

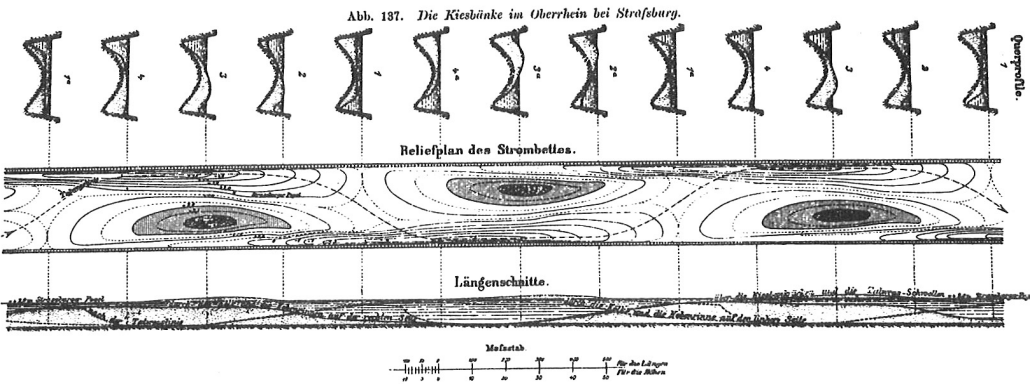


図-1

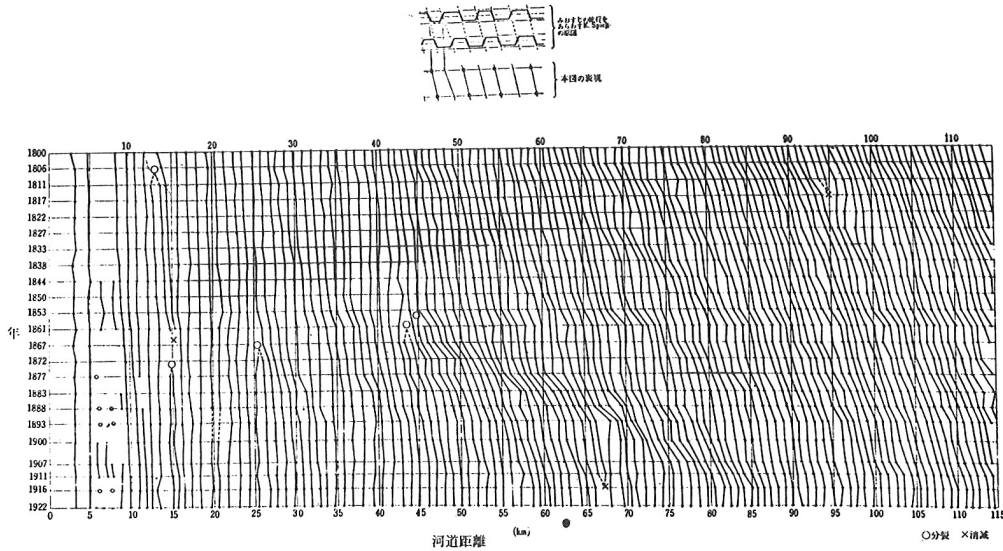


図-2. ライン河の滞筋変遷図

次に写真1ないし4を見られたい。写真1は様な直線水路の底にはほぼ様な粒径の砂を敷きならしてあるところを示す。写真2はその水路に適当に定められた大きさの流れを与えた直後の状態を示す。すでに、流れが様でなく、一種のリズムをもって変化し始めていることが認められよう。写真3はさらに少し時間がたったときの状態を示す。ここでは、もはや流れはほぼ完全に一定のリズムに従って変化していることが明らかである。写真4は、その後に静かに流れを止めて、河床を浮かび上がらせた状態を示す。これを見ると 図-1の Rhein 川の河床との間にはっきりした類似性がある、と推定してほとんどさしつかえないであろう。約10年前からこの現象を研究している木下良作博士は、このように法則的に発達した洲を《砂礫堆》(されきたい)と名付けた。しかし、それよりも前に、河床土砂の限界掃流力に関する実験的研究で名高い A. SHIELDS は1936年に、同じものを《Schräge Bänke》と呼び、⁽⁶⁾ その呼び方は後に英語では《diagonal bars》、⁽⁷⁾ フランス語では《bancs obliques》⁽⁸⁾ と訳された。いずれも《ななめの洲》という意味である。

さらに古く、図-1の Rhein 川の例の場合には、R. JASMUND はこれを《wandernde Geschiebdebänke》あるいは《Kiesbänke》とも呼んでいる。⁽⁴⁾ この場合には《ななめの》というのではなく《移動してゆく》という修飾が用いられている。事実、このように規則的に発達した洲は川の流れの時間的経過にともなって、形をほぼ一定に保ったまま、下流へと次第に移動してゆく。そのことは、同じく Rhein 川の Basel と Strasbourg との間の区間(約115 Km)で1800年から1922年までの122年間に観察された谷線(thalweg)の移動を示すものであり、これとほぼ

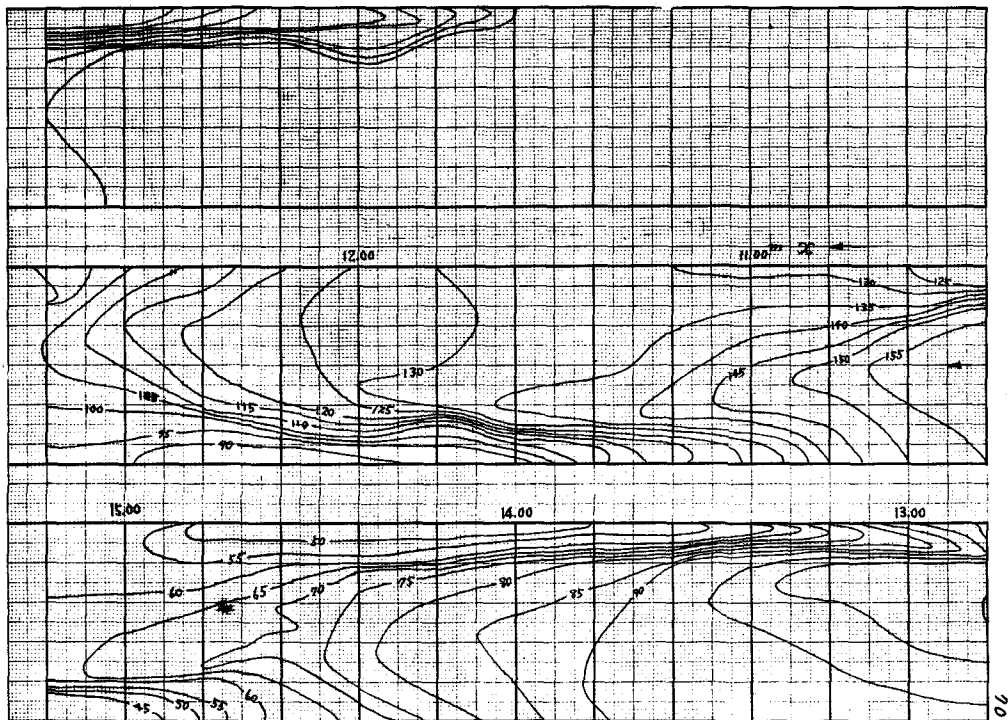


図-3. 河床面の形(等高線, mmで)

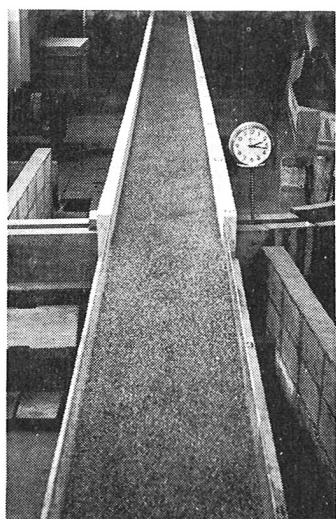


写真-1

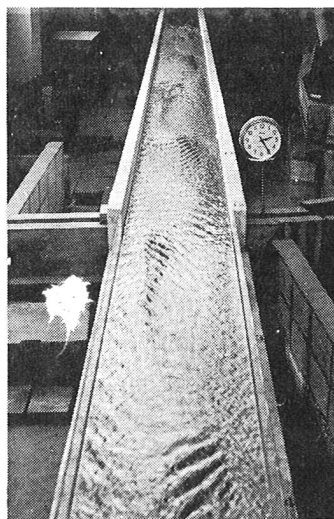


写真-2

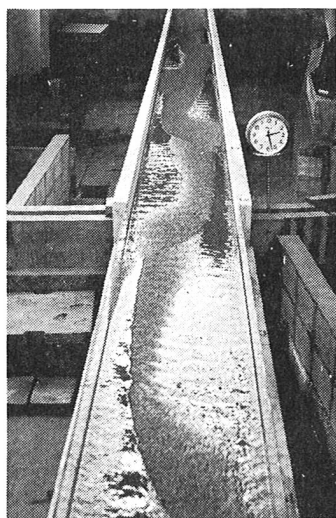


写真-3

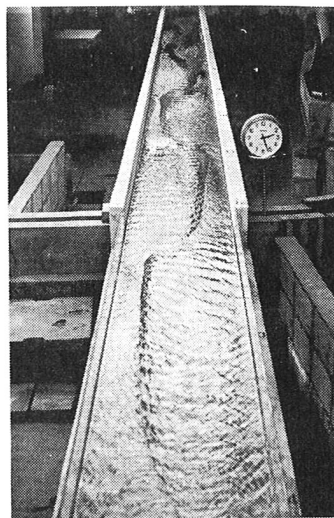


写真-4

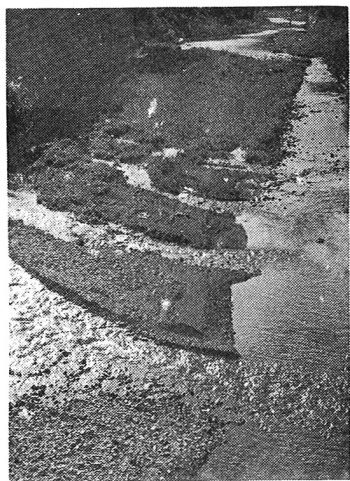


写真-5



写真-6

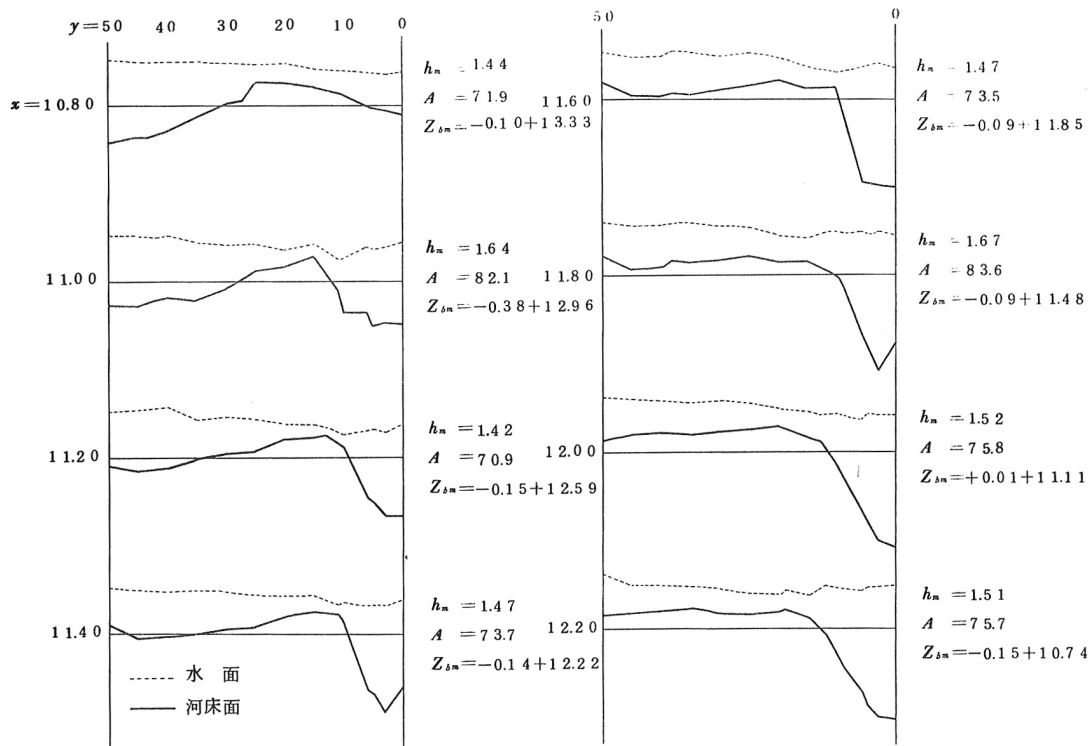


図-4 (a)

図-4 (b)

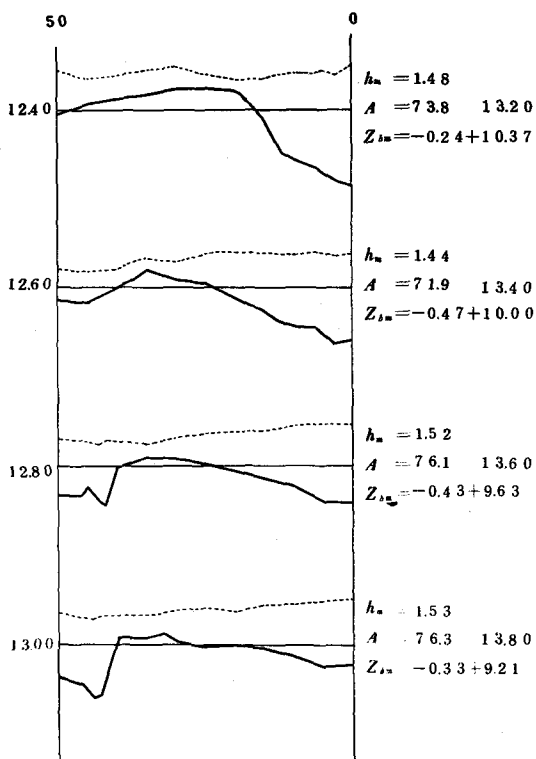


图-4 (c)

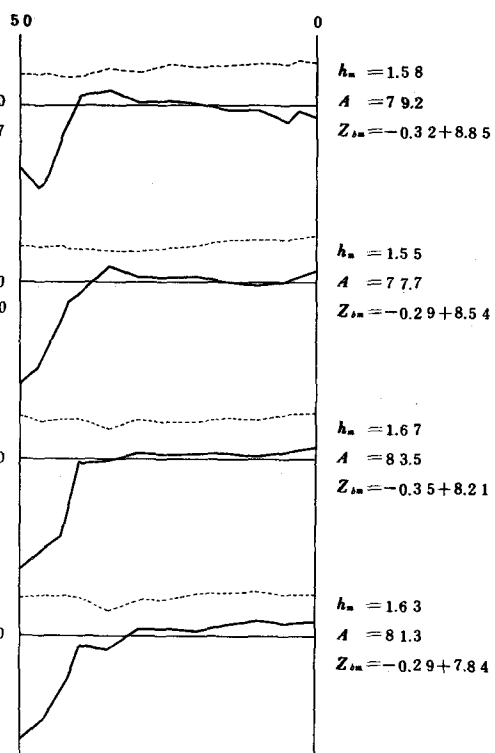


图-4 (d)

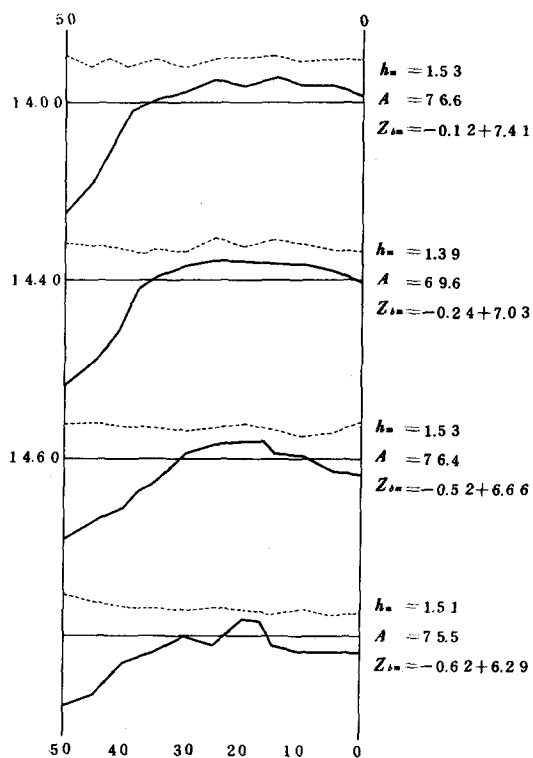


图-4 (e)

同じ現象は、たとえば木下博士の実験によっても示されている。⁽¹⁾また、写真5および写真6は同じ地点(平井川)で約3年の間に、このような砂礫堆がほぼその長さだけ移動した結果を示している。

このように、移動してゆく一連の洲の形は図-1によって代表的に示されるが、なお写真1ないし4に見られるような、実験室内の水路の中における例のひとつも、図-3および4に示しておく。このような一連の洲が流れの時間的経過にともなって、形を保ちながら、次第に下流に向かって移動するからには、仮にひとつの横断面で河床の形の変化を見守っていたとすれば、図-5に見られるように、河床の中心部にかまぼこ型の動かない部分が残ることが期待される。そのことは、この図を示したJAS MUNDが指摘していたが、実験室内の水路によっても確認することができる。

以上のように見てくると、ここにいう最も単純な場合に、河床の形について次のふたつのことが注目される。

- (1) 河床には一連の《ななめの洲》(または砂礫堆)が発達する。
- (2) それらが流れの時間的経過にともなって、次第に下流に移動する。

2.2 流れとの関係

前の節で述べたような現象の発生と持続とについて考察を深めるためには、当然その水路の中の流れと流送土砂の運動に立ち入らなければならない。それには次の三つの段階が考えられる。

- (1) それらの運動およびその結果の観察。
- (2) それらの運動およびその結果に関する物理量の測定。
- (3) 測定された諸物理量に対する理論的考察。

これらのうち、観察については、実際の川についてかなり良く行なうことができ、またそれが重要だが、測定については実際の川について行なうのには多くの困難がある。しかし最近では、空中写真の撮影によって、表面流速の方向と大きさを精密に測定することが日本では行なわれている。

一方、前の節で述べた通り、現在では実験室内で同様な現象を発生させることができるようになっているので、観察と測定はそのような手段によって補なうことができる。

すでに多くの観察によれば、このような現象の発生と持続は、主として河床土砂が岸に近い局部で流れにまき上げられ、それが流送されながら拡散し、水路の軸に対して《ななめ》の方向をなすゆるい曲線に沿って滞積することによって発生し、さらに《まき上げ》と《滞積》の位置が、そのこと自体のために下流に移動することによって、この現象が持続されるもの、と見てよいようである。まき上げ、または洗掘、の局部は写真4で水のたまっている個所にほぼ等しく、滞積の前縁(木下博士のいう砂礫堆前縁)は同じ写真の上で、説明するまでもなく、明きらかに見られよう。

水面の形状にも、河床の形状を反映するような特徴が見られることは、写真3によっても明きらかである。実験室の水路によって、水面の形状を測定した結果は図-4に点線で示してある。河床の横断面を見ると、岸に近くせまい部分が著しく深くなっているような個所があることがわかるが、そのような個所では、左岸では下流向き、右岸では上流向きの軸をもつ強いうずが発生することが観察される。

流れの全般的な状態は、図-6の等単位幅流量線によってかなり明瞭に見ることができよう。これ

によれば、全流量の半分が水路幅の10%ないし20%の程度の狭い部分に集中しているような個所があることがわかる。(もちろん、河川工学上《水当たり》とか《水衝部》とか呼ばれている個所のうちの、最も単純な場合のものがこれに相当する)。

このように複雑な流れの状態を力学的に表現するのに、普通に行なわれているように横断面上の平均流速や平均水深や横断面積と平均的な河床こう配だけを用いることは、第1近似的には許されるであろう。図-7は、木下博士の多数の実験と、3種類の川についてのそのような物理量によって作ったものである。ここで用いてある記号の意味は次の通りである。

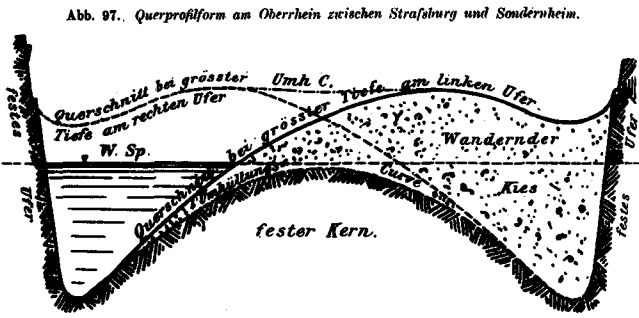


図-5

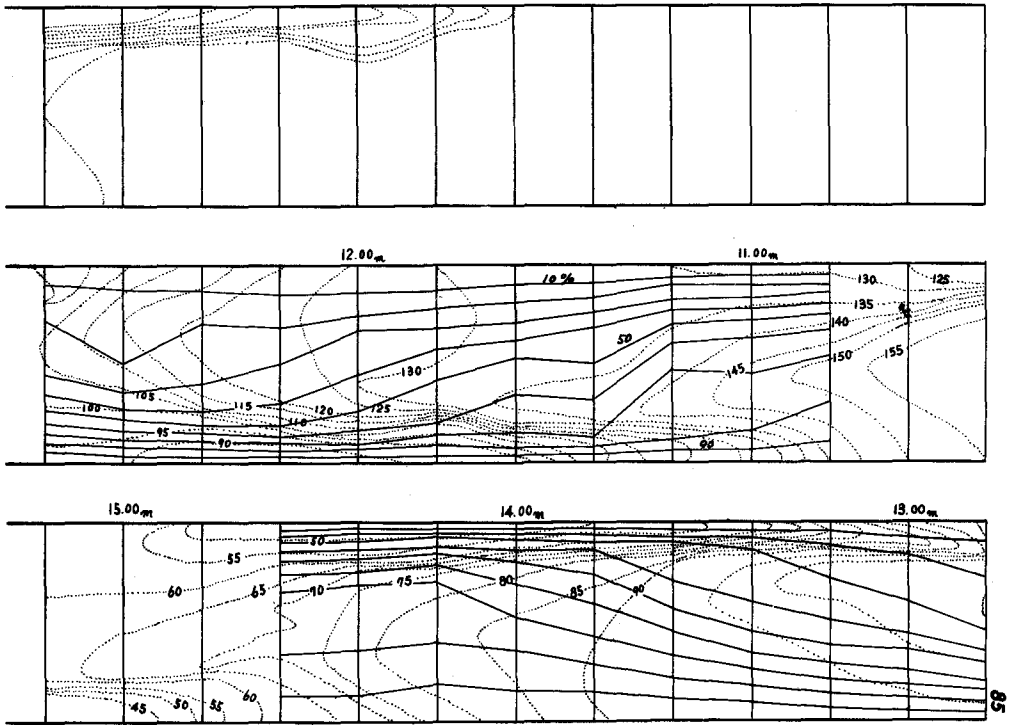


図-6 等単位幅流量線

$F = \frac{u}{\sqrt{gH}}$	流れのフルード数
u	平均流速
H	平均水深
$H_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^3}}$	
Q	流 量
B	水路幅
$F_* = \frac{u_*}{\sqrt{gd}}$	摩擦速度に関するフルード数
$u_* = \sqrt{gHJ}$	
J	平均的な河床こう配
d	河床土砂の粒径

また、図の中の黒点は石炭粒を用いた実験の結果を示している。実際の河川については、これらの物理量は各種の記録から取出した。平均的な河床こう配を求めるのには、後に述べるように、砂礫堆の長さをなるべく客観的な方法で求めることにも関連して、次の方法によった。また、それが比較的簡単であり、また適当であると思う。

たとえば熊川の場合、河床面の等高線が測量によって作られている。これを用いて、左岸に近接した位置の河床高と右岸に近接した位置の河床高とを別々に取り出して、それらの縦断図を同じ紙の上に描くと図8に見られる通りになる。これらふたつの曲線はほぼ一定の間隔で交差して、それらの交点が比較的明瞭におさえられる。そこで、これらの交点によって平均的な河床こう配と砂礫堆の長さが求められる。

図-7によって、砂礫堆の発達している状態がひとつの側面から、かなり一般的な形で表現される。ここでは、問題の中心である砂礫堆については、それが持続的に存在しているという性質的な事実だけが考慮されているが、それを数量的に取扱うことを考えることが必要である。その際取り上げるべき要素として次のものがまず考えられる。

- (1) 砂礫堆の長さの方向の特性量、つまり長さ。
- (2) 砂礫堆の高さの方向の特性量。
- (3) 砂礫堆の前線の平面形に関する特性量。
- (4) 水路幅および平均的な河床こう配。

これらのうち、(1)と(4)については特に言うことはなからう。また、その決定の方法についてもすでに述べた。(2)については、最も適切なひとつの特性量を決定する方法は未だ十分にはわかっていない。たとえば、横断面に関する平均河床高の縦断図から求める方法、図-8に示されたような曲線によって、ひとつの砂礫堆をきめ、それについて一方の岸の近くの河床の最低高と他方の岸の近くの河床の最高高との差をとる方法、あるいはひとつの砂礫堆の中の最高点と最低点との高さの差をとるなどの方法が考えられる。(3)については、未だ適当な量は見出されていない。

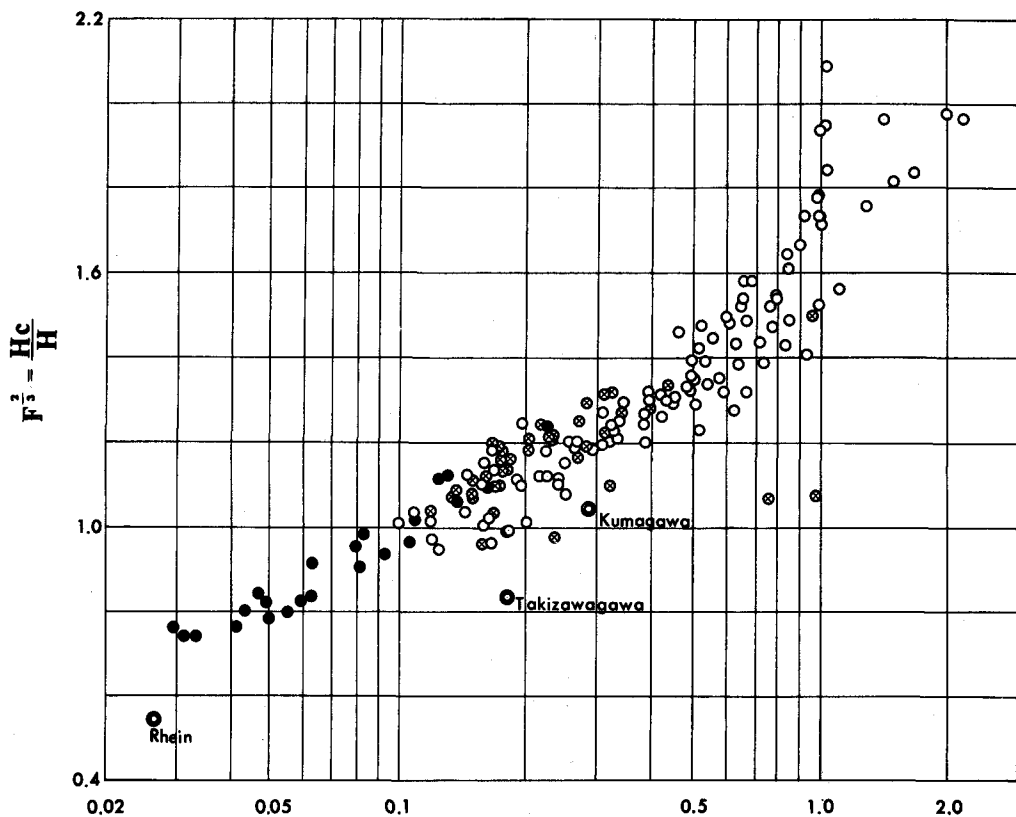


図-7 $F^{\frac{1}{2}} \cdot F_*^2 = \frac{Hc}{H} \cdot \frac{u_*^2}{gd}$

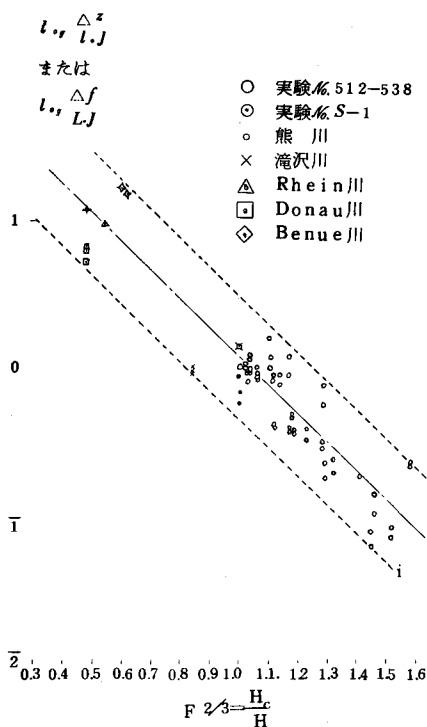


図-9

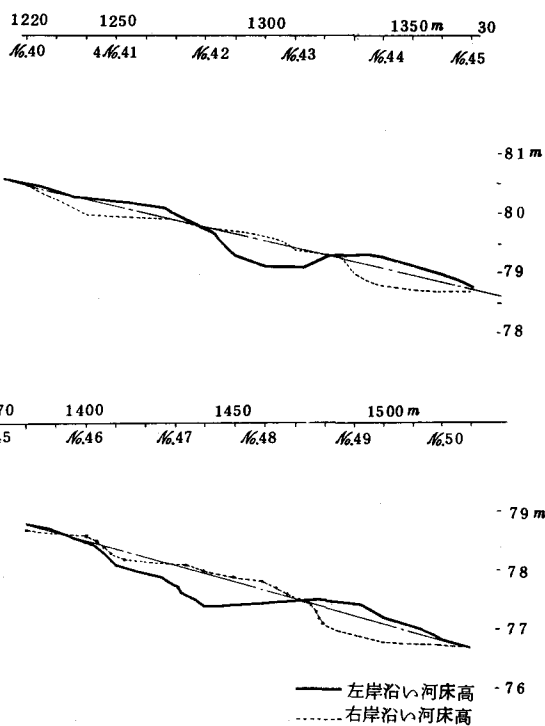


図-8 熊川の河床縦断面図

これらの特性量を組合わせて、形態の特性を第1近似的に無次元的に表現することが可能であるという見込みがある。それは、水路の大きさにかかわらず、流れのフルード数と摩擦速度に関するフルード数とが一定の場合には、同様な現象が起こることが期待されるからである。つまり、大小2種類の水路がある場合、両方の水路の中に共に砂礫堆が発生する場合、それら2種類の砂礫堆が形態上の特性から見て相等しいことがあり得る、と期待される。そこで、砂礫堆の長さを L 高さの特性量を ΔZ とすると、 $\Delta Z/(L \cdot f)$ という無次元量はここで期待するものとしてふさわしいようである。この量の値を木下博士の実験や数々の河川のデータによって計算して、流れのフルード数という無次元量との関係は、図-9に見られる通り、ほぼ期待にそうものである。

なお、砂礫堆の長さについては、木下博士が同一の条件のもとで行なった実験で総数664個の砂礫堆について測定した結果、図-10に見られるように、そこに発生した砂礫堆の長さにはかなりの広がりがあることがわかる。しかし、その発生分布にはある種の単純な規則があるように見える。この場合、最短と最長の比は6であるが、図-9の点のばらつきの範囲も、砂礫堆の長さに関係する方向ではほぼ6になっていることは偶然ではないかもしれない。

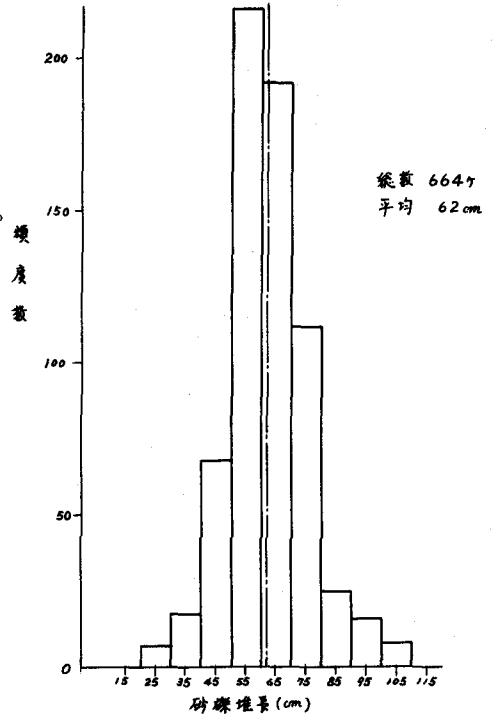


図-10 一定条件のもとにおける砂礫堆の長さの散らばり

2.3 移動の速さ

木下博士は、幅13.2 cmないし120 cm、こう配 $\frac{1}{80}$ ないし $\frac{1}{60}$ 、底質の粒径0.038 cmないし0.283 cmの条件のもとに行なった89例の実験によって、砂礫堆の移動の速さを観察して、その速さについては、実験の範囲内で、一般化した結果が次のように得られることを示した。(1)

$$\frac{gL}{u} = \sqrt{19.8 - 130 \log_{10} \frac{u_d}{u_* - u_{*c}}} - 8.5 \times 10^{-1.3 f' B/H}$$

ただし、この中でこれまでに使った記号以外の記号の意味は次の通りである。

- u_{*c} 底質の限界掃流力に対応する摩擦速度
- u_d 砂礫堆の移動の速さ
- f' 流れの抵抗係数 ($f' = \frac{2g}{u^2}$)
- B 水路幅

なお、砂礫堆の移動について次のことが注目されよう。川の流量は常に変化しており、ここに砂礫堆の形成に関係の深いと見られる洪水の大きさはいろいろである。それに応じて砂礫堆の大きさも移動速度も異なることが当然推定されるが、それにもかかわらず、図-2で見られるように、非常に長い期間、非常に長い区間にわたって、一連の砂礫堆がほとんど持続的に、かつ連続的に存在し、移動

していることが認められている。

以上見てきたように、側壁が固定されている直線河道の中における現象の中に、流れおよび河床の形が一定のリズムによってゆらぐことがわかる。この現象を木下博士は蛇曲(だきょく)と名付けている。

3. 側壁が侵食されうる場合

この場合も実はさらに幾つかに分類して考える必要があるかもしれない、しかし、ここでは、いわゆる沖積地帯の河道の場合だけを取上げる。

木下博士は、この場合についての多くの観察と実験とによって、この場合のメアンドラが、その河床に発達する一連の砂礫堆の接続の方法と関連づけて分類される、ということを示した、それによれば、

- (a) 砂礫堆が2個ごとに河道が1蛇行するもの、それを蛇曲と呼ぶ。
- (b) 蛇曲河道の中で、側壁の侵食と、河岸近くへの滞積とがさらに進行して、砂礫堆が3個以上で河道の1蛇行が行なわれるもの、これを迂曲と呼ぶ。
- (c) 扇状地のメアンドラ。
- (d) デルタ地帯のメアンドラ。

文 献

- (1) 石狩川河道変遷調査, 科学技術庁資源局資料, 第36号 (1961年11月1日)
- (2) 石狩川河道変遷調査, 参考編, 科学技術庁資源局資料, 第36号(1962年12月1日)
- (3) J.F.FRIEDKIN, Meandering of alluvial rivers, U.S. Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1945年
- (4) K.I.Rossinskii, I.A.Kuzmin, Regularities of river channels formation composed by astatic ground, Bulletin de l'Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, VII^e Année, №4 (1962年12月)
- (5) R.JASMUND, Die Gewässerkunde (L.Franzius & E.Sonne, Handbuch der Ingenieurwissenschaften, 4. Auflage, Dritter Teil, Erster Band), Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1911年
- (6) A.SHIELDS, Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, Mitteilungen der preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Heft 26 (1936年)
- (7) The sediment problem, Flood Control Series, №5, United Nations, 1953年
- (8) C.JAEGER, Hydraulique technique, traduit par M.LARONDE, Dunod, Paris, 1954年