

大規模河床形態に関する考案

System of Regime in an Alluvial Channel

宇都宮大学 正員 須賀 堯三

SUGA Kyozo

1. はじめに

大規模河床形態の定義は従来明確であるとはいえない。ただし、大規模河床形態という言葉は、小規模河床形態および中規模河床形態に対応して用いられてきたが、その概念は後2者のような明確なかたちで与えられていない。大規模河床形態の言葉が存在しながら、そのなかみが与えられていなかった理由は、日本の河川においては近年では何んらかの形で堤防の如き構造物が存在するので、河川の平面形状はすでに与えられたものであり、それはそのまま維持すべきものであるとの認識が普及しているためと考えられる。

本論文においては、大規模河床形態のなかみについての考察の糸口を模索する。大規模河床形態の概念を論ずるとき、それは一般河川技術の通念としての河床形態というよりは、むしろ河道形態、さらには河川形態というべきものである。川の理解度は適切な分類と比較に基づいた真の思考によって高められる。従来は、山地河道、扇状地河道、中間地河道およびデルタ地河道という地理学的な古典的分類を基本として、科学的な資料の収集と解析、それに河川工学的な経験と思考が重ねられて、河川に関する適切な判断がなされてきた。しかし、それはここで考えている大規模河床形態の内容が明確となれば、さらに高度のものとなるであろう。本論文の目的はそればかりではない。大陸の河川を含めた全ての河川に共通するパラメーターを探ることが重要と考える。本論文に述べる考え方の基本は、オリノコ川および同支川のアブレ川(12万km²)、アラウカ川における地上、水上、上空からの視察、および地図と空中写真に基づいて得られたものであるが、一般的記述として以下の要約を行う。

2. 河川と流域の地形

河川を考察するときの基本的事項は、河道と流域の地形・地質、降水等の気象条件、土砂生産の条件、河道の人工的な構造物と作用、および社会の発達程度である。この中で、地形は他の事項と関係が特に深い。流域の基本的な土地は山岳地域、丘陵地域および平地(洪積性、沖積性)などに分けられる。洪積地は隆起等の地殻変動の影響、氷河による侵食や融氷水によって運ばれた堆積物による起伏、および風による sand dune などに基づく地形変化を示すのが一般である。これは河道位置やその形状に支配的な影響を与えている。また、堆積物とその堆積状況によって変化すると考えられる地下水分布および地下水のかん養状況は、洪水流量の縦断変化に影響を与えると考えられる。氷河期で海面が低い時代には粗粒材料が急な流れにより相当下流まで運搬されているがあり、流域面積が大きい場合には地下水による損失量が無視しえないことがある。河川の立場から考えると、地形・地質形成上重要なのは、比較的新しい第4紀完新世(後氷期沖積世)以降であり、1万年間程度といわれている。この間の地形の形成には、以上のほかに局部的に火屑流や降灰等をもたらす火山活動の影響がその規模に応じて現われている。

このようにして考えてみると、土砂の粒径やその地質構成の内容を、地形とその発達の歴史に照合するとに興味を感じられる。そこには密接な関係が存在することが示されてきた。河川を巨視的に把えるときにこのことは特に重要と考えられる。すなわち、河川の大規模河床形態にとって基本的な事項は、地形と土地の構成材料であり、また上流域における土砂生産量と粒径、運搬と堆積の過程であるからである。

3. 土砂生産量とその質、ならびに現象生起の条件の効果

土砂生産の主要な形態は、崩壊・風化・侵食・降灰・飛砂などである。土砂生産を誘起させる外力は降雨・融雪・地震・洗掘力・風力などであり、含水率の増大に伴う土質強度(岩質強度)の低下、間隙水圧の増大、地

下水流による空隙（水みち）の増大などの現象が関係する。すなわち、土砂生産の現象にはその条件が特に重要である。このなかで、山腹崩壊に対しては、崖錐の発達程度とその構成材料の様子が主要な問題点であり、ときに古い土石流堆や火屑流堆なども注目される。焼畑や道路建設の方法によってはこれらも重要な影響を有することがある。一方、表面侵食は、降水の地中への浸透が小さい場合に顕著になるものであり、小さいがりなどを発達させながら地表面を流下する過程において微細粒子を水流の中にとり込む現象である。浸透層が発達している場合には、降水の多くは地中に浸透し、時間的な遅れを伴って澄んだ水として流出してくるのであるが、微細な火山灰で覆われた地域や、微細堆積物あるいはそれらが風化した地表を有する地域では、流量が小さいときでも常に濁った水が流れることがある。微細堆積土砂が風によって輸送されるときも同様である。また、平原において新水路が発達の途上（初期に鉛直侵食、後に河岸侵食）にある場合にも多量の土砂生産が生じることがある。

土砂生産の現象については、歴史的な調査結果により、将来の予測をある程度まで行うことができる。表-1は土砂生産と土砂の流出についてまとめたものである。これによると、土砂が多いとされる河川においては上流流域において崩壊が多く発生しており、勾配が急なところでも比較的細

表-1 土砂生産と流出の特性

生産形式	生産地	量(外力同一条件)	質	現象の生起	備考
崩壊	山地	多量	sand, silt	間欠的(stochastic)	
風化	山地	少量	gravel, stone	連続的	
侵食	山地、丘陵地、平地	多量	clay, silt	連続的	ガリの発達
侵食	河道(狭河道)	少量	sand, silt	連続的	(河道堆積物の二次流出を含む)
侵食	“(断り)”	多量	silt, sand	間欠的	

粒の砂が多く見られる。土砂が少ない河川では巨石や玉石が多くみられ、砂やシルトはあまり見られない。前者は流路幅が広く、後者は狭い。表面侵食が激しく、流水の土砂濃度が常に高い場合には、土砂の粒径はさらに小さく、粘土やシルトが主体となっている。新水路が発達することによる生産土砂はシルトや砂が主体となる場合が多い。

土砂生産の現象の生起は、表面侵食については決定論的性格が強いとみなすことができるが、崩壊現象については複雑な stochastic 的現象を重視する必要がある、新水路の発達については新水路の誕生の条件について考察を行うことが大切である。

表-2 平原の微地形

地 形	微 地 形	土 質
新しい段丘地形	(隆起、侵食)	
扇状地地形	(全てが旧河道)	砂、砂利
氾濫原	自然堤防	砂
	堤防斜面	シルト
	後背湿地	粘土

4. 氾濫原内部の微地形

氾濫原とは洪水が氾濫したところで、将来も氾濫の可能性のある平原をいう。表-2は地理学的な分類として通常行われているものである。堆積面はほぼ平坦である。堆積層の粒度組成は、土砂生産源に近いところでは均質の層が重なり、それぞれの層の粒径は異なるが、遠いところでは全層にわたって均質である。その粒径は、一般に流域の上流から下流に向かって減小し、かつ河道から遠ざかるに従って減小している。ただし河道変遷があればその影響が残る。

氾濫原を河川工学的にみると、極くわずかな起伏、露岩や古い地層の露出、粒度と粒度分布、地下水位、植生などが重要である。植生は水と土壤に主として関係する。植生に関して大雑把に、森林・草原・荒地と区別すると表-3のようなことがいえる。これらは、水深、水が存在する時間、流れの強さ、堆積土砂量、地下水位、土質・土壤等の条件を反映している。

表-3 水 と 植 生

反映の程度は樹林の種類、樹林の密度、草の種類・長さ・密度等によって判断することができる。

こうして考えてみると、人工の手が加えられていない氾濫原の中である幅で曲線状に連なる forest belt が、任意の間隔で幾筋にもわたって、ほぼ平行して存在することがある。また、その線はときには入り乱れることもある。これらは比較的新しい旧河道が存在することを示すものと思われる。また、

植生の種類	条 件	例
森 林	乾期にも水の補給がある。 (地形・地質)	新しい旧河道沿いの forest belt、背後低地
草	雨期には水が適度にあるが乾期には水がない。	
植生なし(裸地)	年間を通じて水が不足。	

森林がダンゴ状にまとまって点々と存在することもある。これはデルタ性の低地となっていることを示すものと思われる。これ以外にも、さらに古い旧河道やデルタは存在しており、平坦とみられる氾濫原も、水の観点からみると変化に富んでいるのが通常である。

さて、現存する水路の周辺において自然堤防が発達する条件は、砂を含む流砂が存在すること、上流において土砂生産が十分に行われていること、洪水によって氾濫が行われている場合にも洪水流は主として水路を流れ、かつ強い氾濫流が長時間にわたらないことなどである。一般に自然堤防、堤防斜面および背後低地はセットとして一緒に存在するものと扱われているが、実際には河川流路の変遷や生起する洪水の規模の相違、および植生の条件の違いなどにより複雑となる。たとえば、背後低地が排水路として機能するために、背後低地のさらに外側に自然堤防が存在するということもある。その結果として、例えばオリノコ川では年間ひと山の洪水波形と豊富な水量のため氾濫域全体が *forst belt* となっている。そこでは、旧河道や湿地帯が存在する。また、筋状の水路のライン、幾重もの筋状の植生ライン、およびそれらのラインが破れて不連続となっている箇所などが錯そうし、一般には複雑な様相を呈している。その複雑さは不安定度の示標とはなりうるものの、河川の規模が大きい場合には、大局的にみて決定論的現象に支配され、その範囲内の安定度は得られている。

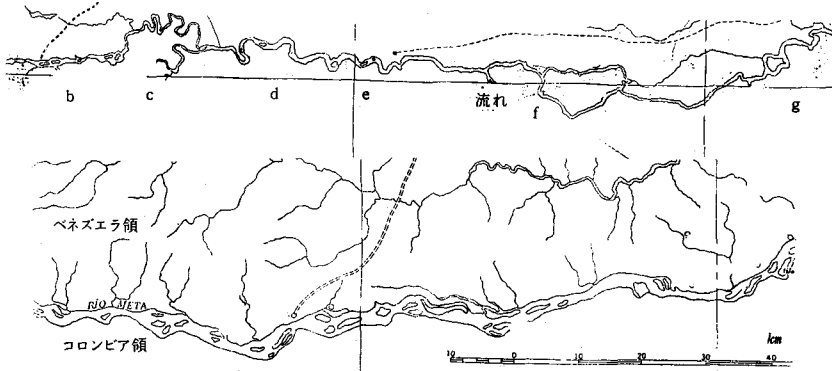


図-1 自然蛇行河川平面図 上：アラウカ川（記号は表-4と対応）
下：メタリと自然堤防、河道の直線性、州の発達と川幅の変化

5. 大規模河床形態の分類

河川の沖積作用に関する考察を行うにあたって重要なことは、スケールの問題である。時間尺度としては、河川の場合によって異なるが、洪水毎の変化を避けるため数十年のオーダーをとる必要がある。長さのスケールとしては、河川に共通するパラメーターを定めて議論することができない。すなわち、大規模河床形態は土砂の輸送・堆積および耐侵食性（土質強度）に重要な関連を有するからである。ここでは、簡単のため砂・シルト・粘土と大別して議論をすすめる。

表-4は河川を上流から下流に向って、現象上の特徴があるセグメントに分割した場合に、最も基本的な分類を行って関連事項について整理を行ったものである。

a 山地河道の作用としては、鉛直侵食が基本であり、それに伴って河岸侵食と河岸崩壊が発生する。上流からの土砂補給は必ずしも流量に見合ったものではなく、土石流堆の侵食や河道堆積土砂の再流出が少ない場合には、崩壊が多く発生する場合にのみ大量の細粒土砂が流下する。山地河道では流れは一般に急流であるが、水路は岩質であるから流路の変化は少なく、河道とその流れは安定している。

b 網流河道は広い山間部または山地河道に接続する河道であり、流路が急変して、堆積作用が基本作用となる。上流における土砂生産の現象の影響を直接受けて変動性に富む。流域面積と降雨条件に対する流路幅は、土砂量が多い場合には広く、反対に土砂量が少ない場合には狭くなる。それは前者の場合において流砂の粒径が小さいため、必然的に流路幅を大きくして水深を小とし流速を小さくする条件が不可欠となるの

に対し、後者の場合には逆となるからである。流路幅が広くなると、洪水と土砂の生起の stochastic な条件により、植生の影響も加わり、かつ河床材料の変化やアーマー効果も経年的な変化を示し、流路は不安定となって変動性に富み、かつ大きくなる。

網流河道では水深が小さいから、流れは2次元적であり、直進性を有している。掃流砂も浮遊砂も流れの2次元性に見合った運動をするので、分岐水路の生存期間が長い。すなわち、流れは直進する傾向にあり、横断面内において流れの間の関係がうすく、3次元적効果は小さいので、掃流砂が2次流によって分岐点において流量配分比に反して一方の水路のみに流入するということはない。これは通常の蛇行作用と異なったものである。この水路は勾配が変化し、流速・流砂量・流砂の径が異なるようになる地点まで続く。この間にあっては、ときに独立した分岐水路が長期間維持されることもある。

c 不規則蛇行が生じる条件は、勾配がやや小さくなって水深が大きくなり流れの3次元効果が生じて、川規模の砂州・砂礫堆が形成され、流れの発散・収束があって流路幅が縦断的に変化し、流量と流砂運動の

表-4 河道セグメントの分類と関連事項

主要関連事項 セグメント名	主要現象の 発生メカニズム	河床勾配	河床材料	流砂型式	特 徴	発達の主因	減衰の主因
a 山地河道 (Valley)	stochastic	最大	露岩、転石	掃流、浮流	鉛直侵食、土砂の調整、河道安定		
b 網流河道 (Braded)	stochastic (流域、土砂生産)	大 No 2	礫、砂利、砂	掃流、浮流	河道の直線性、砂礫堆の運動活発	堆積、溪谷扇状地頂	流砂量の減少
c 不規則蛇行 (Irregular meandering)	stochastic	緩 No 1	砂利、砂	掃流、浮流	平面的に大規模にわん曲、縦断変化 蛇行モードは流量により変化	扇状地上流部	
d 強制蛇行 (Forced meandering)		緩 No 2	砂、シルト	浮流、掃流	自然堤防、森林ベルト、流れと州の移動はゆるやか 水路はかなり安定	扇状地中・下流部	
e 規則蛇行 (Regular meandering)	deterministic	小 No 1	シルト、(砂)	浮流	川幅はぼ一定、河岸強度大、堆積はわずか、安定	上流に流量と土砂量が調整	堆砂、河岸侵食
f 分岐流路 (Bifurcation)	stochastic (下流水位)	小 No 2	シルト	浮流、掃流	自然堤防なし、不安定 水路拡幅に伴う土砂生産あり	水位上昇に伴う旧河道や排水路の活性化	埋没
g 不安定蛇行	stochastic (分岐水路による土砂生産)	小 No 2	シルト、砂	浮流、掃流	砂州の成長、河道不安定	分岐水路による土砂生産	
h 小規模分岐流路		平坦	シルト、粘土	浮流	原因の規模に応じたスケール	下流部にデルタ、スワンプ、狭窄部、dune等の存在	流路の統合・拡大
i 背水デルタ蛇行	deterministic	平坦	シルト、粘土	浮流	大きな曲線からなる蛇行が縦断的に押し縮んだようにして連なる	合流先本川の水位変化曲線	支川の大洪水
j 狭窄部デルタ蛇行	deterministic	小	シルト、(砂)	浮流、掃流	蛇行の流下伝播速度の急減により大わん曲でつまった形状となる 不安定	縦断的不連続性	
k 河口デルタ河川	stochastic	平坦	シルト、粘土	浮流	多数の直線状流路、分岐流路の発達	潮位変動、密度流、フロキュレーション	

stochastic 的な現象の効果が大きく、砂州や流路の変化が大きいことである。これは山間部出口や網流河道下流においてみられ、日本では天竜川や阿武隈川の典型例がある。この区間では砂利はもはや少なくなり、砂州の流下・変形の速度が大きく、河岸侵食も容易であるので、自然堤防による流路安定効果よりも土砂生産地からの距離が近いため、流量や流砂量の変化が大きく、そのような stochastic 的な現象によって生じる大きな変化がまき、縦断的な蛇曲変化が一定しない。ときには流路幅が10倍程度に急変し、大きくわん曲することもある。また、流路の中で中規模な蛇行形態が変化を示し、その影響が出てくることもある。分岐水路はもはや生き残ることはむずかしい。流路や砂州の変化は大きく、かつ激しいので旧河道は多く存在する。掃流形式が主体であるが、勾配変化点を含み、全体的には堆積区間である。このセグメントの河道延長はあまり長くない。

- d 強制蛇行は外力の変化に対して河道が十分の容積と強度を持つ場合に発達する。河岸の構成材料は砂・シルトであるから侵食に対して強くはないが、大きい流路幅、適度な蛇行（モード数も流量に応じて変化）および十分に発達した自然堤防によって、河道の変化がコントロールされ、その中で調和と安定性が得られている。すなわち、河道の変化と自然堤防の発達の間に調和が保たれ、河道が無秩序に変化することがない。砂州の配列と移動の現象には縦断的にバランスが保たれている。それは単列蛇行であっても、複列蛇行であっても、あるいは蛇行のモードが多重構造であって少々変形していても、基本的には変わりが無い。すなわち、比較的粗い材料があって、高さが大きい自然堤防が縦断に連続的に発達し、かつ流量や流砂の現象が stochastic な性格から deterministic な性格に緩和され、河道はかなり安定してきている。なお、自然堤防の材料が若干細かくなるとシルトが主体となると、自然堤防の範囲が広がり、河道が安定するようになる。
- e 規則蛇行は、砂がなくなり掃流現象の効果が減少し、明確な掃流砂による砂州の堆積がみられなくなる地域において生じる。この場合、自然堤防の発達は弱く、反面シルト・粘土が主体の河岸の耐侵食性は強い。流路幅はほぼ一定で、円滑な曲線形を描き、勾配も小さくほぼ一定である。これは、う曲河道とみられ、流水による河岸の侵食速度は小さい。流量変化が大きくない場合には河岸では樹木も十分に生育する。もし、河岸侵食があって堆積がないとすれば、流路幅が増大し、水深が減少するが、現実にはそのようになってはおらず、わずかな侵食とわずかな堆積が見合っているであろう。すなわち、浮遊流砂とウォッシュ・ロードが主体で河床変動がほとんどなくなる状態にまでわん曲して勾配を小さくし、流速を減小してかなり長期間にわたって安定すると考えられる。この場合には単列蛇行である。
- f 分岐流路は掃流砂がほとんどない場所に存在する。もし、掃流砂と流れの3次元性が存在する場合には、分岐水路が長く生存することはほとんど不可能である。つぎに、分岐流路が生じる場所では自然堤防の発達はない。分岐水路は、土地の高さ以上となる水位上昇により、旧河道や排水路などを鉛直侵食の後、河岸侵食を行って成長するものである。したがって、下流においてデルタが発達して水位が上昇する場合とか、水路が不安定の場合に、分岐流路ができる。日本では信濃川下流部の中ノ口川が分岐流路であろう。分岐流路の発生を阻止する方法は水位を下げることで、および低い水路状の土地を閉めること、あるいは堤防の建設である。現存する分岐水路の発達を阻止するためには、分岐部の平面形状の変更、短い水制群による寄州、しゅんせつなどがあるが、分岐堰等の水位を上昇させる対策は好ましくない。強制蛇行や規則蛇行地域のすぐ下流部において生じる分岐水路は規模が大きいのが通常であるのに対し、デルタの上流部に出来る分岐水路の規模は大きいものではない。
- g 不安定蛇行が、分岐水路が発達あるいは消滅する過程で活性化する。その原因は分岐水路の発達における土砂生産が行われ、それが下流部に輸送されることにある。この場合の生産土砂の主体はシルトであって砂はわずかであるから、掃流現象の効果は小さく、強制蛇行のような安定した蛇行にはなり得ない。また、規則蛇行のようなほぼ停止した蛇行とも異なり、縦断的なバランスが得られず、変化が激しく不安定となる。
- h 小規模分岐水路がスワンプに流入する地点で形成される。ここでいうスワンプとは、下流部に狭窄や土地の高い所が存在する場合、あるいは小規模のデルタなどに基づいて形成されるものをいう。このスワンプに流入する河川において水位上昇によって分岐水路が発達する。したがって、分岐水路の延長はスワンプの規模や水位の上昇量などと関係を有し、通常規模は小さい。また、河床材料はfの場合よりさらに細かい。
- i 背水デルタ蛇行が下流部の大河川に流入する直前に形成される。これは当該河川より規模のオーダーが異なる大河川の水位ハイドログラフの背水によるものである。すなわち、下流河川の水位が高い期間は湛水し、運搬されてきたシルト・粘土は背水区間に堆積するが、水位の低下に伴って、背水上流端より局部的に大きな流速によって堆積土の一部が移動を開始し、それが徐々に下流に波及していく過程において、大きく円滑な曲線流路を描いて蛇行するものである。
- j 狭窄部上流蛇行は露岩地点、sand dune等による固定地点、支川の合流地点あるいはその他の地形・地質条件により、経常的に流路が狭められて固定している場合等に、水位の上昇と蛇行砂州等の通過に不連続

性が生じるために発達するものである。土砂の粒径によって異なった形状となるが、一般に大きなわん曲となり、その形状が流下に伴って押しつぶされたような形態となり、一般には不安定である。このような場所では旧河道が多くみられるのが普通である。

k 河口デルタは、大河川が海部に流入する場合に、シルト・粘土を沈降させ徐々に発達する。これは、海水の存在と潮位変動の効果を受けて、直線状河道となることに特徴を有している。通常、海部は浅くなっているので、波による漂砂の影響は局部に限定される。海水の効果はフロック形成による微細土砂の沈降であり、潮位変動の効果は入退潮流の周期的生起である。一般に河川の中下流部では、海水の存在と潮位変動によって河口部において流速が最大となる。このような場合、河川水の海域における拡散幅は大きくはなく、直線状に海域に流入する。ミシシッピ川では、鳥趾状（バーズ・フット）デルタが形成されている。これは、ミシシッピ川の流量が大きく、水深が大きく（1部維持しゅんせつが行われている）、かつ河道が固定されているためである。ミシシッピ川のつくる三角州は先端の鳥の足跡の部分を除けばおおそ東西約200 km、南北約150 kmのやや南へ張出した円弧状とみることができる。鳥の足跡の最大のものは現在の主河道に沿うもので、長さは100 km、幅は20~30 kmに達している。三角州の前面には海に接していくつものラグーンが並び、その内側にはスワンプと呼ばれる大湿地帯が広がっている。自然の状態ではほぼ直線状の河川が幾筋にも平行し、また連絡水路を形成して、成長・減衰を繰返している。大洪水時や高潮時の変化が大きいようである。デルタが十分発達すると派川の密度が减小する。

6. まとめと今後の問題

大きな時間尺度をとって、大規模な河川形態について分類を行った。ただし、支川合流の影響、流量の時間的・距離的な急激な変化の効果、および人工的作用の影響等の事項については取扱っていない。河川は個々の河川毎に異なった特性を有するが、その特性を理解するうえで、河川の区間毎の分類と河川間の比較を行うことが重要である。河川改修の可能性の検討はこのような河川の各区間毎の特性を理解した後に行わなければならない。ただし、大河川の特性を系統的な資料によって実証しつつ検討を行うことはほとんど不可能であるので、本論文における仮説、推論、精度の評価は今後の調査・研究結果にまっところもあるであろう。しかし、このようにまとめてみると、今後の調査の方向についての示唆が与えられる。なお、今後の主な課題を列挙すると次のようである。

- a 地形・地質調査に基づく、近世1万年程度の土地の形成過程と河川の変化の検討。
- b 砂礫層の分布と地下水脈の調査、および縦断的な流量の低減に及ぼす浸透量の効果
- c 土砂生産量と粒度組成、ならびに土砂生産現象の生起の仕方
- d 流路幅、流量、土砂量と粒径の分布、土砂生産の生起の現象、勾配、植生等の間の関係、ならびに自然堤防、河道の蛇行、分岐等に関する定量的研究（事例の積みあげが必要）
- e 長年月にわたる水位変化と流路変化に関する研究
- f 微細土砂（シルト・粘土）の輸送堆積、および浸食に対する土質強度
- g 人工構造物、たとえば堤防（道路を含む）ダム、護岸・水制、しゅんせつ等の影響に関する調査、土木材料と工法に関する研究
- h 日本における過去の大河川工事（石狩川捷水路、信濃川放水路、利根川のつけ替え等）に関する河川工学的研究