

河床形態の研究の過程について

—特に 20 世紀初頭までの研究について—

井口 昌平・吉野 文雄

河床形態、とくに砂礫堆の発達した河床の形態に関して、19 世紀の終わりから 20 世紀の初めにかけて、主としてドイツで行なわれた研究を、順を追って、また研究の方法によって大別して紹介する。これらの研究は、現在再び取り上げられているこの問題の研究の発展のために、今でも寄与するところが少なくないであろう。

1. ま え が き

ここではいわゆる砂礫堆に関する研究がおもな話題になるのだが、砂礫堆の形成という現象はまだそれほど広くは注意されていないことを考慮して、その主題については、流送土砂が掃流の形で運ばれる場合には、ことに河道が直線的であれば、砂洲あるいは砂礫の洲が規則的に形成されるのが目立つはずであり、その現象がここで主役を演ずることになるということを書いておく。

その砂礫堆の形成に注目することが、そのような川の形態ばかりでなく、流れや土砂の流送の現象をより深く理解するためにも重要である、ということは、19 世紀のいつごろからか主としてドイツ人によって気づかれていたようである。その方向における河川の調査ないし研究が 20 世紀の初めまでドイツにおいて何人かの人々によって行なわれたことを今日文献によって知ることができる。この系統の研究はその後いったん停滞していたが、1950 年ごろから再び始められたと見てよかろう。今度は主として日本、ソ連、アメリカの人々がその研究をそれぞれ別個に再開した。もちろん、それらの最近の研究は、上記のいわば初期における研究が記述的な、定性的な段階にとどまっていたのとは違って、定量的な段階におけるものとなっている。したがって、すでに半世紀以上前の研究からは今日新たに得るものは少ない。しかし、その昔の研究は今から見れば、現象の観察の点において著しく入念のものであって、同じ問題の今後の研究に役立つ情報を、その点から、提供する可能性があると思う。そこで、ここでは、この問題に関して 20 世紀の初頭までに行なわれた研究を文献によって筆者がさぐって書き留めた、年代記的なノートをお目にかけたいと思う。

2. 河床形態の観察に基づく研究

筆者のこれまでの調査では、砂礫堆の形成の現象を注目するべきものとして、いつ誰が最初に指摘したのかは残念ながらわからなかった。しかし、1925 年に発表された Spieß の研究によれば¹⁾、Rhein 川については、図 1 に見られるとおり、すでに 1800 年から谷線が規則的にうねる現象が観察されている。この観察のときには、あらわな形で注目されたのは谷線であったが、その陰には砂礫堆の形成が意識されていたのであろう。

砂礫堆の規則的な形成に注目して、それについて注意深い観察の結果を発表したのは、Grebenu であろうと

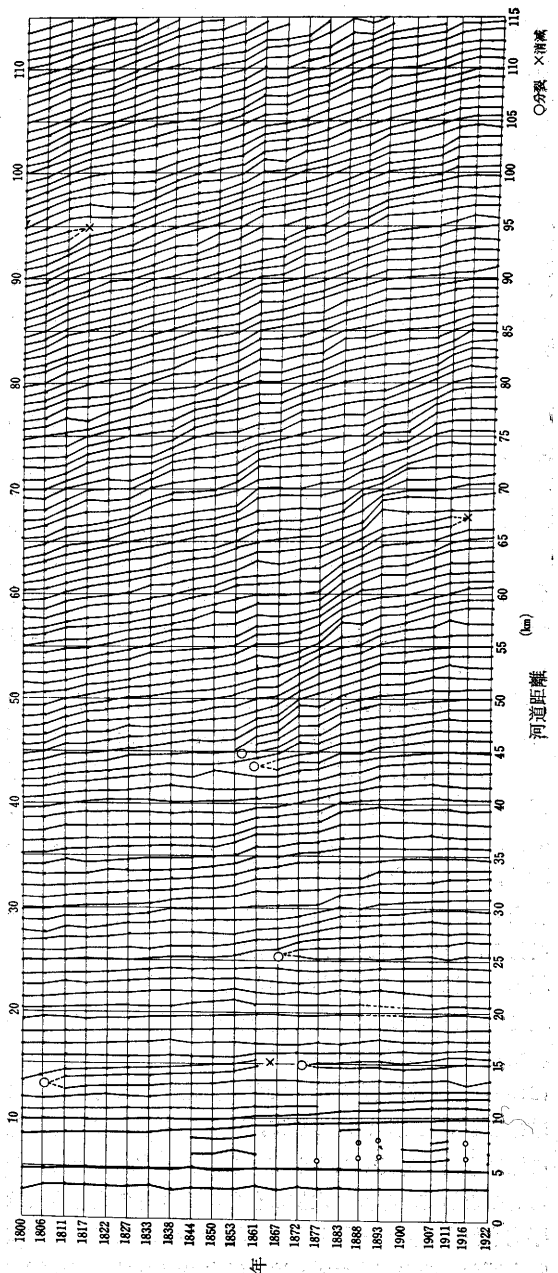


図 1 Rhein 川の谷線の変遷図

推察する、というのは 1870 年に Grebenau が発表したところによると²⁾、Grebenau は直線的に改修された Oberrhein の河床形態について詳しく観察して、砂礫堆が直線河道の左岸寄りと右岸寄りに交互に形成されるのを見いだした。さらに Grebenau は、《砂礫堆の形は上流側では上に凸の平たい円弧状であり、下流側では礫が止まりうるよりもさらに急なこう配の斜面をなしている。砂礫は砂礫堆の上流側の斜面の上を転動し、砂礫堆の峰を越えて、谷線の方に落ち込んで、そこにたい積する。その結果、砂礫堆は下流へと移動する。Oberrhein の河床は低水時と高水時で同様な形態を保っており、それら二つの場合に異なっているのは砂礫堆の移動速度であり、砂礫堆と谷線とは水位に応じた速度で下流に向かって移動するものである》、と観察の結果を要約した。この要約は今日の知識によってもまったく正しいものであるばかりでなく、現象の要点を抜き出している点で、むしろ驚くべきものであろう。さらに、Grebenau は砂礫堆の体積と移動速度から掃流による土砂流量を計算した。掃流による土砂の流送の量が、一定の条件のもとにおいても、周期的に変化することがすでに気づかれていたことになる。

砂礫堆の規則的な形成の機構ないし契機については、Grebenau は必ずしも適切な見解をいただいたのではなかった。Grebenau は、砂礫を含んで流れる支流が本流に合流すると、その砂礫が合流点のあたりにたい積するために、本流の流れが対岸に押しやられ、それが砂礫堆の発生の端緒となると考えた。しかし、今日では、このようなはっきりした形で流れをかたよらせることがなくとも、砂礫堆が発生することが実験によって明らかにされている。

Grebenau の研究によって、おそらく当時ドイツではその方向に沿った調査が一段と盛んになったものと推察される。つまり、われわれは Grebenau の次に 1883 年に Lavale が発表したところ³⁾によって、われわれはその後、再び Oberrhein だけでなく、Main, Donau, Inn, Lech, Salzach という多くの川について砂礫のたい積過程と砂礫堆の移動について詳細な観察が行なわれたことを知る。Lavale はこれらの川についての観察から、砂礫堆の形成は砂礫を流送している川で共通してみられる現象であるとした。Lavale はまた、砂礫堆の形成は幅が一樣でない河川よりも、一樣な河幅をもつ改修された河川において明瞭に生ずる現象である、ということも観察の結果として結論した。さらに、砂礫堆の形成に最も関係の深い水位を考えることができる、として、それに当たるものとして、年間日水位のうちの 182 位の水位または平均水位を hydrotechnischer Wasserstand と名づけて取り上げた。その際 Lavale は、低水の流れは河床形態にあまり大きな変化を及ぼすことはなく、またまれにしか

起こらないような高水の流れも継続時間が短いために、砂礫堆の移動には十分な効果をもたない、としてよいものと考えた。

1894年にハーグで開催された Binnenschiffahrtskongreß で、オランダの Van Hoof は obere und neue Merwede 川を調査した結果を報告している⁴⁾。Van Hoof は 1880 年から 1890 年までの間のこの川の砂礫堆の状態の調査の結果から、同じ岸に沿って規則的に発生する深掘れ (Kolk) に注目して、それらの間隔と深さ、および移動の速さを出した。それを Oberrhein の場合と比較して、Jasmund が次のように示している⁵⁾。

	川幅	Kolk の間隔	深さ	速さ
Obere Merwede	600 m	2,500~3,000 m	8-14 m	300 m/年
Oberrhein	250	2,000	6-11	500

1896 年から 1899 年にかけて、H. Keller は北ドイツの Memel, Pregel, Weichsel, Oder および Elbe の諸河川の砂礫の移動について調査した⁶⁾⁷⁾⁸⁾。特に Weichsel 川は河床が砂でできているために、形態の変化がとらえられやすかった。この Weichsel 川では、140-148 km の地点の間の区間で毎年 1 回詳細な測量が行なわれた。その測量はその後にも継続されていた。この調査の結果、1898 年 9 月と 1901 年 9 月および 1899 年 9 月と 1902 年 9 月のふた組の時点において、それぞれ河床の形態がほぼ一致していることが認められ、この河川区間の形態が 3 年の周期で変化することが明らかにされた。

また H. Keller は Oder 川での観察から、砂礫粒子の運動、したがってまた停止と、水流の蛇行および砂礫堆の形成と前進とが相互に関係する機構を認めた。

その後、E. Faber は直線的に改修された Donau 川について行なわれた観測の結果を 1903 年に発表した⁹⁾。その中で Faber は次のように述べている。《非常に幅の広い、直線あるいは緩やかに曲がった河道では、小出水によって砂礫堆は下流に移動するが、高水時の変化の過程については、現在までまだ十分な観察は行なわれえないし、少なくともこれまでには行なわれていない。しかし、水位の高さや継続時間によって、谷線が伸び、また河床の最深部が多少ならされる、ということは観察の例によって知られている。したがって、低水や中水のときの観察によって、最大の洪水のときにも谷線や砂礫堆が外形をほとんど保ったまま移動する、と仮定することは許されない》。Faber はこのほかにも洪水時における砂礫堆の変形に関して仮説を立てたが、ここでは観察に基づく客観的事実に注目するために、これ以上それには立ち入らない。

当時のオーストリア領内の Donau 川の改修計画については、フランスの Girardon が諮問を受けている。それに答えて Girardon が作った報告書の要点が 1921 年に

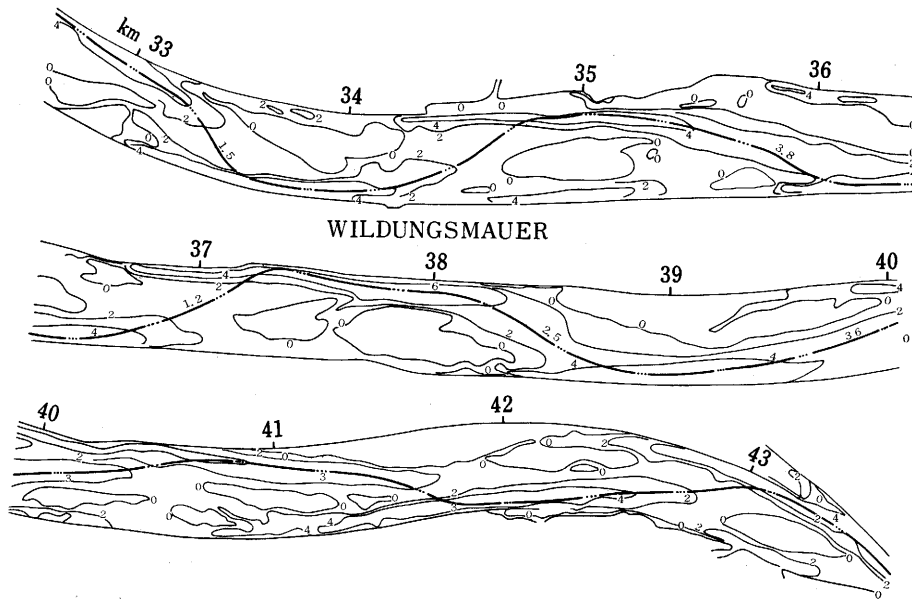


図 2 1905 年における Donau 川の Wildungsmauer のあたりの河床の形態

Cuënot によって紹介されている¹⁰⁾。それによれば、当時フランスの技術者にも砂礫堆の形成と前進、したがってまた蛇行する谷線の形成と移動は常識となっていた、と推察することができる。当時作られた Donau 川の河床形態を示す図を図 2 に示す。Girardon は、ほぼ一定の条件のもとにある河川区間の中に砂礫堆が形成されている場合に、それらの砂礫堆の長さとその分散および深掘れの深さに注目した。Donau 川についてだけでなく、Rhône 川や Loire 川についても、それらのデータが Cuënot によって紹介されている。

フランスでは、Girardon より前に、この問題に注目していたのは Fargue であった。Fargue は 19 世紀の終わりに約 30 年間 Garonne 川の下流部の航路維持に関連して、河道形態について研究していた。その結果は 1868 年以來数回発表されているが、最後に 1908 年に単行書にまとめて発表されている¹¹⁾。Fargue はドイツ人と同様に、幅の広い直線的な河川区間に砂礫堆が規則的に形成され、それが前進することを知っていた。また、河道が適当に蛇行していれば、砂礫堆の前進が止まることも知っていた。そして、Fargue は航路の維持を研究の主題としていたから、砂礫堆の前進を止めるのに効果的な河道の平面形を追求して、直線的な河道の中の砂礫堆についてはほとんど立ち入らなかった。

3. 河川の模型による実験的研究

砂礫堆の形成に注目しながら、河川の力学的現象を模型によって、実験的に研究した最初の人、おそらく Engels であろう。Engels が Elbe 川の 520.5km-522.5 km の直線河道について行なった実験的研究の結果が、

1900 年に発表されている¹²⁾。1894 年から 1899 年までの間のこの区間の谷線の状態を図 3 に複製して示す。それによれば谷線とともに形成された砂礫堆は毎年 300 ないし 500 m 前進している。それらの砂礫堆が両側に沿って交互に形成されるものとして、それらの前進について同じ岸に沿って移動するものか、一方の岸から他方の岸へと移動するものかについて意見が分かれていた。しかし、Engels の実験によって、砂礫堆は一方の岸から次の岸へと移行するものである、ということが明らかになったとされる。砂礫堆の前進に関して、Engels は着色砂を使って、砂礫粒子の運動経路の追跡も行なっている。

なお、Engels はこれらの実験を行なうのに当たって、模型の河床材料に天然の砂を用い、模型は必ずませたものとした。そして、模型と原型との間の相似性の判定には次の関係を用いた。

$$J_m = \frac{t}{t_m} \cdot \frac{d_m}{d} \cdot J$$

ただし、 J は水面こう配、 t は水深、 d は河床材料の平均粒径であり、添字 m は模型に対するものである。

4. Engels によるそれまでの研究結果の総括

20 世紀の初頭までに、上記のように、多くの人によって砂礫堆についてかなり多くの観察が行なわれ、また最後には砂礫堆の形成の現象に焦点を合わせて、模型による河川の実験的研究が Engels によって行なわれるに至っていた。Engels はそれらの研究の結果を総合して、1905 年に発表した論文¹³⁾の中で次のように述べている。

- 1) 直線的あるいは緩やかに曲がった河川区間で、横

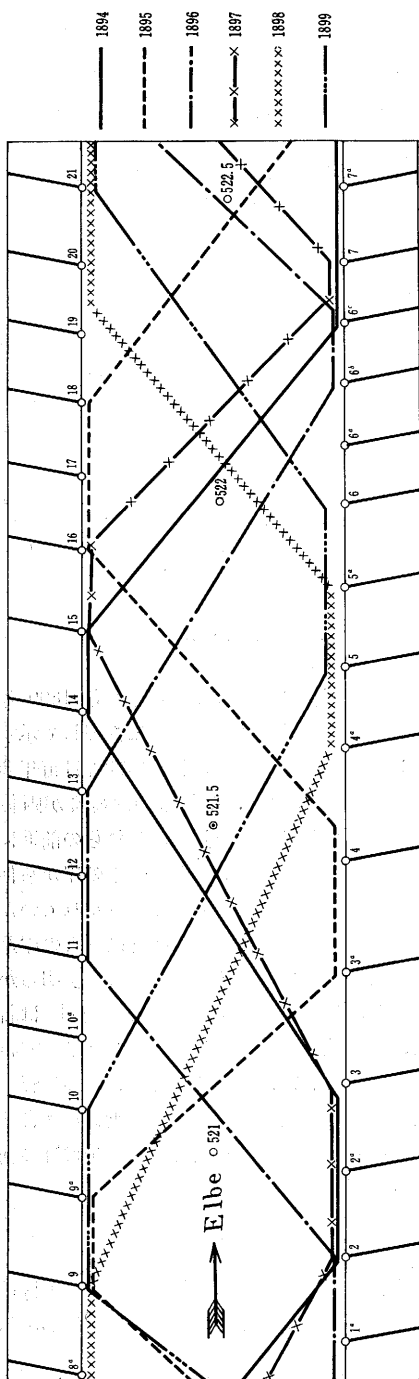


図 3 Elbe 川の 1894 年から 1899 年までの谷線の状態

断面積が中水や低水の流ればかりでなく高水の流れに対しても十分である場合に、低水のとくにいわゆる砂礫堆が形成される。そして、それは砂礫を輸送する水路に共通のことである。

2) Grebenau は砂礫堆の発生を、土砂を流送する支流の流入と関係づけたが、Lavale によれば、1) に述べた事情がある限り、この前提条件は必要でない。

3) 砂礫堆は右岸と左岸とに沿って交互に形成され、

その際砂礫堆は岸に密着することもあり、また砂礫堆と岸との間に狭い水路ができることもある。その場合、それと反対の側ができる水路の方が深い。

4) 砂礫堆は前縁によって、次の砂礫堆と接続している。(ここにいう《前縁》は木下博士によるが、それを当時ドイツでは der Rücken des Überschlages と呼んだ)。

5) この前縁の形成については、信頼すべき情報は得られていないばかりでなく、相互に矛盾する情報を得ている。すなわち、Grebenau によれば、Oberrhein の砂礫堆は、谷線が流路を横切ることなしに前進し、Oder 川では直線流路においてもこの種の谷線が存在し、さらに Faber は蛇行する谷線のことを語っている。

6) 砂礫堆は、ひとつの洪水の後には別の位置に形成されていて、ふたつの砂礫堆の間をうねって通る谷線が下流に平行移動した形になる。

7) 高水の最中における砂礫堆の移動については、これまでは信頼の置ける観察は行なわれていない。ことに、河床が高水のとくにも低水のとくにも大局的には同じ形を保っているのか、どうかという点について信頼するにたる知識が得られていない。

8) 土砂を流送する支流が流入する合流点のすぐ下流に、常に同じ場所に洲が形成される場合には、ある種の条件のもとでは、それが、直線的あるいは緩やかに曲がった河道の中においても、そのようなふたつの支流の合流点の間で常に同じ位置に砂礫堆を形成させるようにする。このような場合には、その区間に低水谷線がかなりはっきりとできる。

9) 谷線が固定することによって、一種の保護被覆ができやすくなり、砂礫の運動がおさえられる。

10) 固定した谷線の中の瀬の部分の低水水深は、移動する谷線の中の瀬の部分の低水水深よりも常に深い。

11) 直線区間の河床の幅をせばめて、その区間から砂礫堆を完全に消滅させることは可能である。しかし、その場合は、その区間の上流端の河床が洗い流され、下流端の河床が上昇する結果、こう配が次第に緩やかになるために、前よりも事情が悪くなる、ということが伴わさる。

5. 実験室における砂礫堆の研究

Engels は上記のように問題を整理した結果、河川の直線区間において河床の形成されるときに現象を一層深く探究すべきである、と考えた。また、その際に特に洪水時における河床のところの現象の観察が必要になってくるし、その観察に対しては打ち勝ちたい障害が立ち向かっていることを思って、Engels は Dresden の河川工学実験所の中で小規模の実験を行なう道を選んだ。

その実験は、1904 年 10 月から 1905 年 4 月までの間行なわれたが、この種の実験ではおそらくこれが初めての

ものであろう。もっとも Engels はそれより少し前にも、橋脚が河床に及ぼす影響を実験的に研究して、そのときすでに砂礫堆を観察したことがあり、これを再現するため平たんに敷きならされた水路床に橋脚をたて、図4に見られるとおり、実験室の中で砂礫堆を発生させている。この実験の中で、砂礫堆のほかに河床一面にうろこ状の小さい堆積体ができ、それらが全体として網状をなして河床面をおおうことを見いだした。それは図4に見られるが、Engels はさらに詳しく図5によってそれを示し、またその小さい堆積体を《Sandzunge》と呼んだ。

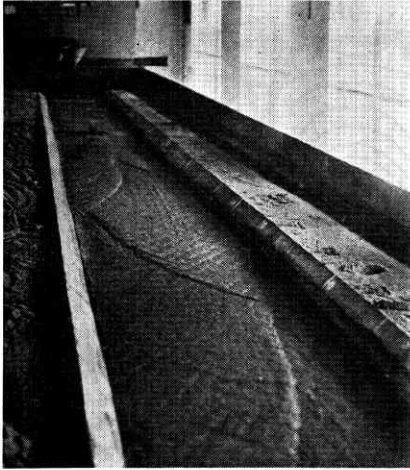


図 4

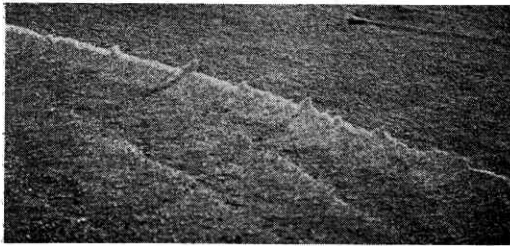


図 5

Engels はこのような河床形態が、橋脚がなくても形成されることを実験で示した。その結果の一部が図6~7で見られる。また、Engels は実験水路の中に形成されたこのような河床形態が現実の河川に見られるものと同一の種類のものであると考えて、典型的な例として図8のように砂礫堆の前縁を鎖線で示して、図4の写真に見られる前縁などと対比させた。

Engels はこの実験の結果を次のように要約した。

- ① 可動床の河川の直線区間で、両側が固定されているとき、洪水の流れが兩岸の間を岸と同じ方向に流れるときには、砂礫もその方向に移動する。
- ② こう配が急なところで、川幅が流量と比べて著しく大きくなるように流れができていている場合には、そこを流れるときに、砂礫を流送する支流がなくても、

斜めに張り出した形の砂礫堆が左右の兩岸から交互に発生する。

- ③ 砂礫堆の前縁の斜面に沿っては、流路を横切った砂礫の輸送が少量ではあるが行なわれる。
- ④ 減水時の流れがこの斜面に垂直に低水路を作るように洗掘を行なう。しかし、その個所では低水路の深さは最も浅い。
- ⑤ 砂礫堆は洪水の度ごとに下流に移動するが、それと同時に低水路のこの部分は埋め戻され、減水時に常に少し下流に新たに低水路のこの部分が洗掘によ

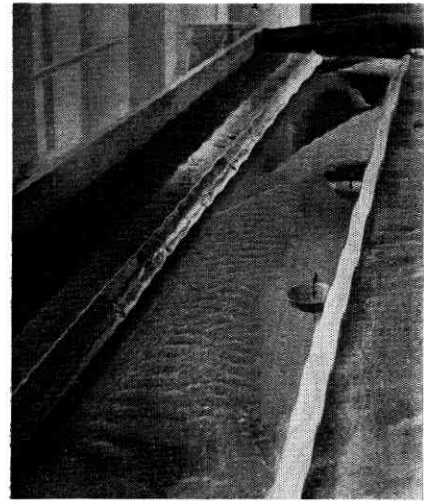


図 6

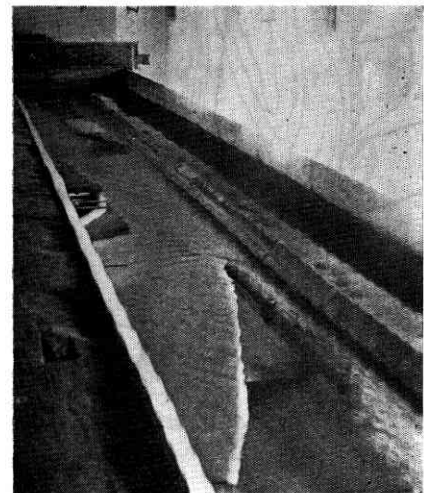


図 7

って作られる。

- ⑥ 上流からの砂礫の供給が減るか、川幅がせばまるかすると、砂礫堆も、低水谷線の断続性も消滅する。これらいずれの場合にも、その区間のこう配の緩和が起こる。

Engels よりも少し後に Blasius も砂礫堆を実験室内

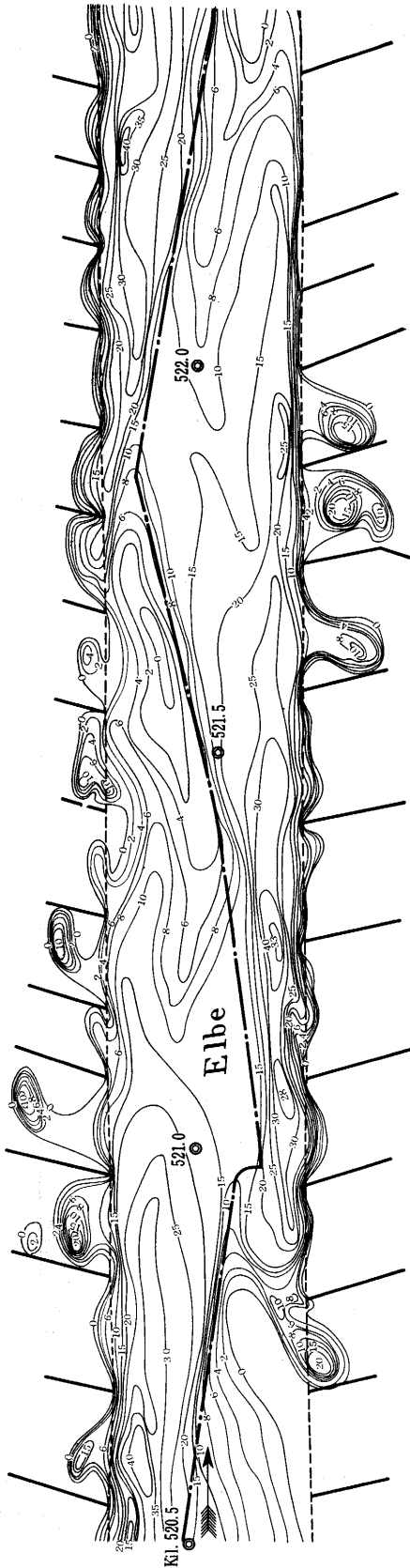


図 8 1898 年における Elbe 川の河床の形態

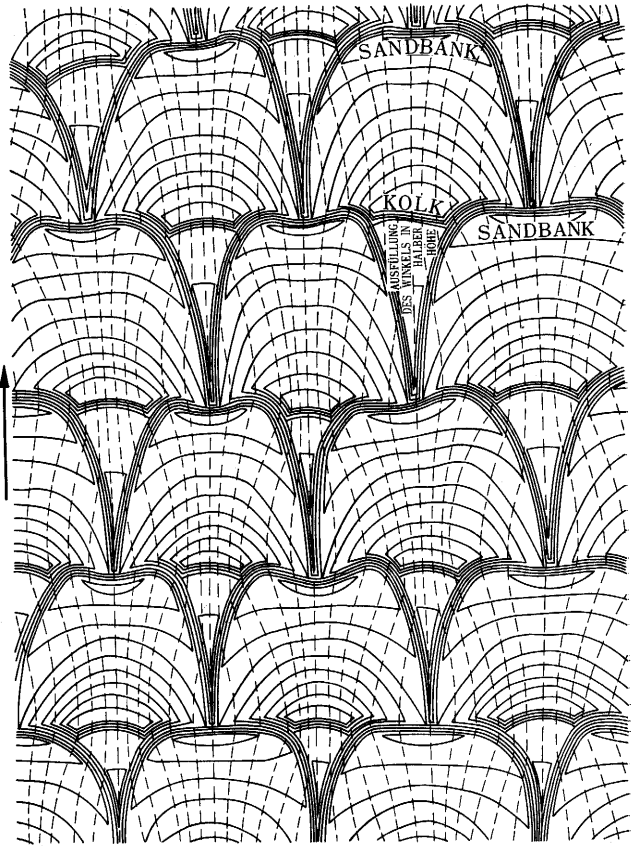


図 9 Blasius による ripples の形態

の水路によって再現させた¹⁴⁾。Blasius は砂礫堆と ripples との間の関連性に注目した。図 9 はその実験で作られた ripples の形態を等高線で表わしたものである。この図の中で点線によって Blasius は ripples の上の流れの流線を示した。そして、Blasius は Engels によって指摘された砂礫堆の形成に関する現象は、図 9 の中で流線がほぼ直進している細長い部分に対応するものであろう、とした。

以上見てきたように、河床形態に関する研究は、19世紀の末から 20 世紀の初めにかけて、現実の川についての観察および実験的な方法のふたつの面から盛んに行なわれていた。その結果導き出された仮説は今日の知識からしてもほとんど異論のないものであろう。しかし、当時はこれらの仮説の正当性を理論的に強める点でまだ力が十分でなかった。そこで、その後しばらくの間、実験室内において限界掃流力や土砂流量に関する研究、およびそれに関連して ripple, dune などの研究が行なわれるようになったのであろう。それらの点および近年に至っての河床形態に関する研究の過程については別の機会に跡をたどりたいと思う。この研究の一部には文部省科学研究費の援助を得ていることを感謝と共に付記する。(1966年11月10日受理)

文 献

1) K. Spieß: Die Regulierung des Rheins zwischen Straßburg und Basel, Deutsche Wasserwirtschaft, Nr. 3, pp.57 /67. (1925).

- 2) H. Grebenau: Der Rhein vor und nach seiner Regulierung auf der Strecke von der elsässisch-bayerischen Grenze bis Germersheim, Dürkheim a. d. H. (1870).
- 3) Georg Lavale: Unsere natürlichen Wasserläufe, Weilheim, (1883).
- 4) Binnenschiffahrts-Kongreß im Haag (1894).
- 5) R. Jasmund: Fließende Gewässer, Handbuch der Ingenieurwissenschaften, 3. Teil, 2. Kapitel, 4. Au-fl., Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig, (1911).
- 6) H. Keller: Memel-, Pregele- und Weichselstrom, Berlin, (1899).
- 7) H. Keller: Der Oderstrom, Berlin, (1896).
- 8) H. Keller: Der Elbstrom, Berlin, (1898).
- 9) E. Faber: Studien über die Verbesserung der Schifffbarkeit der Donau von Kelheim bis Ulm, Berlin Grunewald, (1903).
- 10) G. Cuënot: Fleuves et rivières, Dunod, Paris, (1921).
- 11) L. Fargue: La forme du lit des rivières à fond mobile, Gauthier-Villars, Paris, (1908).
- 12) H. Engels: Das Flußbau-Laboratorium der Königlichen Technischen Hochschule in Dresden, Zeitschrift für Bauwesen, (1900).
- 13) H. Engels: Untersuchungen über die Bettausbildung gerader oder schwach gekrümmter Flußstrecken mit beweglicher Sohle, Zeitschrift für Bauwesen, (1905).
- 14) H. Blasius: Über die Abhängigkeit der Formen der Riffeln und Geschiebebänke vom Gefälle, Zeitschrift für Bauwesen, (1910).

次 号 予 告
(2 月 号)

研 究 解 説

TiO ₂ 電子写真感光層の感光機構と色素増感について.....	飯 田 武 揚 野 崎 弘
クリープにおける結晶粒界のすべりと粒界孔の発生.....	石 田 洋 一
繊維に対するシリコンの放射線グラフト反応.....	清 水 治 通
変位およびひずみの測定におけるモワレ法について.....	川 股 重 也

研 究 速 報

極低圧における窒素と一酸化炭素のパイレックスガラス表面への吸着.....	辻 藤 恒 成 斎 藤 恒 成
ビニル化合物のエネルギー準位と電極における反応性.....	浅 原 照 三 妹 尾 学 満 土 屋 満

東 京 大 学 生 産 技 術 研 究 所 報 告 刊 行

第 17 卷 第 2 号 朝 倉 利 光 著

**EFFECT OF AMPLITUDE FILTERS ON THE
DIFFRACTION IMAGE AND THE MARÉCHAL'S
ABERRATION TOLERANCE CONDITIONS**

振 幅 フィルタ と 収 差 の 許 容 量

回折に伴う像の劣化を改良するための振幅フィルタの効果を求め、次いで収差量とフィルタの関係を追求したものである。まず、解析および製作が容易なものとして $T(s) = as^2 + \left(1 - \frac{a}{2}\right)$ という振幅フィルタを提案し、これを用いたときの回折像を研究し、このフィルタによる像改良の評価を encircled energy のレスポンス関数および 3 次元的回折像の強度分布を求めることで行なった。また、微小収差と振幅フィルタの関係を Maréchal の収差許容条件をパラメータとして求め、像改良のための最良の振幅フィルタを研究した。

(1966 年 12 月発行)