

河床形状の研究に関する技術史的考察

○ 東京大学工学部 正会員 高橋 裕
早稲田大学理工学部 正会員 鮎川 登

1. 問題の提起

ヨーロッパ、特にドイツ、フランスにおいては、19世紀後半から20世紀初頭にかけて、河床形態に関する実測に基づく調査研究がきわめて精力的に行なわれていた。しかも、それらの成果は2年ごとに開かれていた国際航路会議 (Congrès international de navigation intérieure) などに発表され、実り多き討議を経て、現実の河川改修計画に対し有効な指針を与えていた。これら調査における実際の河川の河床形態の動態に関する現象観察は入念をきわめ、その定性的記述は今日においても参考となることが多い。しかし、われわれがここでこの問題を深く掘り下げようとした意図は次のような問題意識による。

- (1) ヨーロッパのこの種の河床形態に関するすぐれた研究が、1920年代以後停滞し、かつその後の土砂水理学の研究へと直接には継承されなかったのはなぜか。
- (2) 当時としては先端を切っていたヨーロッパのこの一連の研究の成果は、わが国ではどのように吸収されたか。それがわが国のその後の河川改修計画には必ずしも十分には生かされていないようにみえるのはなぜか。
- (3) 1950年以後、ふたたびソ連、アメリカ、日本などでさかんになった河床形態の研究の方法とその経過は、今世紀初頭ごろの上述研究とどのような関係にあるのか。水理学研究の歴史的流れのなかでは、それぞれはどのように位置づけられるか。
- (4) 今世紀初頭以来、すなわち河川法制定以後、全国的に河川改修工事が推進されてきた間において、河川技術者は、どのような河床形態に対する認識に基づいて計画を進めてきたか。

これらの問題点を検討することによって、河床形態についての従来のいわゆる経験的知識、地理学的方法、力学的接近方法などの相互関係を掴むことができると思われる。このような各種調査を概観することによって今後の河床形態研究の方向を考えてみたい。まず19世紀から20世紀前半にかけてのヨーロッパの調査の大略を紹介しよう。今回の発表はなお序論的なもので、今後はヨーロッパの研究経過をさらに深く探る一方、さしあたり明治中期から昭和初期におけるわが国での河川改修において河床形態をどのように扱ってきたかを、水理学の国際的流れとの対比のうちに検討したいと考えている。

2. 20世紀初頭までのヨーロッパの研究

ヨーロッパでは、19世紀の中頃から河川を航路として利用することが要請されるようになり、舟運のための河川改修がドイツ、フランス、オランダ、ロシアなどの多くの河川で実施された。河川の航行性を高めるための工事としては、水制などの河川工作物による低水工事、浚渫、給水により水深を増加するための貯水池の建設、河川の運河化、平行運河 (lateral canal) の建設などの工事が行な

われた。ここでは、低水工事に伴って19世紀の後半から20世紀の初頭にかけてヨーロッパで行なわれた河床形状に関する研究の概要を紹介する。

当時、ヨーロッパで行なわれた低水工事の方法には、ドイツで多く採用された方法とフランスで多く採用された方法の2つがあった。ドイツで多く採用された方法は対象とする河道区間を通じて水深および流速をできるだけ一様にするために、低水路の横断面形を一定にし、法線をできるだけ直線化しようとする方法である。一方のフランスで多く採用された方法は自然の状態の流路形状を重視し、低水路の法線および横断面の形状が連続的に滑らかに変化するように低水路を固定する方法である。例えば、河幅が広く、河道内を水流が乱流している状態の河川を航行に適するように改修する場合を考えると、ドイツでは、多くの場合、与えられた流量と勾配から航行に必要な水深を得るための河幅(Normalbreite)を等流の平均流速公式や経験に基づいて算定し、兩岸から水制を出し、河道のほぼ中央部に幅がNormalbreiteの低水路を法線ができるだけ直線的になるように固定する工事が行なわれた。フランスでは、河床の状態や流路の状況を観察し、流路の曲率と水深の関係を与えるFargueの法則に基づいて航行に必要な水深が得られるように流路形状を修正しながら河床に存在する深みをつなぐように低水路法線を定め、水制などにより低水路を固定する工事が行なわれた。一般に流路は直線河道内においても蛇行するので、フランス的な方法にしたがうと低水路法線は蛇行形状をとることになり、滯筋は固定され、安定した航路が得られる。これに対して、ドイツ的な方法によってほぼ一定の河幅の直線的な河道に改修された河川では、低水路内を滯筋が蛇行し、下流へ移動し、また浅瀬が形成される現象が生じ、航路を維持することに苦勞することになった。そのために、19世紀の後半から20世紀の初頭にかけて滯筋の蛇行や移動の現象を解明するために、直線的に改修されたドイツやオランダの多くの河川で詳細な河川測量が行なわれ、河床の変動状況が明らかにされた。

Grebenau¹⁾はRhein河のDaxlander～Würther間の1867年と1871年における砂礫洲と滯筋の位置の観測結果(図-1)に基づいて、直線河道においても滯筋が蛇行し、その位置が変化することを示し、これらの現象は河床に形成される砂礫洲と密接に関係していると考え、Rhein河の河床の変動状況をつぎのように推察している。「砂礫洲は上流側が上に凸の平たい円弧状をなし、下流側は砂礫が止まり得るよりも急な斜面をしている。砂礫は上流側の緩い斜面を転動し、砂礫洲のもっとも高い縁を越えて滯筋に落ち込み堆積する。このようにして砂礫洲は下流へ移動する。Rhein河上流部の河床は低水時と高水時で同じ形態をしており、異なる点は砂礫洲の移動速度であって、砂礫洲と滯筋は水位に応じた速度で下流へ移動する。低水時には砂礫洲の高い部分が水面上に出、流れはこれらの間を蛇行する。」Grebenauはまた横断面図は図-1に示すように非対称の形状をし、縦断面図は階段状をなすことを示し、一様な勾配の長方形断面に河道を改修しても、実際にはそのような形状に河道を維持することは困難であることを示した。

その後、Lavale²⁾はRhein河、Main河、Donau河、Inn河、Lech河、Keller^{3),4),5)}はOder河、Elbe河、Memel河、Pregel河、Weichsel河の河川調査を行ない、これらの河川ではいずれも砂礫洲が形成されており、そのために滯筋が蛇行し、移動する現象が生じていると報告している。これらの河川のうちWeichsel河は砂床河川で河床変動が激しいために140～148 Kmの区間については1897年から毎年詳細な河川測量が行なわれ、この河道区間における河床形状が詳細に示され(図-2)、

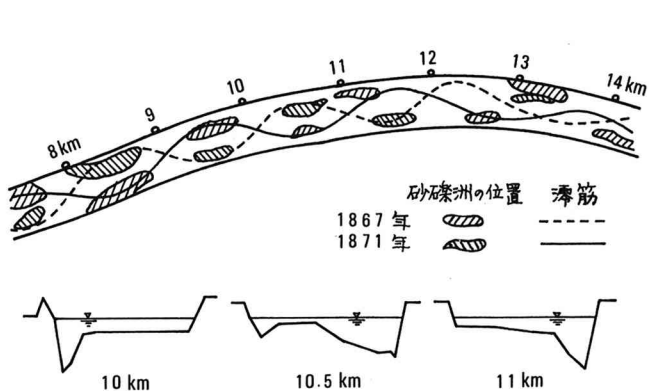


図-1 Daxlander ~ Würther 間の Rhein 河の季筋と砂礫洲の位置の変化と横断面

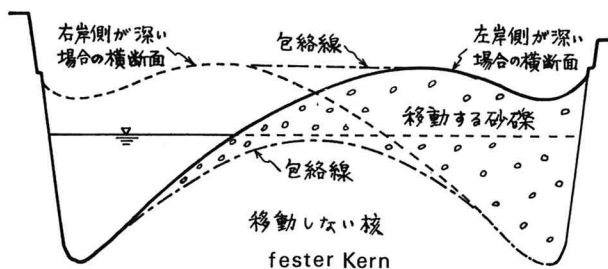


図-3 砂礫洲が形成されている河川の横断面形状

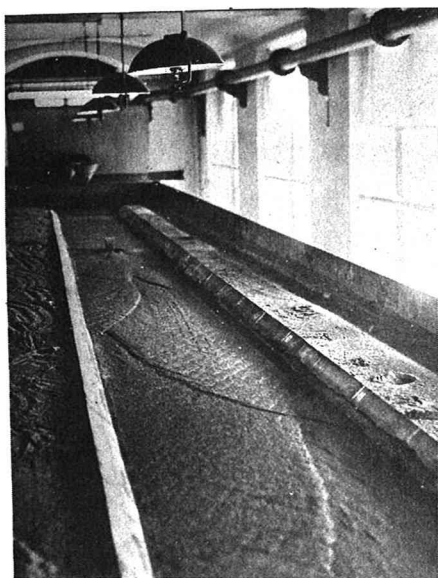


写真-1 実験水路における砂礫洲

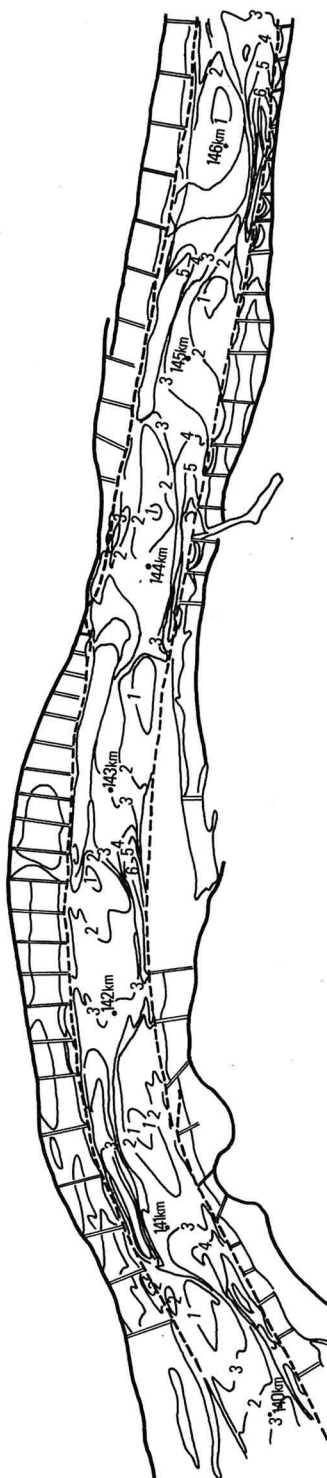


図-2 Weichsel 河の河床測量図(1901年)
 (図中、等深線の単位は m)

砂礫洲の移動速度は約 550 m/year で、河床の状態は約 3 年の周期で変化することが明らかにされた。

Van Hoof⁶⁾ は Merwede 河の 1880 年から 1890 年までの河床の状態を示し、砂礫洲が約 300 m/year の速さで下流へ移動していくことを示した。

Faber⁷⁾ は Rhein 河、Donau 河、Inn 河などで砂礫洲の移動特性および形成特性を観察し、砂礫洲は彎局部あるいは支川の合流点付近では移動せず、位置が固定されること、および砂礫洲は河幅が広い場合には形成されるが、河幅を狭くすると形成されなくなることなどの特性があることを示した。

Engels⁸⁾ は Elbe 河の直線的な河道区間の河床変動を調べるために移動床の模型実験を行ない、高水時および低水時における河床変動を観察し、実際の河川で低水時にみられる淵、瀬および洲はそれぞれ別のものではなく、ひとつの河床形状(砂礫洲)の一部分をなすものであることを明確にし、河川における滞筋の蛇行および移動の現象を解明するためには、このような河床形状の特性を明らかにすることが必要であると考へた。そして、実験水路で砂礫洲を形成させ(写真-1)、その形成過程を詳細に観測した。また、実験結果に基づいて砂礫洲の形成限界について考察し、砂礫洲は水深と水路幅の比が小さい場合に形成されるが、水深が大きくなると砂礫洲は形成されなくなり、dunes が形成されるようになること、および河床が洗掘低下する区間では砂礫洲は形成されないことなどを明らかにした。

Blasius⁹⁾ は平坦な河床に偶然に攪乱が生ずると、そのために流れに変動が生じ、砂の運動にも変動が生ずる、そしてこの変動が発達して砂漣や砂礫洲などの河床形状が形成されると考へ、これらの河床形状の形成機構は河床面の不安定性によって説明されるが、河床形状の発達過程で渦が生ずるので、流水の運動法則に従ってこの現象を解析することは困難であると述べている。さらに、Blasius は河床形状の領域区分は流水と流砂の間の相互作用を考へることによってなされるだろうと考へ、流速と長波の波速の比(フルード数)が河床形状の領域区分を行なう場合に重要なパラメータとなることを示唆している。

Jasmund¹⁰⁾ は直線的に改修された河川では河床形状が移動する現象が共通して見られるとし、その一例として Rhein 河の Basel ~ Sonderheim 間に形成された砂礫洲について、その形状、移動機構および移動速度を詳細に記述している。また、砂礫洲が形成されている河川の横断面の特徴を次のように記述している。「ある時には最深部は左岸側にあり、別の時には右岸側にくる。平均して3年か4年の間にひとつの極限から他の極限に移る(図-3)。つぎの3年か4年の後に横断面はもとの形にもどる。この移り変わりは徐々に進むが、しかし、それは一方の岸の側にある最深部が消えてなくなり、次第に川の中心部を通ってもう一方の岸の側に移るといふようになるものではない。むしろ、河床は兩岸に沿っていつも周期的に変動し、その変動のしかたは、一方の岸の側の水深が浅くなっていくと、それに対応するだけもう一方の岸の側の水深が増していくというものである。こうして川の中心部には河道の軸に沿って長くのびたかまぼこ形の固定した核(fester Kern)が動かずにとどまっている。変化する横断面のすべての形を包絡する曲線は図-3に示されているような形になる。そして、河床の平均深さは、ほぼ一定になる。したがって、河床面全体に水が乗るような水位の場合には、平均水深も横断面の面積もほぼ一定に保たれ、平均河床高の縦断面図は水面形と平行になる。横断面がこのよ

うに周期的に変動する原因はいわゆる「移動する砂礫の洲 (Wandernde Geschiebänke)」の現象にある。」

上述したように、直線的な河道区間では、一般に、砂礫洲が形成され、滞筋は蛇行し、また下流へ移動し、横断形は図-1あるいは図-3に示すように非対称になり、滞筋に沿う縦断図は階段状になり、淵の間に瀬が存在するようになる。したがって、実際の河川の横断形は標準断面で表わされるような状態とは非常に異なり、航行に必要な水深以下の浅瀬が生ずるようになる。舟運にとっては、とくに淵と淵の間に現われる瀬の水深が重要になってくる。Jasmund は淵と淵の接続のしかたに正常横過 (Normaler Übergang)、不整合横過 (Verschobener Übergang) および平板横過 (Plateauförmiger Übergang) の3つのタイプがあることを示し、正常転向の場合には瀬においても航行に必要な水深を維持しようとしている。

フランスの Girardon や Fargue は自然の河床の状態を観察し、一般に流路は直線河道においても左右岸交互に形成される淵から淵へ蛇行することを認め、低水工事により流路を固定する場合には、自然の状態の流路形状をできるだけ尊重し、低水路法線は蛇行させるのが良いと主張した。Girardon¹¹⁾ は1888年の第3回国際航路会議の報告において、低水路の蛇行彎曲部の曲率半径を徐々に変化させ、法線形状を滑らかな曲線にすることにより、淵と淵との間に存在し、航行の障害となる浅瀬の上の水深を上下流の淵における水位を変化させずに航行に適したものにすることができると述べ、さらに低水路を蛇行させると、勾配を小さくすることができ、また滞筋を固定することができるので、航路として有利であると述べている。Girardon はこのような考え方に基づいて Rhône 河の改修を行ない、良好な結果を得ている。

Fargue は Garonne 河における観測結果に基づいて、水深と河道曲率との関係を考察し、Fargue の法則としてまとめ、水深と河道曲率の関係を与える経験式を提案している。

19世紀から20世紀にかかる頃のこれらの研究業績の内容が最も良く表現されているのは、この頃の国際航路会議における討論の場である。たとえば1894年の La Haye の会議の際の Girardon の説得力ある演説に対しては、Fargue がすかさず

「Je voudrais dire un mot pour qualifier cette très intéressante communication; je dirai que c'est un véritable événement en hydraulique fluviale, c'est une révolution.」

と讃えているのは印象的である。Girardon の演説内容は、Rhône 河の河床変遷と改修の経過などを刻明に追いつつ、改修の在り方につき自信と熱意に満ちた報告を行なっている。

3. ヨーロッパでの河床形態研究のわが国への影響

前節に紹介した研究の成果を、わが国で最も良く検討し、その問題の所在についての確な判断を持っていたのは岡崎文吉であったと思われる。彼が1909年(明治42年)、河島醇北海道庁長官に提出した石狩川の調査書にも、石狩川の治水の在り方、特に低水工事計画を考えるに当たって、Girardon の1894年の報告はもとより、Griebenau, Baumgarten らの研究についても十分検討していることがわかる。また1915年(大正4年)の著書¹⁵⁾においては、中部ライン河改修や Rhône 河改修の失敗の状況を述べつつ、「Girardon 氏の覚醒」と題して彼が1882年から84年にかけて

Rhône 河に試験工事を施行した実験以後、自然を保存し自然の示す模範に従う改修により成功した例を詳述している。岡崎は第6回国際航路会議における Girardon の発表を高く評価し、河床形態と縦工との関係などについてもその核心を紹介している。彼が1910年(明治43年)石狩川治水事務所長として石狩川の治水計画立案の際、Girardon 始め、前節に紹介したヨーロッパの教訓は相当程度生かされたといえる。

しかし、不審なのはこれら教訓はその後のわが国の他の重要河川において必ずしも活用されていないように思われる点である。もとより宮本武之輔¹⁶⁾がJasmund などの業績を紹介しているように、また中山秀三郎がこの種の研究経過に大きな関心を寄せていたことは事実としても、これら知識の普及はきわめて概括的であり、正確度も十分であったとはいえない。したがって、実際の河川改修工事計画へは十分に適用されたとはいえない。その理由のひとつは、前述の研究成果はもっぱら低水工事に際して重要な知見であって、明治中期以降のわが国の河川改修において重点が置かれていた高水工事にはそれほどには重要な認識となり得なかったのではあるまいか。次に考えられる理由としては、ヨーロッパにおいてもその後この種の研究が停滞した背景とも一部共通すると考えられる。川の舟運の状況が変わってきたこと、また河川工事への土木機械の導入によって、川の自然に対する人工の度合が増してきたため、少々の河床変動は機械力によっても克服しうるようになったからである。

一方、わが国においては、真田秀吉らの努力によって、古来からの独特の河川工法に近代的な技術をどのように駆使し調和させるかに力点が置かれ、その方向で河床形状に対する理解が進められ、それなりの成果を挙げていた。ヨーロッパの緩流河川において、舟運との関連で捕えられていた河床形態研究は、やはり縁遠いものと考えられていたのではあるまいか。

なお、この小論を考察する段階で安芸鏡一先生に昭和初期の事情について種々お教え頂き、ドイツやフランスの文献とその評価については井口昌平先生^{17), 18)}から懇切なるご教示を仰いだ。ここに深くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Grebenau, H. : Der Rhein vor und nach seiner Regulierung auf der Strecke von der elsässisch-bayerischen Grenze bis Germersheim, Dürkheim, 1871.
- 2) Laval, G. : Unsere natürlichen Wasserläufe, Weilheim, 1883.
- 3) Keller, H. : Der Oderstrom, Berlin, 1896.
- 4) Keller, H. : Der Elbestrom, Berlin, 1898.
- 5) Keller, H. : Memel-, Pregel-, und Weichselstrom, Berlin, 1899.
- 6) Van Hoof : Binnenschiffahrts-Kongress im Haag, 1894.
- 7) Faber, E. : Studien über die Verbesserung der Schiffbarkeit der Donau von Kelheim bis nach Ulm, Berlin-Grünwald, 1903.
- 8) Engels, H. : Untersuchungen über die Bettausbildung gerader oder schwach gekrümmter Flussstrecken mit beweglicher Sohle, Zeitschrift für Bauwesen, 1905.
- 9) Blasius, H. : Über die Abhängigkeit der Formen der Riffeln und Geschiebeebänke von Gefälle, Zeitschrift für Bauwesen, 1910.
- 10) Jasmund, R. : Handbuch der Ingenieurwissenschaften, Dritter Teil, Der Wasserbau, Erster Band, Die Gewässerkunde, Leipzig, Verlag von Wilhelm Engelmann, 1911.
- 11) Girardon, : 1st Congress of Inland Navigation, Frankfurt-on-the-Mein, 1888.
- 12) Fargue, L. : La forme du lit des rivières à fond mobile, Gauthier-Villars, 1908.
- 13) Compte-Rendu des Travaux du Congrès, VI^{ème} Congrès International de Navigation Intérieure, La Haye, 1894.
- 14) 岡崎文吉 : 石狩川治水調査報文, 1909.
- 15) 岡崎文吉 : 治水, 丸善, 1915.
- 16) 宮本武之輔 : 治水工学, 修教社書院, 1936.
- 17) 井口昌平, 吉野文雄 : 河床形態の研究の過程について, 生産研究, 1967年1月
- 18) 井口昌平, Donau 川の河床状態に関する Girardon の調査報告について, 生産研究, 1967年12月