

都江堰の構造について（補遺）

木下晴一

1.はじめに

前号において、中華人民共和国に所在する都江堰と呼ばれる著名な水利施設の構造を検討した⁽¹⁾。主たる主張は、都江堰の主要な構造物の一つである「飛沙堰」が、わが国に数多く存在する「わん曲斜め堰」と呼ばれる井堰と同じものであるという点である。しかし、国内での検討のように空中写真や大縮尺の地形図を簡便に利用できない現状で、このことをより確かなものとするために、人工衛星画像などによる検討の必要性を感じていたが、前号では果たすことができなかった。

その後、好条件下では分解能2mと高い解像度をもち、一部の写真是立体視も可能な、アメリカ軍事偵察衛星写真の一部が個人でも入手できることを知った。そこで、都江堰付近の写真を試しに購入し、その有用性について検討を行った。小稿は、まだ中間報告の段階であるが、前号の検討を補足するとともに、前号では省略した砂礫堆に関する説明も補足するものである。

2.アメリカ軍事偵察衛星について

1995年、アメリカ合衆国大統領クリントンは、1960～1972年までに軍事偵察衛星が収集した衛星写真を軍事機密から解除し、86万枚の写真をUSGS(アメリカ地質調査所)に移管すると同時に公開した。その後、2002年には、1963～1980年までの衛星写真5万枚を追加公開している。これらの衛星写真是、インターネットWebサイトによって検索することができ、USGSを通じて一般でも購入することができる⁽²⁾。

今回購入した写真是、1965年に都江堰付近を撮影したもの4枚(1965年8月22日撮影DS1023-1069DA101、DA102、DS1023-1069DF095、DF096)と広西チワン族自治区に所在する靈渠を検討するために購入した1973年撮影の2枚(1973年12月19日撮影DZB1207-500093L002001、L003001)の合計6枚の写真である⁽³⁾。

都江堰付近のものは、KH-4A(コロナ)が撮影したものである。通常のカメラと違って、フィルムは2.25×30インチ(5.5×75.7cm)と著しく横長のパノラマタイプで、原板での縮尺はおよそ30万5千分の1である。靈渠周辺のものは、KH-9(ヘキサゴン)が撮影したもので、フィルムは9×18インチ(23×46cm)。この写真的原板の縮尺はおよそ52万2千分の1である。

まず、購入した写真を、肉眼やルーペによって観察するとともに、スキャナによってコンピューターに取り込んだ。次に、KH-4Aのパノラマ画像はレンズを中心とした中心投影であり端にいくほど歪むため、画像処理ソフト(Adobe Photoshop6.0)上で、地図画像と重ね合わせることによって、簡単な幾何補正を行ない⁽⁴⁾、画像の明るさやコントラストを調整したうえで、拡大出力して判読を行った。しかし、スキャナ読み込みの解像度をどのくらいにするのが効率的かなど、筆者の経験や知識の不足のほか、所有するパーソナルコンピューターの性能の関係で、満足のいく処理を成し得なかつたところがある。また、靈渠周辺の写真については、ポジフィルムの材質のためか透過ユニットでの読み込みがうまくいかないことや写真が小縮尺であること、フィルム上の小さな傷などが原因で、判読可能な縮尺にまで拡大

することができず、今回の検討には利用できなかった。

3. 都江堰付近の状況

最初に、広域の画像を観察する。写真1は、Webサイト上のプレビュー画面（ブラウザ）を合成して作製したものである。東北から西南方向に山脈が拡がり、この山中から多くの河川が流出している。北から石亭河、湔江、岷江、文井江などである。これらの河川は山麓に扇状地を形成し、最大規模の岷江の扇状地で半径約100km、平均傾斜3‰ほどの規模である。この扇状地の扇端付近に四川省の省都成都が所在する⁽⁵⁾。

都江堰は、岷江が山脈から扇状地に出る扇頂に構築されている（写真2）。山中での岷江は、ところどころに寄州（ポイントバー）を発達させて流下し、左支川白沙河が合流する付近からは谷幅も広くなり、白色に写る河川敷が目立つようになる。都江堰より下流では急激に河幅が広がり、水流は網状流（後述）

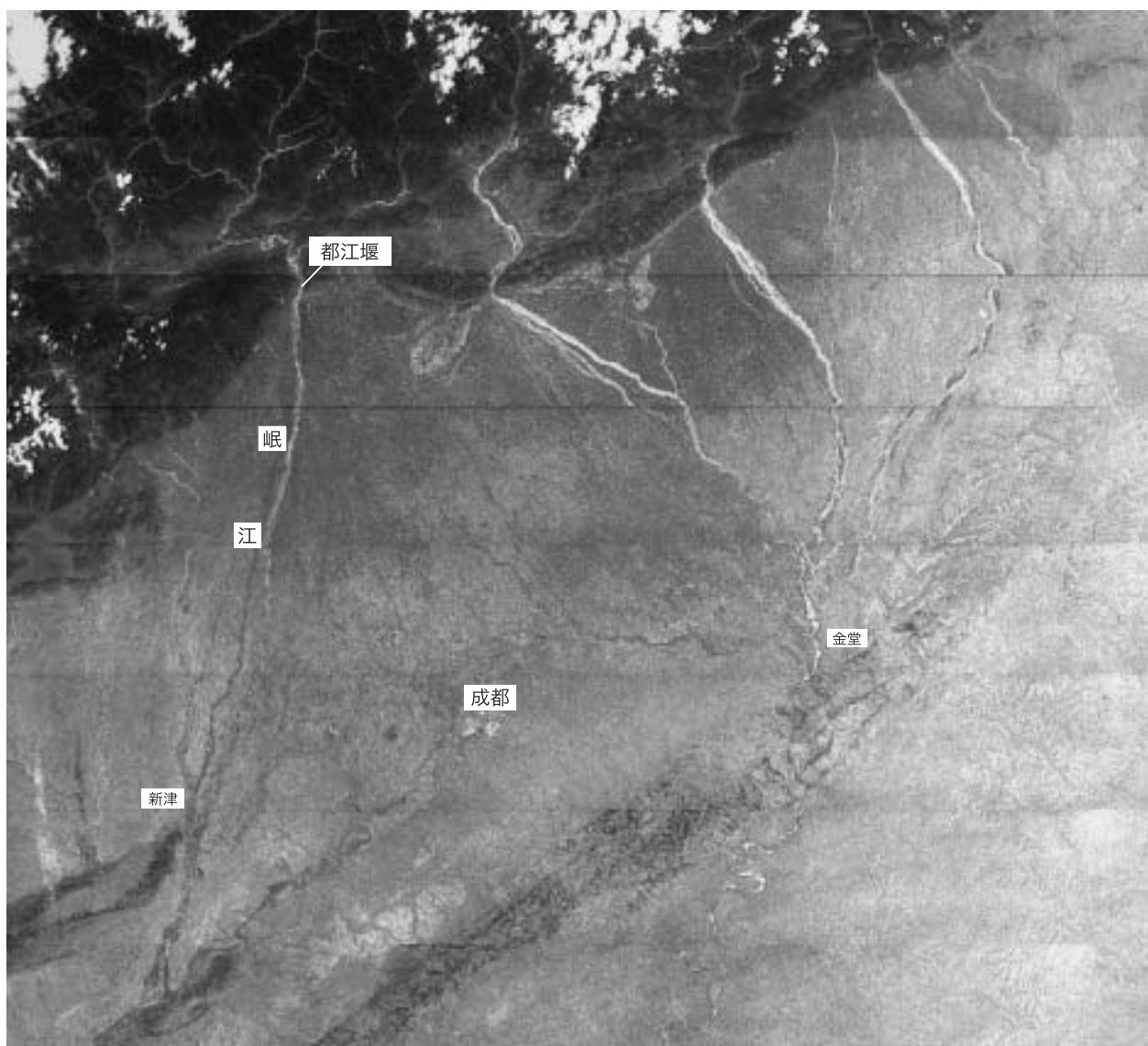


写真1 都江堰付近のコロナ衛星写真モザイク画像（都江堰、成都間がおよそ60km）
(DS1023-1069DA100 ~ DS1023-1069DA107)
(写真：U.S.Geological Survey, EROS Data Center, Sioux Falls SD, USA.)

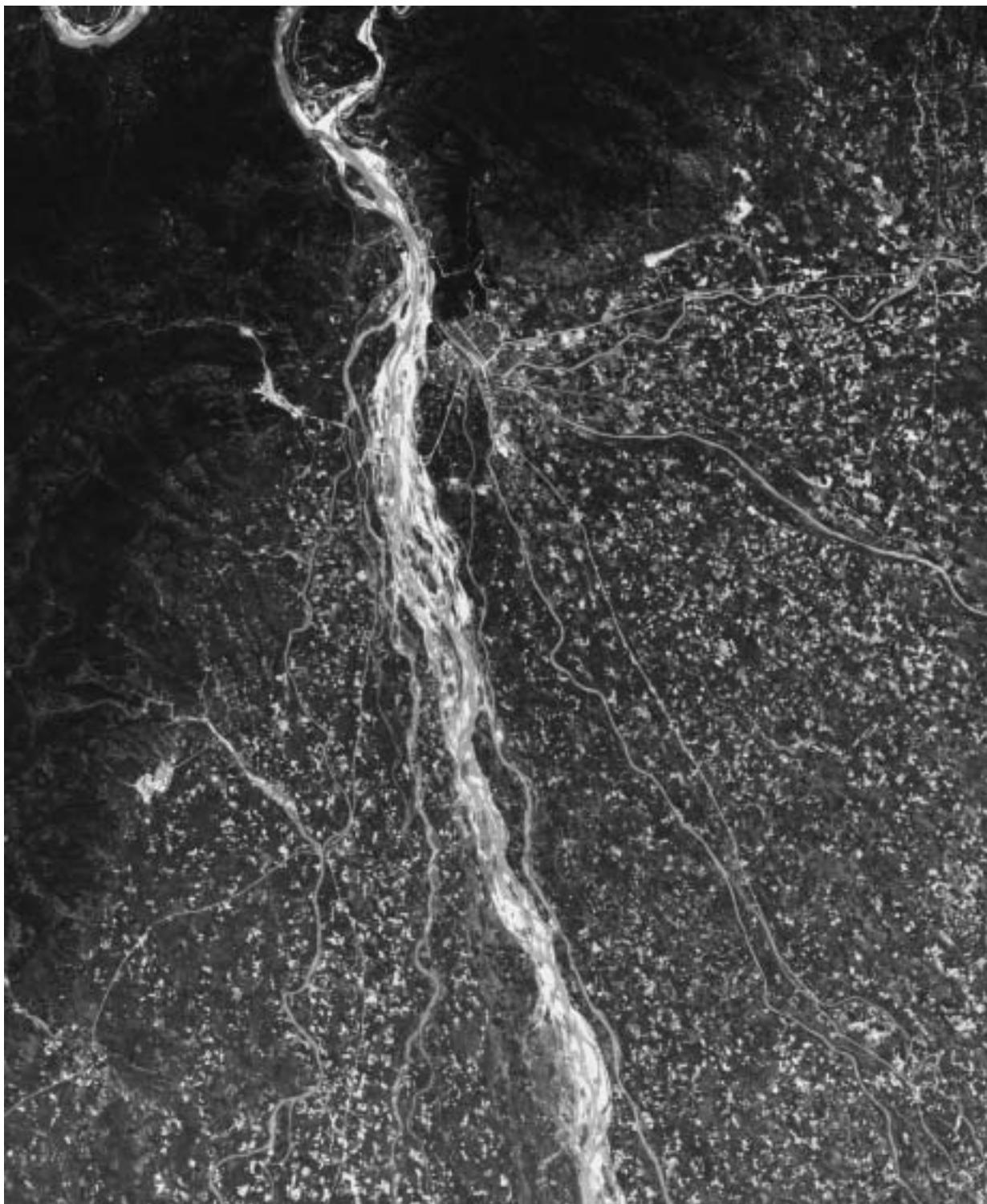


写真2 都江堰付近のコロナ衛星写真（1）
(DS1023-1069DF096 1965/08/22撮影 未補正)
(写真 : U.S.Geological Survey, EROS Data Center, Sioux Falls SD, USA.)

となる。河道は巨視的に直線状であることからも典型的な扇状地河川の様相を示している⁽⁶⁾。

扇状地上の土地利用を見ると、市街地を除く地域では4種類ほどの濃淡差のある地目がパッチワーク状に乱雑に拡がっている。最も濃い色調の部分は叢林で内部に家屋が認められる。明るい部分は畠、そ



写真3 都江堰付近のコロナ衛星写真(2)(DS1023-1069DF096 1965/08/22撮影 簡易補正済み)
(写真: U.S.Geological Survey, EROS Data Center, Sioux Falls SD, USA.)

れ以外は水田であると思われる。このように散村状に家屋が点在し、周囲に畠や水田が拡がるパターンが扇状地全体にほぼ均質に拡がることなどから、岷江の扇状地は顕著な段丘が形成されていない現成の扇状地であると推定される。

次に都江堰の構造物について観察する。写真3は、都江堰付近の拡大写真である。1964年の洪水被害によって廃止された「平水槽」が認められるほか、都江魚嘴の形状も現在とは大きく異なっているなど、往時の状況を伝えるという点でも貴重な写真である。

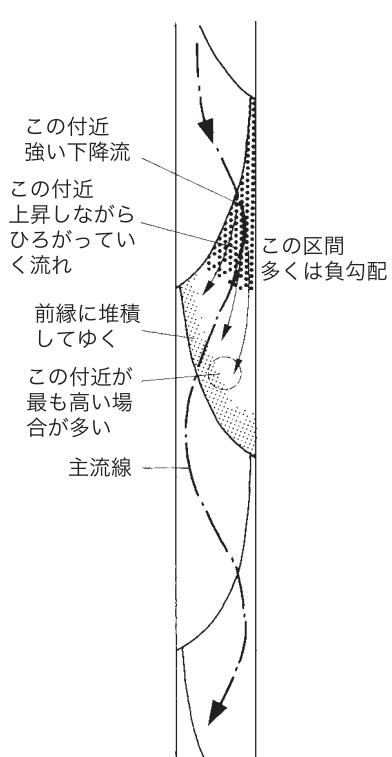
都江魚嘴は、岷江の流水を外江と内江に二分する目的で、流心線に平行する方向に鋭角に突き出す構築物である。前号では飛沙堰の役割を重視したためにあまり触れなかったが、都江堰の主要な構造物の一つである。ここから下流方向には金剛堤と呼ばれる堤防で構築した、三日月状の平面形の人工中州がある。これは、内江側に州が付着していることや、上下流にも類似する規模の中州が見えることから、自然に形成されていた中州を堅固にしたものと考えられる。金剛堤と離堆の間の内江を塞いでいるのが飛沙堰である。写真では、その構造までは観察できない。

4. 砂礫堆とわん曲斜め堰

(1) 砂礫堆について

写真4は、幅50cmほどの水路に砂を平坦に敷き均し、浅い水深でも充分に砂が動かされる程度の勾配を与える通水する実験をおこなったときのものである⁽⁷⁾。床面の砂粒が一面に流下する中に、いつのまにか微小な高さをもち交錯する斜め方向の段が水路床のいたる所にあらわれる。それは徐々に高さを増して明瞭な段を形成し、水流もこの段によって規則的な蛇行を継続するようになる。そして、この段は徐々に下流側に移動していく。このような左右交互の向きをもって下流側に弓状に張り出した砂州の一つの単位が、河床形態の基本的な単位で、砂礫堆と呼ばれている。

次に、実際の河川における砂礫堆の状況を説明する。写真5・第2図は、和歌山県の紀ノ川の空中写真である⁽⁸⁾。明るい灰色に写る河川敷（堤外地）の幅一杯に、暗い灰色に写る水流がほぼ等間隔で左右に蛇行して流れている。水深の深いところは暗色に、浅いところは淡色に写るから、この蛇行する流れは、幅が狭く水深の深い流れから幅広の浅い流れに変わり、再び幅が狭く深い流れになることを繰り返していることがわかる。紀ノ川の空中写真は低水時の流れを撮影したものであるが、年に数回程度おこる増水時には水流が河道幅一杯に流れるようになる。この時、水流の集中と拡散が生じ、流れ



第1図
砂礫堆の模式図
(注(7) 文献より引用)

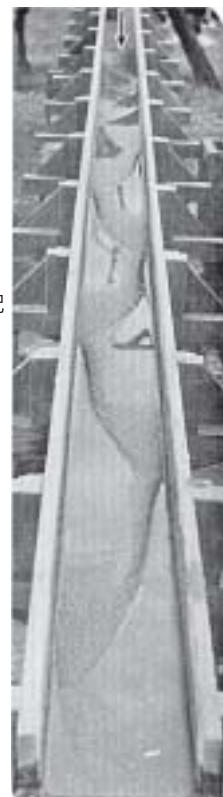
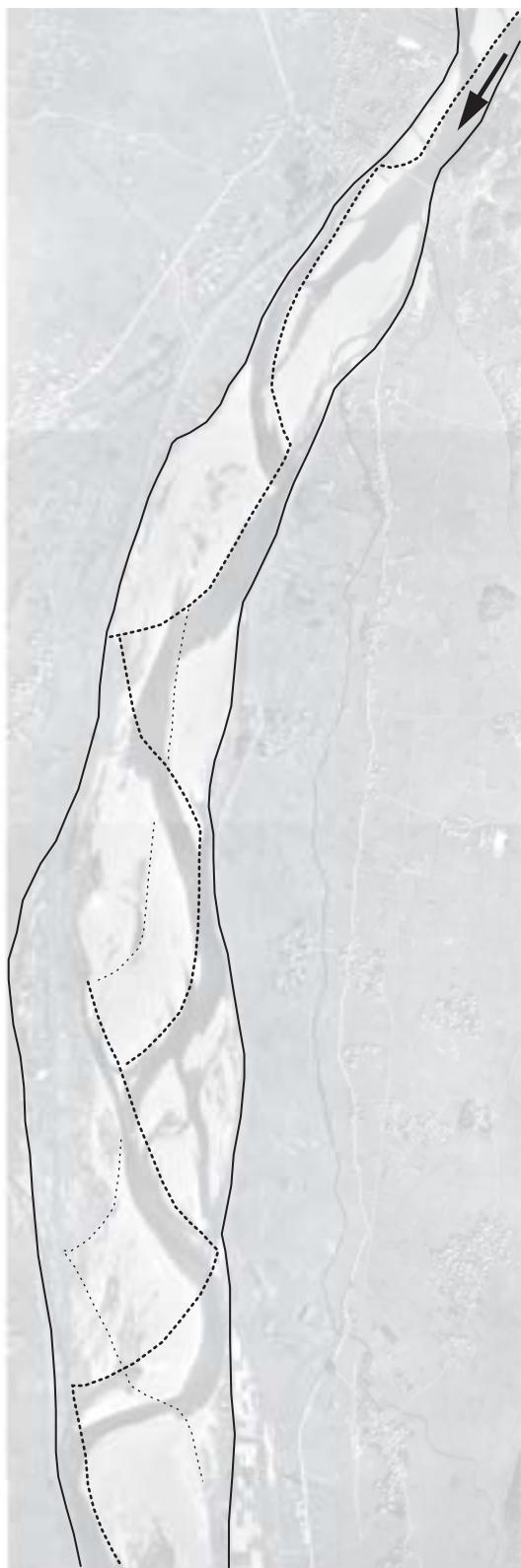


写真4
直線実験水路に
形成された砂礫堆
(注(7) 文献より引用)



写真5 紀ノ川(和歌山県)
空中写真
(アメリカ空軍昭和22年撮影)

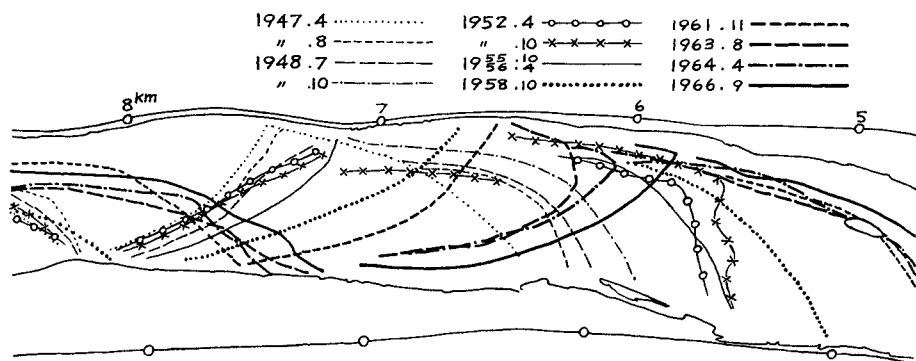


----- 砂礫堆前縁
----- 副次的な砂礫堆前縁

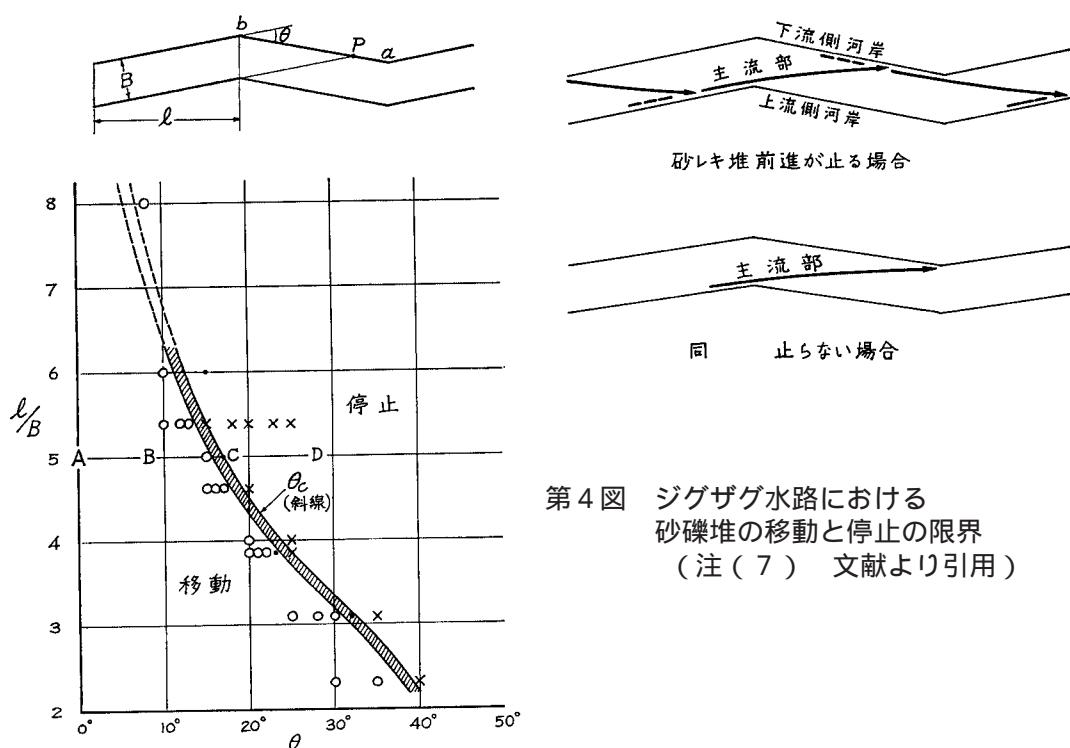
第2図 砂礫堆の形成状況

が集中するところから砂礫が運び出され、流れが拡散するところに砂礫が堆積していく現象が生じることによって砂礫堆が形成される。そして、それは下流側に徐々に前進していく。水流が減ると砂礫堆の形状に規制されて、写真5のような流れになるのである。これは先述の水路実験の様子と同じである。なお、様々な流量の洪水が発生することから、副次的な砂礫堆が形成され、自然河川は実験水路よりも複雑な様相を呈するのが一般的である。

砂礫堆は、徐々に前進していく性質がある。第3図は、新潟県の阿賀野川河口付近における砂礫堆の前進の状況を図示したものである。1947年から1958年の間に、砂礫堆の前縁は図のように800mほど前進していることがわかる。しかし、一方で砂礫堆の位置が安定する場合もある。これは河道の蛇行の状況と関係があり、急流、緩流にかかわらず、主流部が添いやすい側の河岸の延長線が、その下流側の対岸の突端より若干上流側に当たる河道になると砂礫堆の位置が安定することが明らかになっている。第4図は、実験によって確かめられた砂礫堆の前進が止められる蛇行角のラインである。川幅をB、砂礫



第3図 阿賀野川における砂礫堆の前進状況
(注(7) 文献より引用)



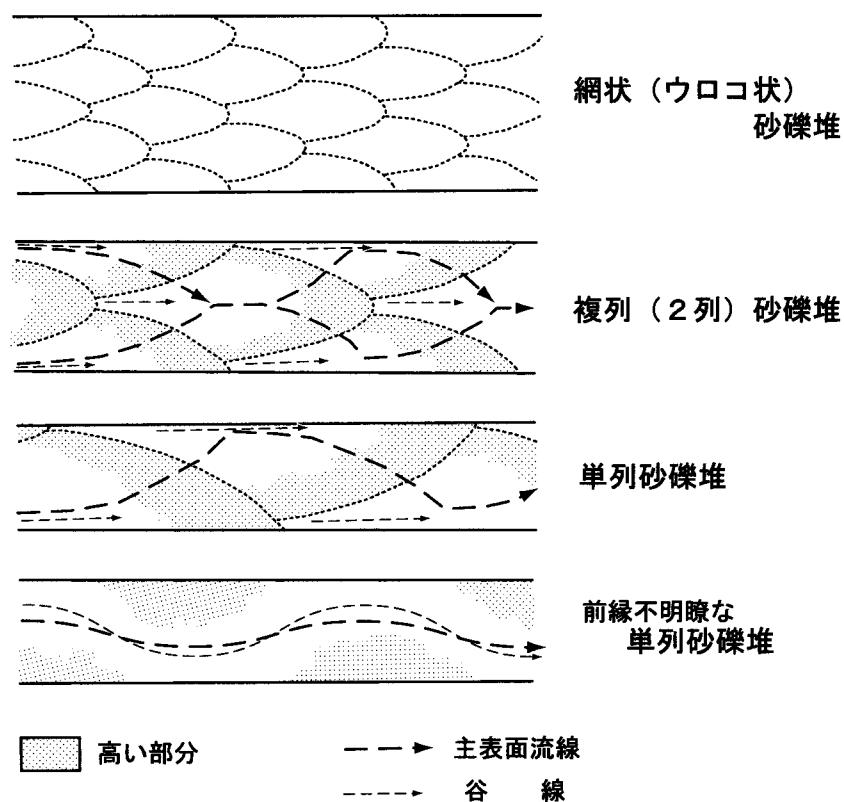
第4図 ジグザグ水路における
砂礫堆の移動と停止の限界
(注(7) 文献より引用)

堆のひとつの波長を ℓ とし、 ℓ / B を縦軸に、蛇行角 λ を横軸に、実験によって得られたジクザグ水路における砂礫堆の移動(+)停止(×)を示したものである。つまり、河道が何らかの原因で固定され、上記のような条件であったならば、砂礫自体は上流から下流へ移動していくものの、砂礫堆の位置は安定するのである。

写真 6 は、これまで解説してきた実験水路よりも水路幅を広くした場合の実験写真である。ここでは写真 4 の片方の岸を中心に左右対称に折り返した形に砂礫堆が形成される。さらに水路幅が広くなると、魚のウロコのような平面形の砂礫堆が形成される。写真 4 を単列砂礫堆、写真 6 を複列(2列)砂礫堆、最後のものは網状(ウロコ状)砂礫堆と呼ぶ。これらの形成条件は、平均水深 D_0 、川幅 B としたときに B / D_0 が 10 から 40 のときには単列砂礫堆、40 から 100 の間は単列、複列のどちらにでもなり得る領域、100 以上が複列もしくは網状(ウロコ状)砂礫堆が形成されるとされている。



写真 6 実験水路に形成された複列砂礫堆
(注(7) 文献より引用)



第5図 砂礫堆のタイプ

このように水深にたいして川幅が一定以上に広くなると複列や網状の砂礫堆が形成される。河岸が粗粒の堆積物からなる河川においては、水流は河床を浸食するのではなく、河岸を浸食する傾向がある。つまり、川幅が広くなる。一方、河岸が粘土など細粒の堆積物からなる場合は、河岸の浸食よりも河床の浸食が起こる傾向があることから、扇状地など粗粒堆積物からなるところでは、複列や網状の砂礫堆が発達する。わが国の平野の大多数を占める沖積平野は、通常は扇状地地帯、自然堤防地帯（中間地帯）、三角州地帯に3大別されるが、三角州地帯においては、相対的に堆積物は細粒となり、河道は狭く深くなり、河道の遷移もあまり見られなくなる。一方、自然堤防地帯においては、単列砂礫堆が発達することが多く、蛇行によって（河岸堆積と河岸浸食によって）河道が遷移する現象が頻繁に見られる。

(2) わん曲斜め堰

単列砂礫堆の形成される河道の低水時の状況は、川幅が広く水深の浅い流れと狭く深い流れが左右両岸に蛇行しながら交互に現れる。浅いところは「瀬」、深いところは「淵」と呼ばれることが多い。「瀬」は水流を指す場合もあるが、井堰の構築地点、渡渉地点、架橋地点などのほか、河川に関わる人々の生業に最も密接な場であった。時代は下るが近世の地方書の記載などにも、井堰の立地点として瀬を選択すべきことを説いているものがある。例えば『豊年税書』は貞享2年（1685）頃の著作と見られ、著者不明のものであるが、この中の「堰用水水上様の事」に「堰口は川の廣き所よし、狭き所は大水の時ほれて深く成、水乗りがたき事も有べし、廣所は又瀬の替る事も可有之、能々可考之、（後略）」（堰の位置は川幅に広いところ（瀬）が良い。狭いところ（淵）は大水の時に掘れて深くなり、水路に水の乗り難い時があるためである。また、広いところ（瀬）は瀬が動くことがあるから、（位置の選択）はよく考えねばならない。）という記述である⁽⁹⁾。

以上のように、瀬つまり砂礫堆の前縁の高まりに井堰を構築すると、下流側にわん曲しながら河道を斜めに横断する平面形の井堰（わん曲斜め堰）になり、施工が容易であるとともに洪水に対して最も抵抗力があるなど多くの利点をもったものとなる⁽¹⁰⁾。さらに、それが移動の抑制された砂礫堆上に構築されると、洪水による損壊と改修を繰り返しながらも、長期にわたり井堰を起点とする灌漑網が維持されることになる。

5. 都江堰の構造について

砂礫堆の知識を前提に、再びアメリカ軍事偵察衛星写真により都江堰の構造を検討する。写真2で見たように、都江堰より下流での岷江は河幅が広がり、水流が無秩序に乱れている。ここでは巨視的には扇状地河川に見られる網状（ウロコ状）砂礫堆が形成されていると判断できる。なお、岷江の洪水が様々な流量で発生することから、砂礫堆の形成も複雑となり、実験水路のような単純な把握は難しい。

これに対し、都江堰付近では水流は



写真7 「瀬」（砂礫堆前縁）（兵庫県揖保川）

一本で、上流側に一ヶ所、下流側に二ヶ所の中州が見られる。写真3では、それぞれの中州のすぐ上流の水流が暗色に写っており、ここが深くなっているものと考えられる。また、中州中央付近の水流も暗色に写るところがある。このような状況が、この写真撮影時の様相なのか、長期に同じような様相であるのかは、異なる年代の状況を比較する必要があるが、ここでは複列の砂礫堆が形成されているようである。推定される砂礫堆の形成状況と都江堰の構造を模式的に示すと第6図のようになる。

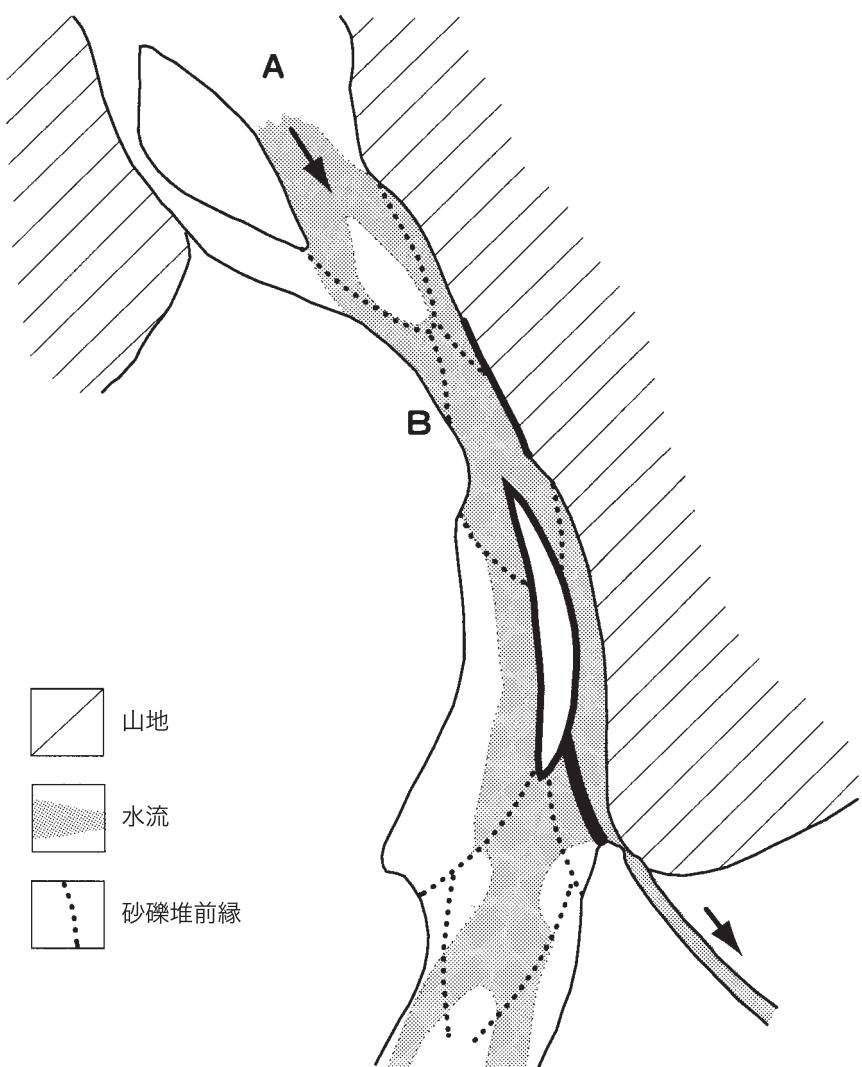
つまり、川の流れに注目すると、左支川白沙河が合流することによって収束した流れが、大きく拡散し（第6図A地点）再び収束した（B地点）後、次に拡散する地点に都江魚嘴を構築し、岷江を外江と内江の二つの流れに分けている。なお、B地点にある百丈堤と呼ばれる堤防は、収束する流れを固定する目的が考えられる。次に、もともと砂礫堆によって二つの水流に分かれる傾向のある地点の中州もししくは浅瀬を、左岸の山裾の形状に合わせて固定する（金剛堤）。その目的は、増水時には内江の流量を減らし、渴水時には流量を確保するとともに、内江の河道を固定することにある。次に、砂礫堆前縁の高まりを利用して井堰（飛沙堰）を構築し取水する。砂礫堆は移動が抑制される位置にあるが、金剛堤で河道を固定することによって、より確実なものとしている。金剛堤の延長が800m近くあるのは、このことにも関係するのであろう。このように人為的に統御することが難しい急流河川の流れを、相対的に統御しやすい二つの流れに分け

るところに都江堰の大きな特色があるのであるが、取水地点に注目すると飛沙堰というわん曲斜め堰によって水位を上げ取水しているのである。

都江堰と砂礫堆との関係は、異なる年次の写真を比較検討するなど、さらに検討を進める必要があるが、2000年を越える長期にわたって構造を維持したのは、このように自然の現象をよく観察し、それを巧みに利用したことに最大の理由があり、都江魚嘴・金剛堤・飛沙堰のほか、山脚を掘り開いた取水口である宝瓶口などの構造物が絶妙なバランスで関係しあっていることがある。

6. 靈渠の構造について

都江堰の構造が、砂礫堆の概念によって説明できるので



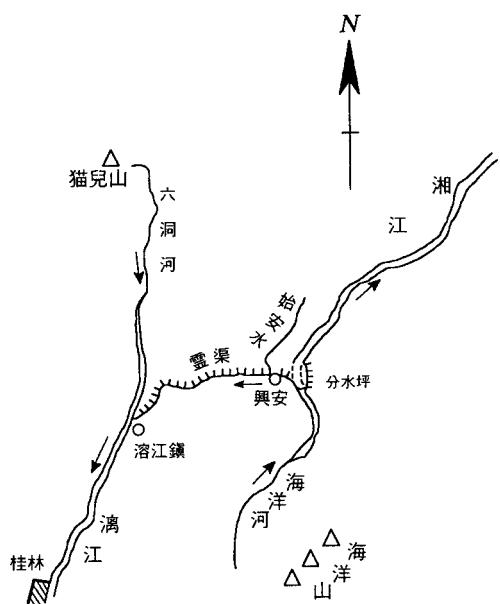
第6図 都江堰の模式図

あれば、他の井堰についても同様の視点から説明ができるのではないか。次に、紀元前3世紀の構築が伝えられ、構造が今日まで維持されていると推定される靈渠について検討したい。なお、靈渠については、現地未調査、人口衛星写真も未判読であるため、現段階では予察であることをおことわりする。

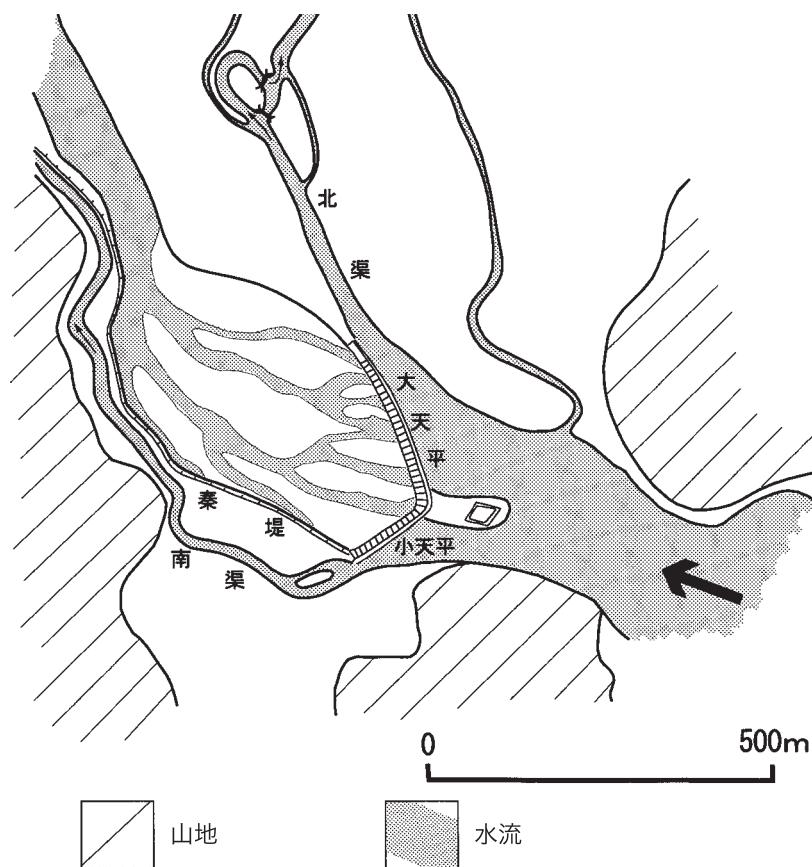
靈渠は、華中の長江の水系である湘江と華南の西江の水系である漓江を結ぶ長さ約33kmの運河である。景勝地として名高い桂林の東北約60km、広西チワン族自治区興安県に所在する。秦始皇帝の嶺南出兵に際して、物資輸送のための運河として秦始皇26～33年（B.C.221～214）に開削されたと推定されている⁽¹¹⁾。

靈渠は、湘江（海陽河）に第8図のような水利施設を構築している。水利施設は、大天平・小天平・鐸嘴・泄水天平・秦堤などから構成される。大天平は長さ380m、小天平は120m、高さ3.9mで巨石を積んで構築した井堰である。これらは河道の上流に向かって「人」字形の平面形をなす。大小の天平の交点の上流側に鐸嘴と呼ばれる鐸犁の形をした分水塘が造られている。長さ70余m、最大幅23m、高さ6mの規模である。これらの施設によって湘江の水位を上げ、北渠、南渠に導水し、余水は大小の天平を越流して本流に落ちる仕組みとなっている。また、泄水天平はいわゆる余水吐である。

靈渠の水利施設で注目されるのは、「人」字形をなす井堰の特異な平面形であろう⁽¹²⁾。実はこれも複列砂礫堆との関係が想定できる可能性がある。NHKが製作したテレビ画像によると⁽¹³⁾、水利施設の上流に中州が二つ以上連続しており、第9図のような状況が想定できる可能性があるのである。また、井堰が構築されている地点のすぐ上流には、両岸に山地が迫っており、左岸側の山麓裾に沿って河道が



第7図 灵渠 位置図
(注(11) 文献より引用)

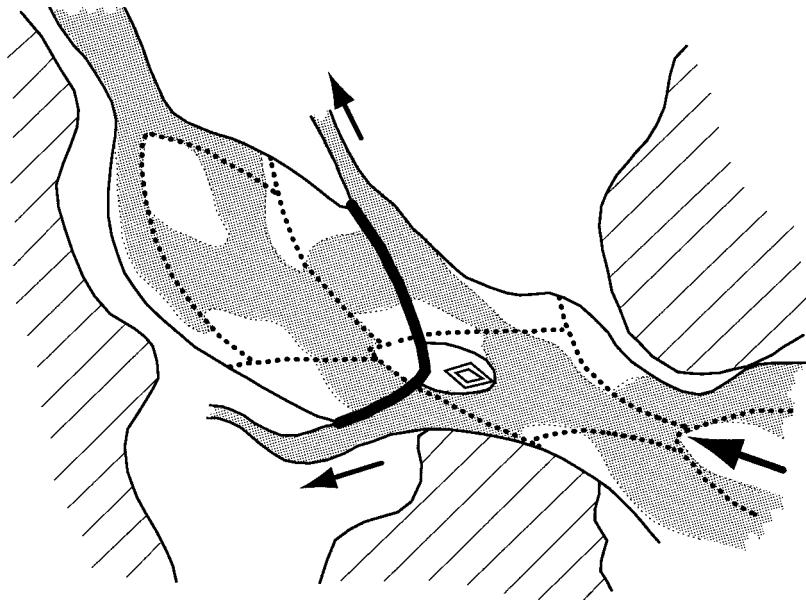


第8図 灵渠 構造図 (注11 文献より作製)

曲流していることから、移動が抑制された砂礫堆を巧みに利用している可能性も考えられる。もっとも、この推定については今後検討を深める必要があるが、長期にわたって構造が維持できる条件として、都江堰と同様の状況が想定できるのである。

7. おわりに

自然河川に見られる様々な現象が、砂礫堆の概念によって説明しうること、そして、河川を直角に横断する近代的な井堰以前のものは、砂礫堆を利用したものであること、この二つの研究成果に学びながら、わが国の河川灌漑の歴史的起源について検討を行っている。その過程で、築造年代や構造が推定できる中国の井堰も同様の事例と考えられるようになった。今回の内容については、今後、異なる撮影年の画像の比較や現地調査を行うことによって検討を深める必要があるほか、築造年代が推定できる他の井堰の検討や、施設は失われたものの、かつて井堰が所在したと推定される地点の地形の検討などを進める必要がある。なお、この検討にあたってアメリカ軍事偵察衛星写真の利用価値はきわめて大きなものがあり、コンピューター処理の方法等についても、さらに検討を進めていきたい。



第9図 灵渠の模式図

末筆ながら、紀ノ川、都江堰付近の岷江における砂礫堆の状況について、砂礫堆研究の第一人者である木下良作博士の御指導を賜った。深く感謝申し上げる。

注

- (1)拙稿「都江堰の構造について 中華人民共和国四川省所在の水利施設の調査」『香川県埋蔵文化財調査センター研究紀要』2002年
- (2)購入方法、写真的諸仕様、有効性に関する検討については、以下の文献などに詳しい。
熊原康博・中田高「発展途上地域における米軍偵察衛星写真の地形学的研究への応用」広島大学総合地誌研究資料センター<地誌研年報>9号 2000年
渡邊三津子「CORONA衛星写真ポジフィルムのデジタル化による利用とその有効性 - 中国トルファン盆地の活断層と遺跡を例に - 」<地学雑誌>第984号 2002年
田中邦一・青島正和・山本哲司・磯部邦昭『フォトショップによる衛星画像解析の基礎 手軽にできるリモートセンシング』古今書院 2003年
- (3)都江堰付近は、110余件の写真から選択したが、雲が広がり下界が見えないものが多い。価格は、ポジフィルムで1965年撮影のものが1枚18ドル、1973年が16ドル、これに梱包代と送料とで合計

129ドル、発注から手元に届くまで3週間弱であった（2003年10月の状況）

（4）注（2） 文献に詳細な解説がある。

（5）都江堰に関する研究として先稿執筆後に、大川裕子「秦の蜀開発と都江堰 川西平原扇状地と都市・水利」<史学雑誌>第111編第9号 2002年が刊行されている。都江堰のみでなく、川西平原扇状地の水利開発を、秦の多様な開発政策の一つと位置付ける、教示される内容の多い論考である。

（6）先稿では、都江堰市金江城付近の3ヶ所で岷江を観察し、単列の砂礫堆が形成されているとしたが、先稿の写真にも写る流れの対岸の堤防は中州に築かれたもので、網状流のうちの一条を観察していたことが判明した。したがって、先稿における誤認を訂正する。

（7）砂礫堆については、以下の文献を参考とした。なお、このことを適確に説明することは筆者の能力では不可能であり、過誤のあることを恐れる。詳細は下記文献に拠られたい。

木下良作『科学技術庁資源局資料第36号 石狩川河道変遷調査』科学技術庁資源局 1961年

同『科学技術庁資源局資料第36号 石狩川河道変遷調査 - 参考編 -』科学技術庁資源局 1962年

池田宏「実験水路における砂礫堆とその形成条件」<地理学評論>46-7 1973年

木下良作、三輪 弘「砂レキ堆の位置が安定化する流路形状」<新砂防>第94号 1974年

池田宏「砂礫堆からみた河床形態のタイプと形成条件」<地理学評論>48-10 1975年

井口昌平『川を見る 河床の動態と規則性』東京大学出版会 1979年

木下良作『大井川牛尾狭窄部開削の影響に関する「砂レキ堆相似」による模型実験』建設省中部地方建設局静岡河川工事事務所 1980年

木下良作「洪水時の流れと河床」『河川文化 河川文化を語る会講演集 <その七>』社団法人日本河川協会 2001年

（8）和歌山県岩出町付近 アメリカ空軍1947年9月22日撮影 空中写真（R506 76～78）を合成

（9）瀧本誠一編『日本経済叢書 卷一』日本経済叢書刊行会 1914年所収

（10）わん曲斜め堰については、以下の文献を参考とした。

三輪 弘「砂レキ堆とわん曲斜め堰」<水利科学> 85(第16巻第2号) 1972年

三輪 弘「砂レキ堆形成からみたわん曲斜めゼキの合法則性」<農業土木学会論文集>第76号 1978年

三輪 弘「天バ傾斜ゼキによる砂レキ堆の安定化に関する実験」<農業土木学会論文集>第85号 1980年

三輪 弘「扇状地河道の複列砂レキ堆と頭首工の設置位置」<農業土木学会論文集>第90号 1980年

なお、わん曲斜め堰は、下流側に少し膨らむ形状のもののほか、河道を斜め方向に直線に横断する形状のものも多い。

（11）靈渠については、以下の文献を参考とした。

鄭連第『靈渠工程史述略』水利電力出版社 1986年 北京

長江流域規画弁公室《長江水利史略》編寫組『長江水利史略』水利電力出版社 1979年 北京

（日本語訳：鎌木孝治訳『長江水利史』古今書院 1992年）

米倉二郎「靈渠瞥見」<地理科学>第52巻第4号 1997年

- (12) わが国にも「人」字形をなす特異な平面形の井堰がかつて存在した。遙拝堰は、熊本県八代市、球磨川が山間部から平野部に出た地点に構築された井堰である。平面形は「八」の字をなし、左右両岸に取水している。また、この下流、八代市古城町にも八の字堰という同形態の井堰が所在している。いずれも16世紀末から17世紀初頭の築造年代が伝えられており、歴史的な意味での靈渠との関連は想定できないが、構造に共通点が見られる。しかし、砂礫堆との関連は今のところよく分からぬ。
- (13) 日本放送協会（ＮＨＫ）が、日中国交正常化30周年を記念して2002年夏に製作したテレビ番組『桂林～天下の絶景を行く～』において、靈渠が紹介された。ここでは南方からのカメラが、靈渠の上流側から下流の渠首にカメラアングルを移動する映像が放映された。なお、この映像の静止画を小稿に掲載しようとしたが、著作権許諾上の問題で果たせなかった。