

穿入蛇行河川の流路変動様式を規定する要因

— 大井川中流域の事例 —

Controlling factor in the type of channel
planform change of incised meander: A case
in the middle segment of Oi river.

中野 彰夫*・池田 宏**

Akio NAKANO and Hiroshi IKEDA

I はじめに

山地地形の形成過程を理解するためには、山地河川がどのようなプロセスで地形を変化させているかを明らかにする必要がある。特に、側方へと流路を変動させながら河谷を形成する穿入蛇行河川の形成プロセスは、長期にわたり研究が続けられているにも関わらず、不明な点が多く、解明すべき重要な地形の一つである。

穿入蛇行の研究が注目されるようになったのは、Davis (1893) が、地盤の隆起に伴う沖積蛇行河川の岩盤への穿入により屈曲した河谷が形成されることを記載して以来といえる。その後、Rich (1914) は隆起速度が小さい場合、下刻の過程で側方侵食して穿入蛇行が形成されることもあることを示唆し、穿入蛇行の河川プロセス研究に興味が及ぶようになった。彼らの研究を受け、Moore (1926a, 1926b) は、Davis の示した穿入蛇行を「掘削蛇行」、Rich の示した穿入蛇行を「生育蛇行」と名付けて区別した。以降、穿入蛇行河川の蛇行形態などに関する記載が盛んに行われるようになり、成因について検討されるようになった。

穿入蛇行河川の研究は沖積蛇行河川の研究が先行

していたこともあり、沖積蛇行河川の研究に立脚した上で議論が進んだ。その代表的なものが Dury (1954, 1960, 1964a, 1964b, 1977) の一連の研究である。彼は、多様な穿入蛇行河川を対象に河道形状と流量の関係を調査して、その対応関係を検討した。その結果、地質や地質構造に関係なく河道幅、蛇行波長、振幅、曲率半径が沖積蛇行河川と同じように流量に規定された関係にあるという興味深い報告をし、穿入蛇行に関する理解を飛躍的に進歩させた。

しかし、場の条件である地質や地質構造、隆起速度などの違いによって河道形状が異なることが従来の研究において示されている (Hack and Young, 1959 など) 以上、Young (1978) はその影響を考慮する必要があると考え、彼のフィールドであるオーストラリア南東部の Shoalhaven 川流域を再度調査し、地質、および地質構造と流量との両面から穿入蛇行の評価を行った。その結果、地質構造が河道形状を規定する場合もあることを再度強調し、穿入蛇行河川は沖積蛇行河川のように単純ではないことを明示した。これを受けて、穿入蛇行を解明するためには、地形形成営力となる河川内の流量、流砂量な

*筑波大学地球科学研究科 (現 (株)フレックスインターナショナル) **筑波大学地球科学系・水理実験センター

どの諸条件と、地形形成営力を受ける地質、地質構造、隆起速度などの場の条件の両面から検討しなければならぬと考えられるようになり、これ以降、二つの要素を分離して穿入蛇行の形成を解明する研究が成されるようになった(たとえば、河内, 1976; Braun, 1983; Harden, 1990; Deshaies and Weisrock, 1995).

以上のような穿入蛇行研究に共通して言えることは、穿入蛇行の研究が少なからず沖積蛇行河川の研究の延長として行われる傾向が強いということである。そのため、結果的には穿入蛇行河川自体の河川プロセスについての研究は未だ十分にはなされていないといえる。

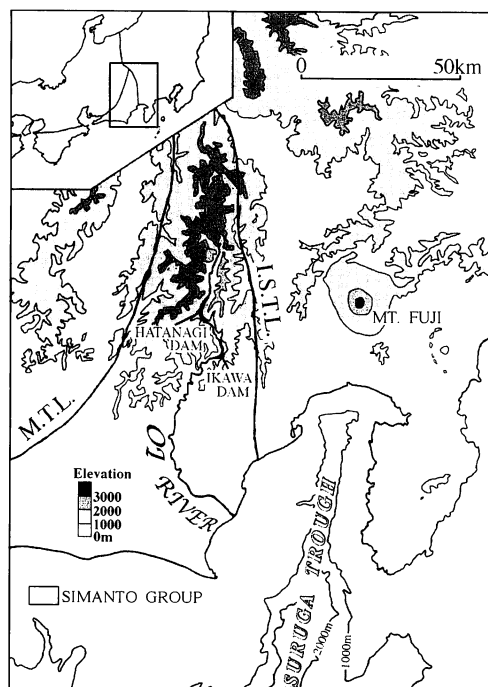
この状況の中にして、前田(1990)、藪地(1991)は、山地河川の河川プロセスの理解を進めることが重要と考え、静岡県の中東部を流下する大井川を対象に調査を行なっている。その結果、穿入蛇行だけに限らず、山地河川の河川プロセスは河床で生じている河床形と密接に関係しており、河川プロセスを規定する可能性があるという興味深い結果を報告した。

そこで、本研究では、この興味深い報告を受け、河床形態の形成要因の解明、河床形態と河道形態の対応関係と河道形成要因の解明を目的に、大井川中流部の30kmの区間を対象にフィールド調査を行った。そして、大型水路による水路実験を通してフィールドで得られた事実の検証を行い、穿入蛇行河川の河川プロセスについての検討を行った。

II 調査地域の概要

1 大井川流域の概要

大井川は西南日本外帯の東縁に位置しており、糸魚川-静岡構造線と中央構造線に挟まれた地域に流域をもつ(第1図)。この地域は白亜紀~古第三紀に深海底に堆積した物質が、駿河トラフに沿ってサブダクションすることによって日本列島の地下に付加されて形成された付加体から成っている。連続的な付加作用によって地盤が押し上げられて隆起しているために、地表に現れるまでの過程で破碎され、多くの断層や節理をともなっている。山間地の大部



第1図 大井川周辺の地形・地質
M.L.T.: 中央構造線, I.S.T.L.: 糸魚川静岡構造線

分の地質は主に砂岩、泥岩、砂岩泥岩互層で、そこに凝灰岩、チャート、玄武岩が狭在しており、四万十層群と一括される地層から成る。この砂岩は数m間隔で節理が入っており、その弱線に沿って割れて、径数mの岩塊を生産するのに対して泥岩は、数cm間隔の節理が入っており、細片となって細粒物質を生産するという特徴がある(写真1)。走行は北東-南西方向で、おおむね北側に急傾斜しており、場所によってはほぼ垂直に立っていることもある。四万十層群を成す各層群は大規模な衝上断層によって分割されており、各層群内では褶曲構造が卓越して地層が繰り返されている。南東方向から付加されているために、南東方向にあたる海岸側により新しい年代の地層が存在する。

流域内は上述の付加作用によって急速に隆起しており、第四紀の平均隆起量は地形学的、地質学的方法からおよそ1000~2000mと推定されている(第四紀地殻変動研究グループ, 1968)。このことから第四紀の隆起速度は平均して1~2 mm/yearになる。



写真1
数m間隔の節理を持つ砂岩（上）と、
細かい節理を持つ泥岩（下）

ただし、近年の水準測定の成果からはこれよりも大きな隆起速度が算出されており（加藤，1984），1～2 mm/yearという値はやや低く見積もられている可能性がある。駿河トラフに沿って付加されて隆起していることから、隆起量の大きさは駿河トラフに沿って帯状に分布しており、流域の北西域の標高が高い山地の地域が最も大きく、南東方向に小さくなっている。このような地盤の隆起とともに河川は下刻しており、場所によっては深さ1000m以上の谷をもつ峡谷になり、急峻な山地を形成している。地表面付近では岩盤クリープが生じているために、破壊されやすい状態になっている。

年降水量は3000mm/yearを越えており、7月～9月にかけての台風の通過によって、時間雨量30mmを越す局地的な豪雨が頻繁にもたらされる。急峻で降水量が大きいために、流域内の平均崩壊面積率が数%に達する（眞板，1988）ような、土砂生産の

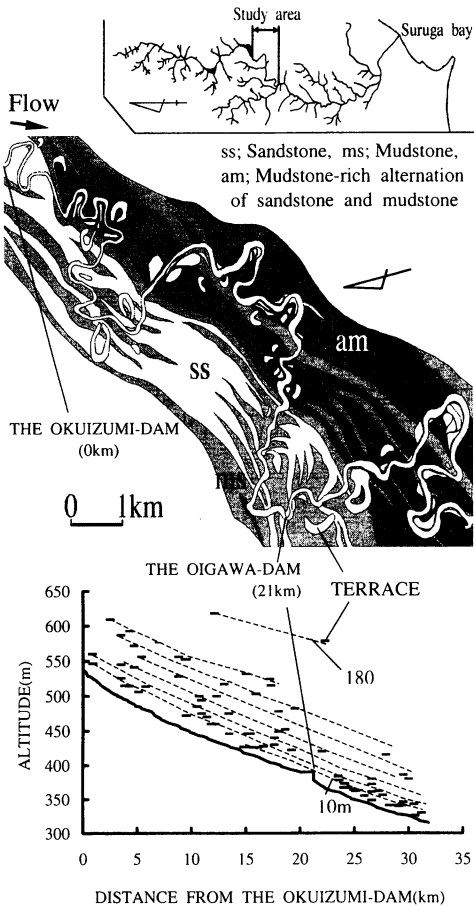
活発な流域になっている。特に、岩盤クリープによって破壊された表層部がはげ落ちるような形態の崩壊（表層崩壊）が谷壁に卓越している。このような崩壊にともなって、大量の土砂が生産されるため、土砂の供給量は時間的に大きく変動するという特徴をもつ。実際に、同程度の出水に対して土砂の流出量が様々に異なることが報告されている（眞板，1988）。

大井川は流域面積1,280km²の南北に細長い流域をもつ。流域の90%以上が山間地にあり、その上流部は2,500m～3,000mの赤石山地に位置している。大井川は赤石山地に沿って南西方向に流下した後、南東方向に流路を転向し、再び南西方向に流下するという形態になっており（第1図）、上流側の屈曲部に畑薙ダムがあり、下流側の屈曲部に井川ダムが位置している。中流部で大井川最大の支流である流域面積244km²の寸又川が合流する。最終的に大井川扇状地を経て駿河トラフへと流れ込んでいる。

2 調査地域の選定

山間地を流下する河川は、地質、地質構造、隆起速度などの場の条件が空間的に変化するだけでなく、流量、流砂量などの条件も時間的、空間的に大きく変動するという特徴をもつ。このような山地河川での河道プロセスを一地点での現象で理解するのは困難である。この場合、一つの手段として地形形成営力に直接影響を及ぼす流量、流砂量の条件が空間的に変化しないような区間を選び、現象を解明していく方法がある。大井川は南北に細長い流域をもつため、寸又川以外は大きな支流がほとんどなく、比較的長い流路区間において流量、流砂量が空間的に大きくは変化しない区間を取り出すことが可能である。しかし、上述した場の条件がその区間内ですべて異なると、実際に河道プロセスを規定している要因を抽出することが困難になる。場の条件の中で、地質構造と隆起速度はどちらも付加作用の結果として与えられており、付加方向に直交する北東-南西方向の断面で見た場合に、同じような褶曲構造と、隆起速度をもった帯状の地域を取り出すことが可能である。以上のようなことを考慮して、本研究では井川ダム直下に位置する奥泉ダムより下流から寸又川合

流点直上までの31.5km区間を調査対象として選んだ(第2図)。



第2図 調査地域の概要

建設省発行1/2,500地形図, 1/50,000地質図, 国土地理院発行空中写真(1976年)より作成

この区間で流入する支流は主に栗尾沢(流域面積8km²), 関の沢(流域面積29km²), 油ノ河内(流域面積8km²)で, 奥泉ダムまでの集水面積464km²に比べると流域面積が小さく, 流量, 流砂量はこの区間では縦断的にそれほど変化しないと考えられる。また, 北東-南西方向の走行に沿って流下している区間であることから, 同じような褶曲構造をもっており, 隆起速度は縦断的に同程度で, 近年の測量成果から得られた値(加藤, 1984)から2~4mm/yearほどであると考えられる。この地域は四万十層群の中の犬居層群からなっており, 白亜紀末

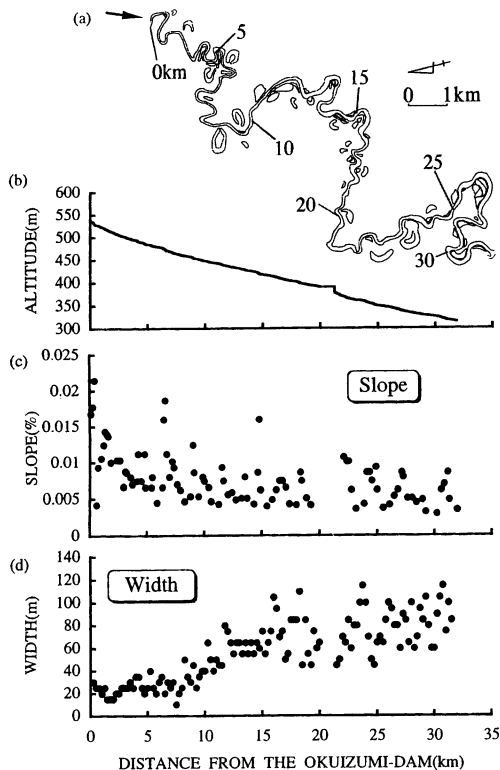
~古第三紀に堆積したもので, 主に砂岩と泥岩, 泥岩優勢砂岩泥岩互層からなる。垂直に立った互層地域を刻んで流下しているため河床, 河岸の地質が場所によって多様に変化しているが, その他の条件は比較的均一である。

3 調査区間の河道形状

以下では, 調査区間の上流端にあたる奥泉ダムを0km地点とし, そこからの流下距離をとって距離標として表現した。21km付近に大井川ダムが存在している。大井川ダムの堰堤標高は33.5mでそこから上流の約3kmはこのダムの影響が及んでいると考えられる。大局的に見た流路の形状は, 東から西に流下する区間と北から南に流下する区間が交互に繰り返されており, 稲妻形になっている(第2図)。この地域において穿入蛇行が発達しており, 河道は沖積蛇行河川のように円弧を規則的に連ねたような形状になっている。河岸には様々な標高の旧河道が存在するが, さほど広い段丘面はなく, 所々に環流丘陵が見られる。段丘面を標高だけで区分すると, 現河床からの比高が10, 25, 35, 50, 70, 90, 100, 180mの8段に区分できる。この地域の隆起速度から考えると今から少なくとも4.5~9万年前から河道は活発に側方移動して穿入蛇行を形成してきたと推測できる。また注目すべきは, 上流の区間に見られる5つの環流丘陵のうち3つは100m段丘面, 2つは70m段丘面という高位の段丘面に対比できるということである。これは隆起速度から考えると今から2.5~5万年前と1.75~3.5万年前に形成されたことになる。

この区間には, 段丘面が多く存在する区間とほとんど見られない区間が存在する(第2図)。段丘面が多くある区間は, 少なくとも最近数万年間には下刻の際に側刻が卓越した生育蛇行が形成されていると考えることができる。それに対して段丘面のない部分は谷底幅が小さく, 現河道の両谷壁が垂直近くに立ってgorgeになっているので, 穿入の過程で流路をほとんど変動させなかった掘削蛇行が形成されていると考えられる。実際には段丘面の分布より, 掘削蛇行は0~3km, 6~8km, 20~22kmの3つの

区間にあり、他の部分は生育蛇行の区間であることが理解できる。調査区間の勾配と河道幅の縦断的な変化を第3図に示した。流量などの諸条件が縦断的に変化しないにも関わらず、勾配は局所的に急勾配の部分を持ち、全体としては指数関数的に減少している。河道幅は10km付近を境に急激に増大しており、実際には河道幅は20mほどから平均80mほどに4倍近く拡幅している。



第3図 調査区間の河道形状

a: 河道平面図 b: 河床縦断面図 c: 縦断勾配 d: 河道幅

縦断面図、勾配：建設省発行 1/2,500 地形図より作成

河道幅：同図より流路長 500m 間隔で測定




調査区間において縦断的に変化するのは、河床、河岸の地質だけであるが、勾配の指数関数的な減少、10kmを境にした河道幅の急激な変化と、このような地質の変化との対応関係は明瞭には見られない。このような勾配や河道幅の変化や、生育蛇行と掘削蛇行の分布を規定する要因を明らかにするために、穿入蛇行河道の流路変動様式を規定するプロセスを

解明することを目的として、調査区間における河道形状、具体的には河床形態、河床構成物質、流路変動様式などの縦断的な調査を行った。以下で、まず河床形態の分類と記載を行いその分布の特徴を明らかにした。

Ⅲ 河床形態の分類と縦断的分布

1 4つのタイプの河床形態

河床物質は主に砂岩の巨礫や大礫と泥岩の細礫から構成されており、河床の状態は調査区間において縦断的に異なる。ただし、それぞれの地域における河床物質の粒径は、母岩である砂岩層や泥岩層における節理の入り方などの条件が類似しているために、比較的よく揃っているという特徴をもつ。主な河床構成物質である砂岩は、粒径や礫の形状、存在形態によって実際には三つに大別できる（第4図）。一つは径1mを越す巨大な岩石（岩塊）である。上流側になめらかな面があり、下流側にスプーンでえぐられたような窪みがある形状をしている。この窪みは洪水時に岩塊の下流で流れが渦を巻くことで形成されたと考えられ（小玉ほか、1993）、長期間運搬

Mobility of bed material	Characteristic of bed material
LOW	<ul style="list-style-type: none"> · $d > 1\text{m}$ · Block of rock 
	<ul style="list-style-type: none"> · $d : 1\text{m}$ · Big boulder 
HIGH	<ul style="list-style-type: none"> · $d < 1\text{m}$ · Gravel or Boulder 

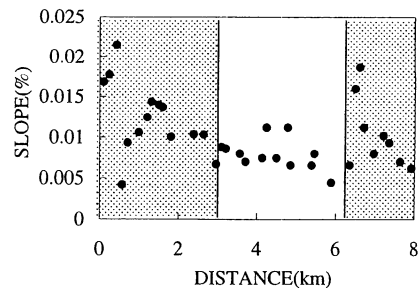
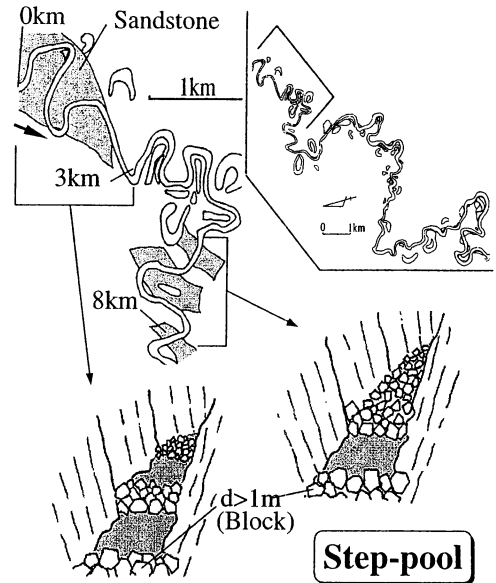
第4図 河床構成物質の3つのタイプ

されないで、現在の状態のままで侵食され続けてきたことを示している。二つめは径1m前後の巨大な礫（巨礫）である。比較的円摩された形状であることから、運搬されていると考えられる。しかし、礫同士は強くかみ合っていることから、発生頻度の小さい大洪水時にのみ運搬されていると考えられる。三つめは径0.5m以下の比較的小さなもの（礫）で、通常の出水によって容易に運搬されていると考えられる。

これらの物質が河床に多様な河床形態を形成している。河道プロセスと河床形態の関係を明らかにするために、調査区間に存在する河床形態を、平面形状と構成礫から4つのタイプに分類して特徴を記載した。

1) Step-pool 河床形

縦断的に見た場合に、礫の集積部分（ステップ）と淵（プール）が繰り返して配列している2次元的な階段状の河床形である（第5図、写真2）。直線部や湾曲部に関わらず同様の形状で形成されているが、湾曲部の方がステップが密に存在する傾向がある。直線部におけるステップの前縁から次のステップの前縁（ここでは単位河床形と呼ぶ）までの距離は河道幅の10～15倍程度で、およそ100～150mほどであ



第5図 Step-pool 河床形

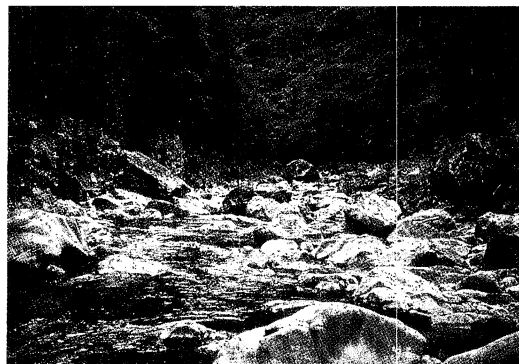


写真2 Step-pool 河床形
 (左) 全貌：上流を見る (右) 河床を構成する岩魂の様子：上流を見る

り、ひとつのステップの比高は1.5～2.5mほどである。場所によってはステップ部分の長さだけで100mに及ぶものも存在する。

ステップを構成している物質は、上述した径1m以上の砂岩の岩塊である。このような岩塊は、側壁から直接崩落した物質であり、互いに強くかみ合ってステップを形成している。河床に露出する岩盤に岩塊が引かかっていることから、このようなステップは容易には破壊されず、いわば河床の一部となっていると考えられる。このような岩塊が側壁から供給されるためには、河岸の構成材料が砂岩である必要があり、実際に Step-pool は砂岩が優勢な地域に分布している。Step-pool 区間の勾配は0.01～

0.02に分布しており、平均的には0.013程度と急である。

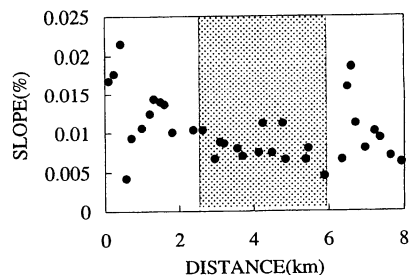
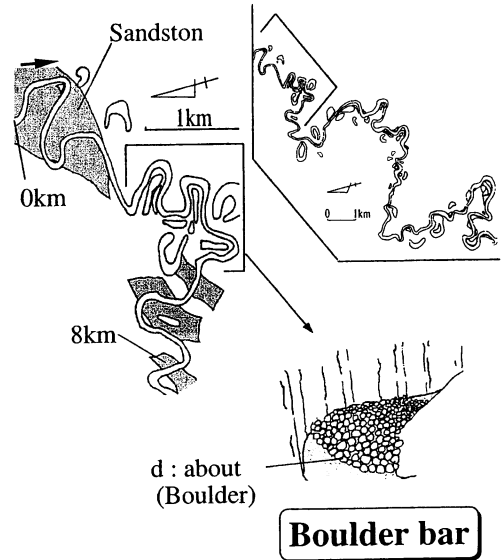
2) Boulder bar 河床形

巨礫から形成されている砂礫堆で(第6図、写真3)、横断的に非対称で蛇行湾曲部凸岸側の部分が最も高く、凹岸部に淵が存在する。Step-pool が2次元的な河床形であるのに対して、Boulder bar は縦断的にも横断的にも起伏をもつ3次元的な河床形である。湾曲部において発達が良い。

Boulder bar は上述の径1m前後の砂岩の巨礫によって構成されている。細粒物質が水裏側にわずかに堆積している他はすべてこの巨礫から成っており、インプリケーションして互いにかみ合っている。河床には岩盤が露出しており、この巨礫はわずか一層程度の厚さで河床を覆っている。

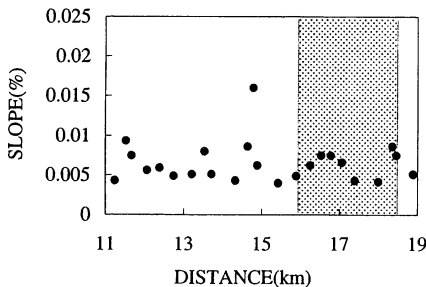
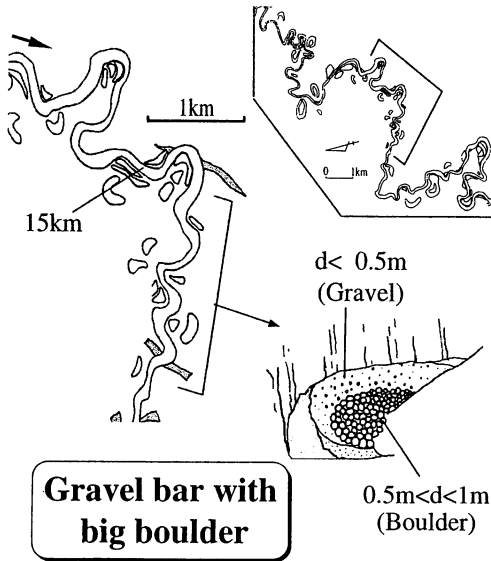


写真3
Boulder bar 河床形
(上) 全貌：上流を見る
(下) 河床を構成する巨礫の様子：上流を見る



第6図 Boulder bar 河床形

Boulder bar の構成材料が巨礫であることから、この河床形は大洪水時に変形を受けると考えられる。しかし、形成される位置やおおよその平面的な形状は通常の砂礫堆のように湾曲部の流れに対応しているために、湾曲部の形状が変化しない限り大きくは変化しないと考えられる。この区間の勾配は0.01程度で Step-pool 区間に比べて緩傾斜である。



第7図 Gravel bar with big boulder 河床形

3) Gravel bar with big boulder 河床形

2)と同じような砂礫堆河床形だが、砂礫堆上での平面的な分級が明瞭に見られるのが特徴である(第7図、写真4)。蛇行湾曲部凸岸部には巨礫の集積部分があり、その他の部分は礫によって構成されている。湾曲部や直線部に問わず形成されており、直線部では交互砂礫堆のような形状になっている。

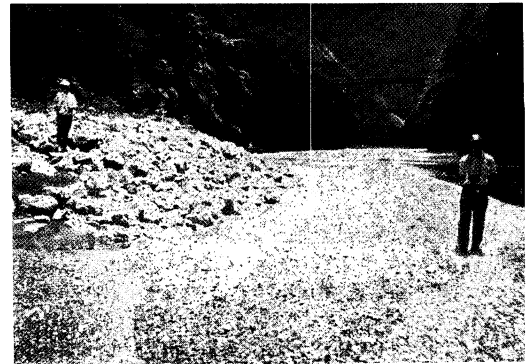
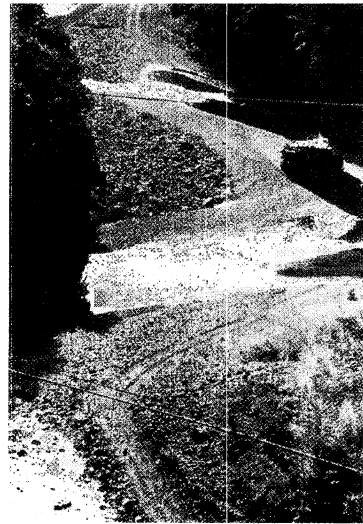
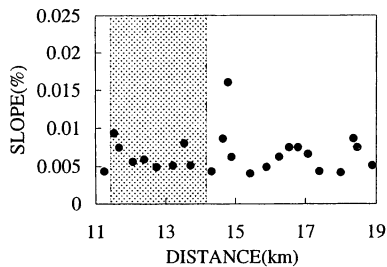
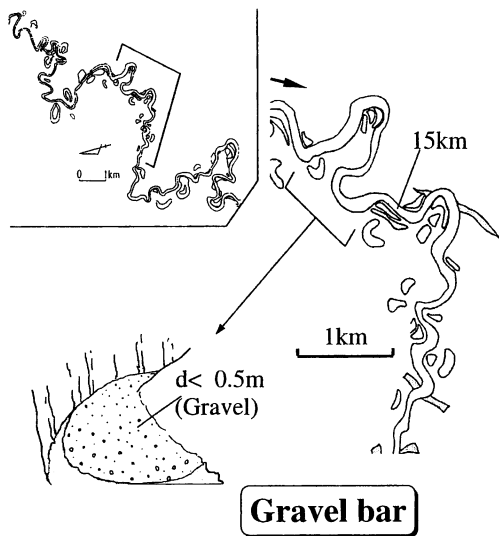


写真4
Gravel bar with big Boulder 河床形
(上) 全貌：上流を見る
(下) 河床を構成する巨礫の様子：上流を見る

直線部における単位河床形の長さ(砂礫堆の波長)は河道幅の3~4倍程度である。

凸岸側の集積部分は径0.5~1m前後の巨礫で構成され、その他の部分は径0.5m以下の礫から成っており、巨礫の集積部分とその他の部分との境界は明瞭に存在する。集積部分にある巨礫は Boulder bar と同じようにかみ合っており、容易には破壊されない部分となっている。それに対して礫の部分は通常の出水でも容易に運搬される。河床は礫に覆われており岩盤は露出していないが、その礫層の厚さは数m程度である。この区間の勾配はややばつつきがあるが0.007程度で、Boulder bar 区間よりさら



第8図 Gravel bar 河床形

に緩勾配である。

4) Gravel bar 河床形

2)と同じ砂礫堆河床形であるが、横断的な起伏は小さく比較的平坦である(第8図, 写真5)。これは、一般的な礫床河川に見られる砂礫堆といってよい。湾曲部では停止砂礫堆が形成されており、直線部には交互砂礫堆が形成されている。単位河床形の長さは(砂礫堆の波長)は河道幅の4倍程度である。

Gravel bar with big boulder のような凸岸側の巨礫の集積が見られず、径0.5m以下の礫のみで構成されている。礫はインプリケーションしているが、通常の出水によって容易に運搬される。平面的な形状は湾曲部の形状によって規定されており、洪水による変化はさほど見られない。横断的な形状は様々な条件によって変化するが、ここでは一般的に蛇行



写真5 Gravel bar 河床形

(左) 全貌：上流を見る

(右) 河床を構成する礫の様子：上流を見る

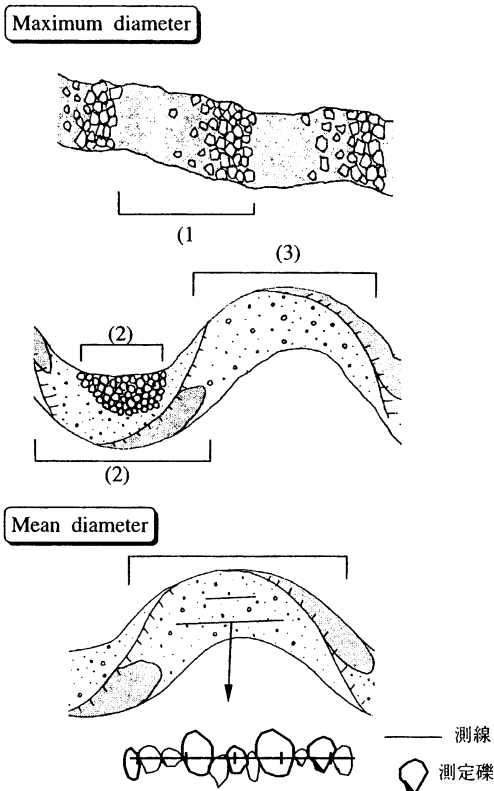
湾曲部凹岸側に傾斜している。河床は Gravel bar with big boulder と同じように礫に覆われており、岩盤は露出してない。この区間の勾配は0.005程度と緩く、上述した3つの河床形区間に比べてばらつきが小さく平均的である。

2 河床形態の縦断的分布

1) 河床物質の測定

上述した4つのタイプの河床形態は、河床物質の違いによって分類できる。そこで、このような河床形態の分布の特徴を明らかにするために、河床物質の縦断的な調査を行った。河床を構成する物質の粒径は、個々の河床形態においては比較的良好に揃っているため、単位河床形において粒径が大きいと見られるものから10個選んで中径を測定した(第9図)。これを平均したものを最大粒径とした。また、河床

を構成する物質の代表として最大粒径をとることの妥当性を評価するために、所々で平均粒径も測定した。測定方法は単位河床形において線格子法を用いて20個サンプリングして、その中径を平均したものを平均粒径とした（第9図）。格子の間隔は測定



第9図 河床物質の測定法

最大粒径：大きい方から10個の中径を測定して平均する
Step-pool では(1)の区間/Boulder bar では(2)で示した二ヶ所の部分/Boulder bar, Gravel bar は(3)の区間でそれぞれ測定

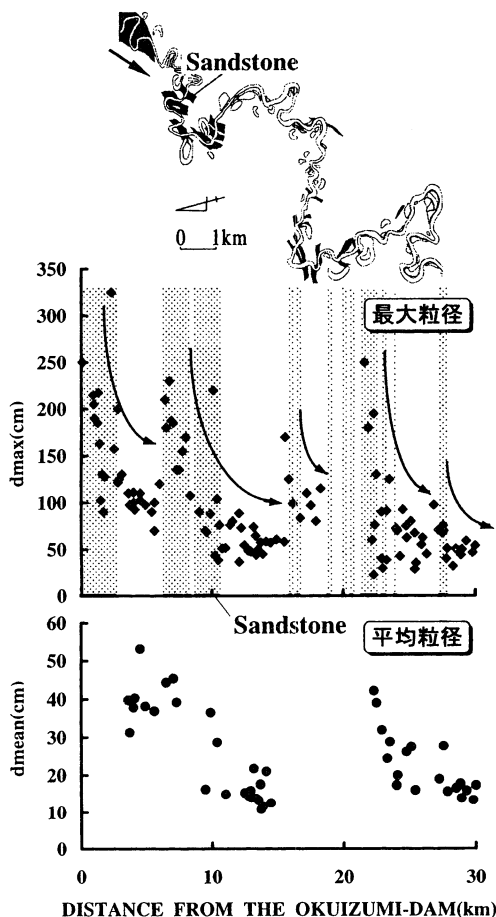
平均粒径：線格子法により20個測定して平均する

すべき河床に存在する最大粒径よりも広くとった。1本の測線で測定数が20個に満たない場合、複数の測線を設けてサンプリングした。最大粒径は調査区間に存在するすべての単位河床形において測定したが、平均粒径については Step-pool 以外の河床形においていくつか測定した。また、Gravel bar with big boulder の場合は、一つの単位河床形において礫の集積部分とその他の部分の二ヶ所で最大粒径と

平均粒径とを測定した。

2) 最大粒径の縦断的变化によって規定される河床形態

最大粒径と平均粒径の縦断的变化を第10図に示した。両者の傾向は比較的類似しており、個々の河床形において例外的に粒径の大きなものはなく、よく揃っていることがわかる。そこで以下では、最大粒径を個々の河床形態を構成する河床物質の代表として扱い議論を進めていく。

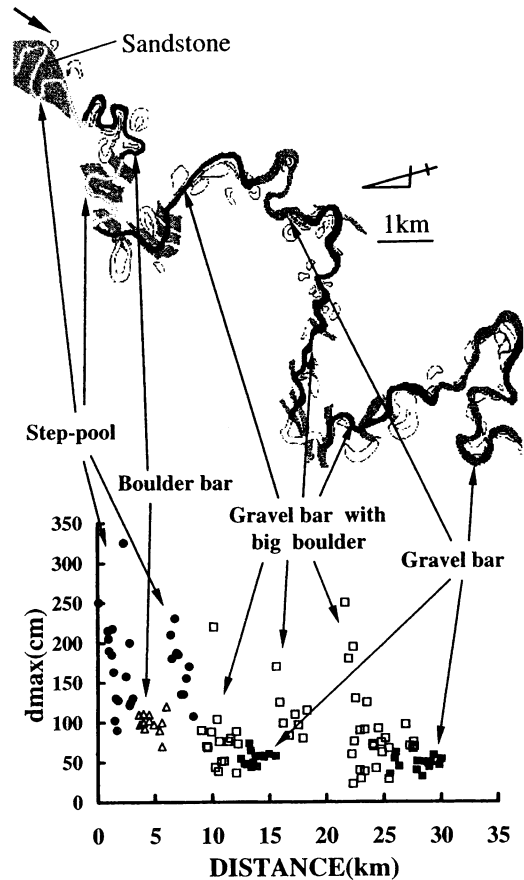


第10図 最大粒径と平均粒径の縦断的变化

最大粒径は河岸が砂岩から成る地域で最も大きく、そこから急激に粒径が減少することが明瞭に示されている（第10図）。砂岩が卓越する地域の河岸から河道内に径1m以上の岩塊や、ところによっては径

5 mにも及ぶ岩塊が崩落しており、そのような物質が河床に存在している。崩落物質の大きさは、基盤岩層の層厚と節理の間隔に規定されており、厚い砂岩層の場合にはより大きなものが生産される。岩塊は層理や節理に沿って割れて崩落しており、崩落した岩塊も弱線に沿って割れやすいという特徴をもつ。実際に河床には運搬される過程で破碎された証拠となる割れ円礫（小玉，1990）が見られる。一方泥岩の地域では、砂岩地域と同じような規模の崩壊地があっても、母岩自体がすでに細かく破碎されているために、粗大な物質は生産されない。わずかに崩壊地直下に岩塊が存在することもあるが、そのような泥岩の岩塊は非常に脆く、破壊されやすいため河床にはほとんど見られない。調査区間では、砂岩の地域が河床物質の供給域になっており巨大な岩塊が供給されるが、割れやすい砂岩であるという特徴をもつため、供給点がないとわずか数kmの間に粒径は減少して礫になることが明らかになった。また、大井川全域で生産される土砂がこのような特徴的な性質をもつために、調査対象区間の上流や支流からは礫ばかりが流入しており、Step-pool を埋積するような物質は礫で、支流が合流する地点には礫の堆積によってダムアップされているところも見られる。このことから、調査区間の上流や支流から流入する流送物質の大半は礫であると考えられる。

河床物質の縦断的な変化に規定されて河床形態がどのように変化するのかを明らかにするために、最大粒径の縦断的な変化と前述したような4つの河床形態との関係を示した（第11図）。この図から、岩塊の供給源である砂岩の地域にはStep-poolが存在し、その下流にBoulder bar, Gravel bar with big boulderが配列して、さらに下流にGravel barが連続していることが明らかになった。Step-poolは0～3 km, 6.2～8.3km区間にあり、Boulder barはその間の3～6.2kmに存在している。Gravel bar with big boulderは8.3～12.5km, 15～24.5km区間に広く分布しており、27～27.7km区間にわずかに存在する。Gravel barはこれらの下流の区間に配列しており、12.5～15km, 24.5～27km, 27.7～31.5mの区間に分布する。このように最大粒径が減



第11図 河床形態の縦断的分布

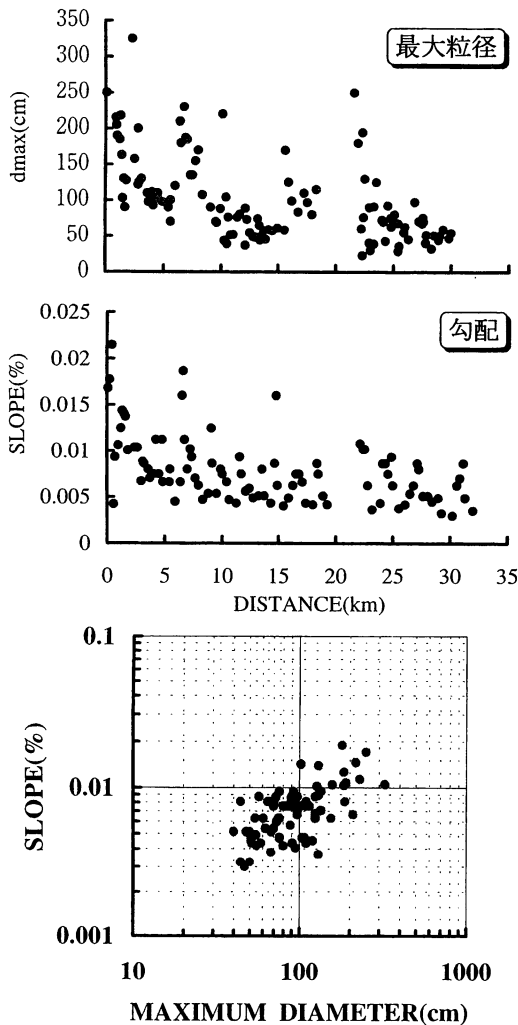
少するのにもなって、河床形態も順次変化することが明らかになった。

最大粒径の減少は、実際には河床に存在する粗粒な物質（岩塊、巨礫）の量の減少を示している。供給源付近では最大粒径が大きく粗粒な物質が多量に存在するが、流下するに従って粗粒なものは破碎されて粒径を減少するために最大粒径は小さくなり、粗粒な物質の量自体も次第に減少する。つまり、最大粒径の減少に規定されて縦断的に変化する4つの河床形態は、実際には粗粒な物質の存在量の変化に規定されて配列していることになる。

3) 最大粒径と勾配の関係

粗粒な物質は河床の粗度の大きさを規定すると考えられる。ある区間に流入する物質の量と、流出す

る物質の量が等しくなっている、動的平衡状態にある河川では、粗度が大きい河床の区間において、水と土砂を流送する際に凹凸によって流れが乱されて余分なエネルギーを消費するため、それを補うように勾配が急になることが示されている(杉浦・池田, 1993)。前述したように河床形態の違いによって勾配が異なることが示されたことから、勾配は河床構成物質によって決められる粗度の大きさの違いによって規定されていると考えられ、一種の平衡状態にあ



第12図 最大粒径と縦断勾配の対応関係

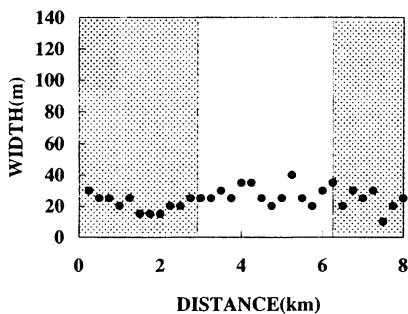
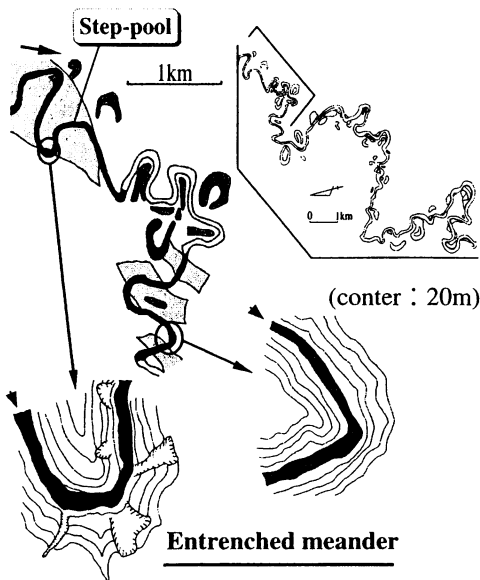
ると考えられる。そこで、最大粒径と勾配についての関係を調べた(第12図)。その結果、最大粒径と勾配には良い対応関係があることが確認された。このことからこの区間の勾配は上流から供給される物質を、下流へと流送できるような勾配で平衡状態になっていると考えられる。現在の河床を覆う河床物質の層厚は数m程度と薄く、下刻の過程で形成された段丘面は侵食段丘であることから、実際には侵食平衡勾配になっていると解釈できる。

IV 河床形態によって異なる流路変動の様式

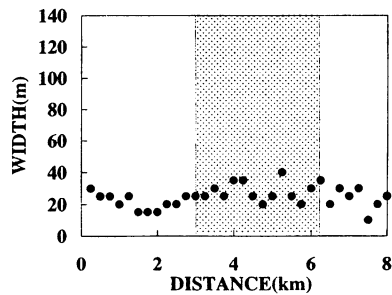
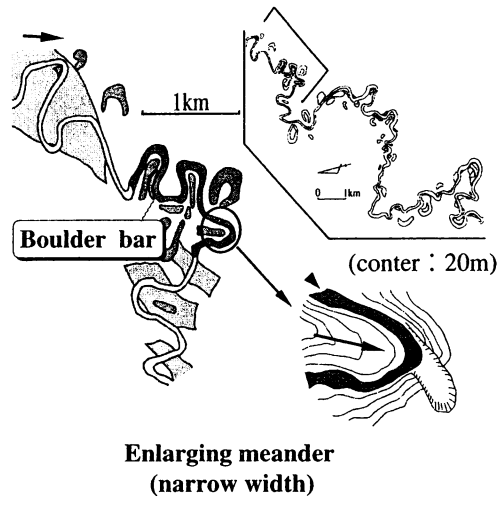
穿入蛇行には掘削蛇行と生育蛇行が存在する。掘削蛇行は側方侵食より下刻が卓越しており、下刻に伴う蛇行河道の平面形状の変動はほとんどない。生育蛇行は下刻の際に側方侵食が同時に生じて、蛇行流路の平面形状は下刻とともに変化していく。このような流路変動の様式は、河道内でどのような流れが生じているかに強く影響されると考えられる。河道内の流れは、前述したような河床形態の差異によって異なると考えられることから、流路変動様式は河床形態によって異なることが予想される。そこで以下では、河床形態と、流路の変動様式がどのような対応関係にあるのかを示し、その縦断的な分布を明らかにする。

1 Step-pool 区間に形成される掘削蛇行

Step-pool の区間の河道幅は15~30mと狭く、急傾斜した河岸をもつ峡谷(gorge)になっており、掘削蛇行を呈している(第13図)。掘削蛇行は側刻しないで下刻だけが続いているため、その区間の河岸には段丘面が存在しない。Step-pool が形成されているのは0~3km区間、6.2~8.3km区間であり、段丘面の分布(第2図)からこの区間に段丘面はほとんどなく、少なくとも数万年間掘削蛇行の様式で河道が変遷してきていると考えられる。20~21km区間にも段丘面は存在せず掘削蛇行を呈しているが、ここには大井川ダムがあるためにもとの河床の状態はわからない。



第13図 Step-pool 区間に存在する掘削蛇行



第14図 Boulder bar 区間に存在する増幅型生育蛇行

増幅型生育蛇行の特徴で、ここでは河道幅が小さい増幅型生育蛇行として分類した。

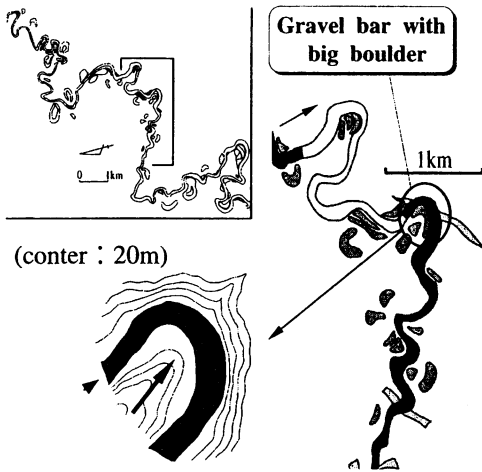
2 砂礫堆河床形区間に形成される生育蛇行

1) Boulder bar 区間に形成される増幅型生育蛇行

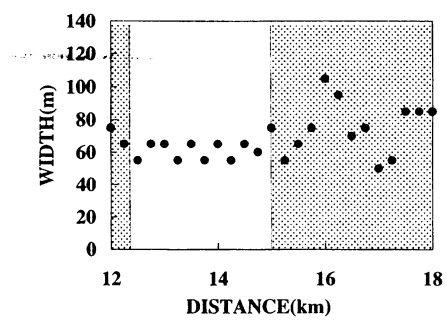
Boulder bar の区間の河岸には多数の段丘面があり、蛇行切断によって形成される環流丘陵が存在している。つまりこの区間には下刻の過程で側方に活発に流路を変動してきた生育蛇行が形成されている(第14図)。生育蛇行の流路の変動方向は、段丘面の配列から、一般流下方向に対して直交しており、蛇行振幅を増大する方向に変動している。このような生育蛇行をここでは増幅型生育蛇行(Enlarging meander)と呼ぶことにする。蛇行波長に対する蛇行振幅が2倍以上に及び、河道幅が20~40mに対して蛇行振幅が500m程度と大きいことがこの区間の

2) Gravel bar with big boulder 区間に形成される増幅型生育蛇行

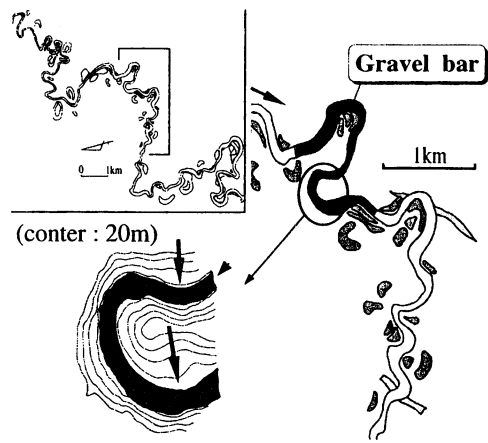
Gravel bar with big boulder 区間の河岸には段丘面が多数存在しており、その配列から Boulder bar の区間と同じように、蛇行振幅を増す方向に流路が変動する増幅型生育蛇行が形成されていることがわかる。河道幅は50~120mと広いが、湾曲部ごとのばらつきが大きく、転向点では局所的に狭くなっている(第15図)。Boulder bar 区間に比べると蛇行波長に対する蛇行振幅が小さく、河道幅に対する蛇行振幅も小さいという特徴をもつ。ここでは河道幅の大きい増幅型生育蛇行として分類した。



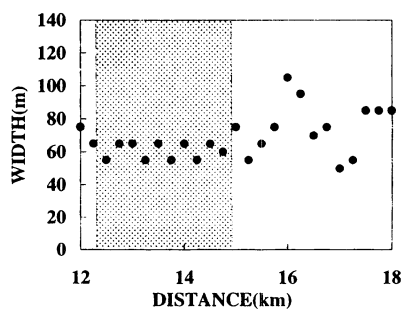
**Enlarging meander
(wide width)**



第15図 Gravel bar with big boulder 区間に存在する増幅型生育蛇行



Migrating meander



第16図 Gravel bar 区間に存在する並進型生育蛇行

3) Gravel bar 区間に形成される並進型生育蛇行

Gravel bar 区間は段丘面の配列から、上述したような蛇行振幅を増大する方向には流路は変動しておらず、一般流下方向に平行に変動していることがわかる(第16図)。ここではこのような変動様式を並進型生育蛇行(Migrating meander)と呼ぶ。この区間の河道幅は60~100m程度と広く、あまりばらつきがなく比較的一定している。

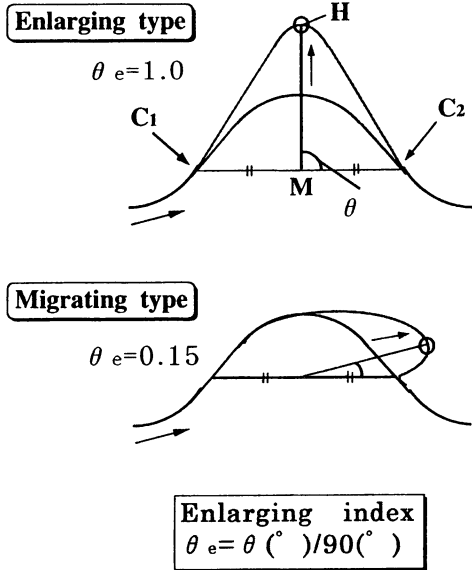
3 流路変動様式の縦断的变化

上述したような掘削蛇行と、3つのタイプの生育蛇行は河床形態の違いによって規定されていると考えることができる。前述したように河床形態は河床

物質の縦断的变化にもなって連続的に配列していることから、流路変動様式も連続的に変化していると考えられる。ここでは流路変動様式の規定要因を明らかにするために、その縦断的な分布と河床形態、河床物質の縦断的变化との対応関係を明らかにする。

流路変動様式の縦断的变化を明らかにする際に、掘削蛇行に関しては側方移動が認められないということで容易に分類することができるが、生育蛇行に関しては流路変動を示す指標を導入して区別する必要がある。そこで増幅指標(Enlarging index)を定義して、調査区間に存在するすべての湾曲部の流路変動様式を数値によって表現した。この指標は掘削蛇行区間においても測定した。掘削蛇行に関しては、流路が変動していることがこの指標の前提条件であるために実際には意味をもたない数値となるが、比較を行うために測定をした。

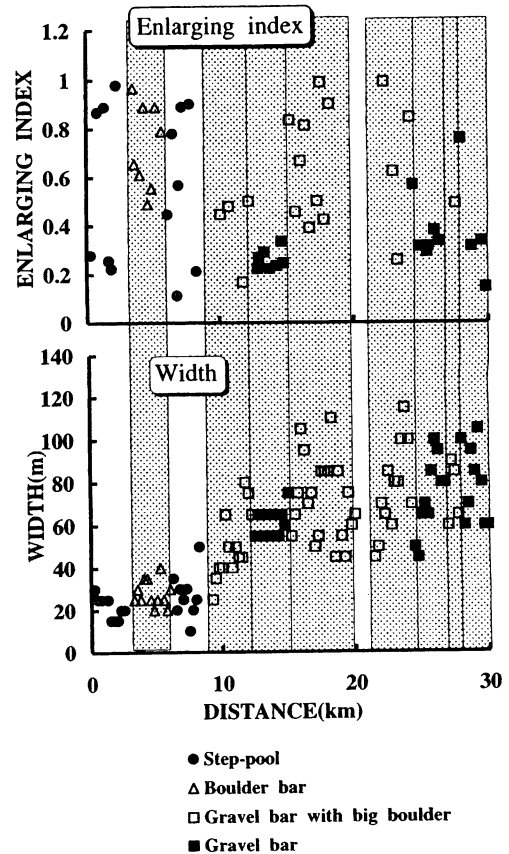
増幅指標は、流路の増幅方向への変動の大きさがある角度比で表現しており、1に近いほど増幅の程度が大きいことを示す。具体的には（第17図）、ま



第17図 増幅指標 (θ_e) の定義図

ず任意の湾曲部を選び河道中心線を引く。次に河道中心線上の上流側と下流側の転向点 (C_1, C_2) をとり、二点を結ぶ直線 C_1C_2 を引き、その中点 M をマークする。さらにこの区切られた湾曲部の曲頂部、つまり偏角が最大になるような点を H としてマークする。そして、点 M と点 H を結ぶ直線 MH をとり、直線 C_1C_2 と直線 MH が成す角を $\theta(^{\circ})$ とする。この θ を 90° で割って無次元化したものを増幅指標 θ_e と定義する。任意の湾曲部において、振幅を増大する方向の流路の変動様式が卓越している場合、 θ は直角に近くなり増幅指標が1に近くなるが、並進する方向が卓越している場合、 θ は小さくなり増幅指標は0に近くなる。ただしこの数値は流路形状が直線に近い場合、点 H をとる際の誤差が大きくなるという欠点をもつ。そこで、ここでは蛇行波長に対する蛇行振幅の大きさが $1/5$ に満たないものに関しては除外した。

このように測定した増幅指標の値と河道幅の値を、横軸に距離をとって縦断的に示し、河床形態との関係を調べた（第18図）。この図より河床形態と流路

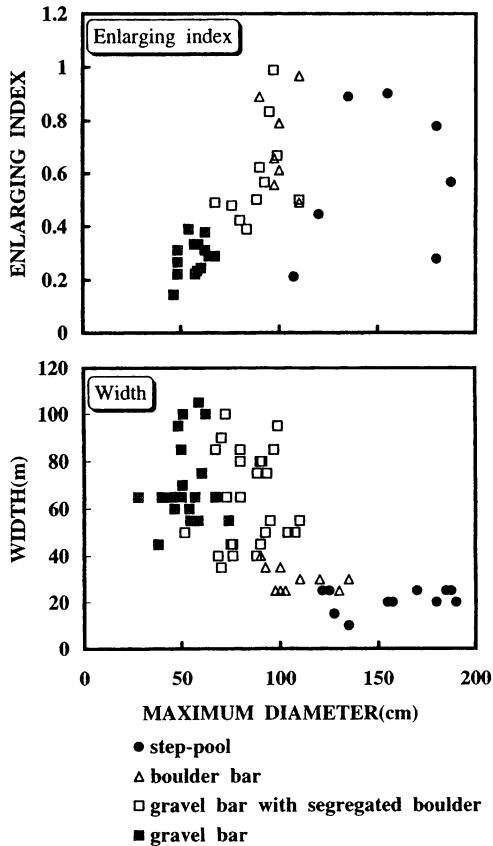


第18図 増幅指標と河道幅の縦断的变化

変動様式の対応関係が明らかになる。Step-pool の区間では増幅指標はばらついており、傾向はなにも見られないことがわかる。Boulder bar の区間では増幅指標が $0.5 \sim 1$ の間に分布しており、Gravel bar with big boulder の区間でも $0.4 \sim 1$ の間に分布しており、増幅の方向に流路が変遷していることがわかる。また河道幅は前者の方が狭く、後者の方が広いことがわかる。それに対して Gravel bar の区間では増幅指標がほぼ $0.2 \sim 0.4$ の間にあり、並進する方向に流路が変遷したことがわかる。このことから河床形態の縦断的な配列と流路の変動様式の縦断的な配列は一致していることが明らかになった。河床形態は河床に存在する粗粒な物質によって規定されていることから、最大粒径と流路変動様式には何らかの対応関係あると考えられる。そこで最大粒径に対する増幅指標、河道幅の関係と、河床形態の

関係を示した(第19図)。

Step-pool の場合, 最大粒径は 1 m 以上に分布しており, 河道幅は狭く, 増幅指標とは相関がないことがわかる。それに対してその他の砂礫堆河床の場合



第19図 最大粒径と増幅指標, 河道幅の対応関係

合, 最大粒径は 0.3~1.2m に分布しており, 粒径の減少にともなって河床形態が Boulder bar から Gravel bar with big boulder, Gravel bar と順次移行していることがわかる。増幅指標, 河道幅は最大粒径とそれぞれ良い相関を示しており, 河道幅に関してはばらつきが大きい右下がりの傾向があり, 増幅指標に関しては右上がりの傾向があることが明らかになった。

以上のことから流路の変動様式は, 河床に存在する粗粒物質の存在量によって決められる河床形態とよい対応関係があることが明らかになった。そこ

で河床形態の違いによって流れの形態にどのような違いが生じるかを検証するために蛇行水路実験を行った。

V 粗大な物質の多少によって流路変動様式が異なる理由を探る検証実験

1 目的

現地調査によって河床形態は 4 つのタイプに大別できた。それらの河床形態は, 河床を構成する粗大な物質によって区分される。Step-pool は長時間運搬されずに河床に残留している岩塊によってのみ構成されており, Boulder bar は容易には運搬されない巨礫によってのみ構成されている。Gravel bar with big boulder は巨礫と, より細粒の礫によって構成されており, Gravel bar は細粒の礫のみから構成されている。蛇行流路の変動様式は, このような河床形態の違いによって異なることが明らかになった。河床形態によって河道内の流れのパターンが制御される結果として変動様式の違いが生じたと考えられるが, 実際河川において洪水時の流れの違いを検証することは困難である。そこで河床形態の違いによる流れのパターンの違いを検証することを目的とした水路実験を行った。実験では水路の平面形状, 勾配, 流量を一定として, 河床の形態のみを粗粒物質の存在状況によって制御し, それぞれのケースにおける流れのパターンの違いを明らかにした。

2 実験条件

湾曲部における平面的な流れのパターンを明らかにすることを目的とした地形実験であるために, 幅の広い水路を用いて実験を行う必要がある。そこで実験では幅 4 m, 深さ 2 m, 長さ 160 m の大型の直線水路を用いた。この水路内に厚さ 15 cm ほどに実験材料を敷き均し, sine-generated curve に従った幅 1 m の河道を掘り込んだものを実験水路とした。水路を掘り込む際には 1/4 波長分の型枠を用いて順次掘削した。流路に沿った一波長の長さは 10 m であり, 直線距離では 9 m になるので曲率は 1.1 になる。蛇行水路は大型水路の上流端から 55 m 地点を 0 m として, そこから 11 波長分, 流路長 110 m の水

路を掘削した。水路の平面形状を固定するために、攻撃斜面側にあたる蛇行湾曲部の凹岸側に土のう袋を並べて侵食されないようにした。実際河川では、河床形態の違いによる河道幅の違いも認められていることから、湾曲部の凸岸側の側壁は固定せず、河道幅に自由度をもたせ（写真6）、流れのパターンとともに、河道幅の違いも調べた。実際には蛇行湾曲部で河道幅は最大約1.5mであった。実験中に砂礫堆が移動すると現象が複雑になるため、蛇行水路の最大偏角を約30°に設定して、移動砂礫堆が形成されないようにした。

実験材料としては径5mm程度までの細礫の混じった粗砂と、筑波山から採掘された径5~13mmと径30~40mmの碎石を用いた。合計3ケースの実験を行ったが、どのケースでも勾配は0.01で固定して流量20l/sを与えた。この流れは実際河川の1/70程度の模型として与えたので、実際には、幅70~



写真6 実験水路の概観（下流を見る）

100m、勾配0.01の河道に、径数cm~数十cmと径0.35~0.9m、径2.1~2.8mの河床物質があり、流量が毎秒1,400m³程度の流れが与えられたという条件になる。これは、実際河川では発生周期が数十年以上の大規模な出水時の流れにあたる。水深に対する幅が大きい流れであるので、直線水路であるなら移動砂礫堆が形成される条件になる。実際には蛇行湾曲部に停止砂礫堆が連綿と形成された。

3 実験方法と結果

1) 砂礫堆河床での流れ

実際河川において砂礫堆が形成されているような Boulder bar, Gravel bar with big boulder, Gravel bar 区間では側方侵食が卓越した結果形成される生育蛇行が生じていることが示された。そこで砂礫堆が形成されるような条件下においてそのような流れが生じるかを目的とした実験を行った。

通水した後、固定床の状態に0.15kg/sの速度で粗砂を投入して、水路床が見えなくなるまで河床を上昇させた。結果的には水路内に平均河床厚12cmほどで粗砂が堆積し、湾曲部には砂礫堆が形成され、集中と発散を繰り返すような流れが出現した。この条件で河床厚を固定して粗砂を循環させて動的平衡状態にし、平衡に達した状態を初期条件として実験を開始した。

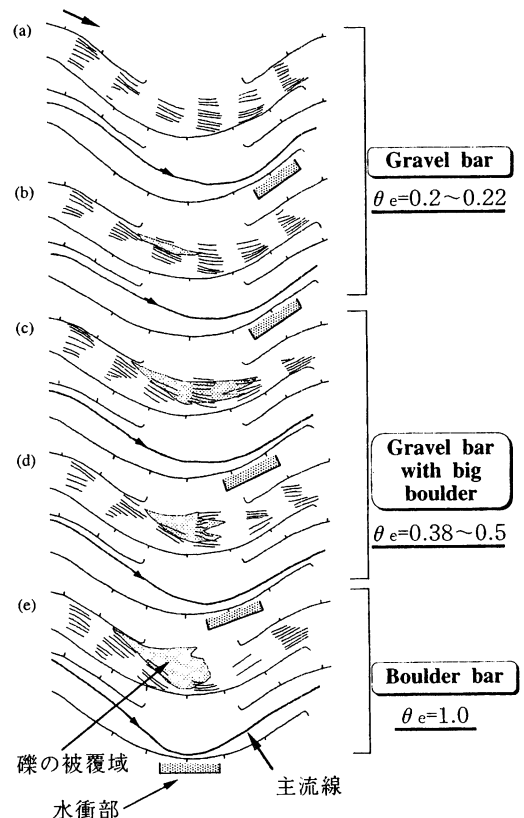
蛇行部分の上流端から45~55mの一波長区間を選び実験を行った。実際河川では粗粒な物質の量によって河床形態が異なり、流れのパターンが違うと考えられたので、実験においても粗粒な物質の量を変化させて、流れの状態がどのように変化するかを測定した。実際には、流向・流速、水面・河床横断面、河床平面の状態などを観測した。

実験手順としては、まず粗粒な物質が全くない状態で測定を行い、その後に実験対象区間の上流部に径5~13mmの白色にペイントした碎石をその場で集積が生じないように徐々に投入（約5g/s）して、湾曲部における粗粒な物質（礫）の被覆量を変化させて適宜測定を行った。碎石の粒径は、砂面上に単独で存在する場合は容易に運搬されるが、礫同士が集積すると容易には運搬されなくなるような大きさ

のものを選んだ。この実験を通して、粗粒な物質が全くない河床形態での流れから、粗粒な物質が河床をほぼ覆った形態での流れまでを再現することができた。実際には、礫が全くない状態（a：投入量0kg）から、礫が砂面上に点在する状態（b：投入量10kg）、礫が凸岸部にわずかに集積した状態（c：投入量40kg）、礫が凸岸部にかなり集積した状態（d：投入量60kg）、礫が湾曲部の大半を覆った状態（e：投入量100kg）までの計5ケースの状態の河床形態を与えて測定を行った。a, bは実際河川における Gravel bar 河床形, c, d は Gravel bar with big boulder 河床形, eは Boulder bar 河床形をそれぞれ想定していることになる。

実験の結果（第20-1図）、礫が存在しない、あるいは礫が点在するような状態の場合（a, b）、主流線は蛇行湾曲部の凸岸側に沿うように出現し、なめらかに下流へと連続しており、水流が最も強くあたっている水衝部が蛇行湾曲部凹岸の下流部に形成されたのに対して、礫の集積域がある場合（c, d, e）、被覆域が広がるほど凸岸部の礫の集積部の高まりが成長し、主流線が凹岸側に偏流してくの字型になり、水衝部が凹岸側の曲頂部付近に形成されるようになることが明らかになった。このように粗粒な物質の存在形態によって偏流の形態が規定され、水衝部の位置が決められることが理解された。また、河床がほとんど砂の状態（a, b）では、流れが蛇行湾曲部で発散して流路の幅が広がるのに対して、礫が河床の大部分を覆う場合（e）には、流れが凹岸側に強く偏流した結果、礫の集積部分が半離水し、流れの幅が数10cmほどに狭くなることが確認された。

水衝部の方向に流路が変動すると仮定して、その部分を曲頂部としてとり増幅指標を算出すると（第20-1図）、a, bのケースは $\theta_e=0.2\sim0.22$ となり、実際河川における並進型生育蛇行に相当し、c, dのケースは $\theta_e=0.38\sim0.5$ となり、河道幅の大きい増幅型生育蛇行に相当し、eのケースは水流の幅が凹岸側に制約されることから、河道幅の小さい増幅型生育蛇行にそれぞれ相当することになる。このことから砂礫堆河床の場合、河床形態の違いにより流れ



第20-1図 砂礫堆河床における流れのパターン
 礫の投入量：a)0kg b)10kg c)40kg d)60kg e)100kg
 上段：流向・流速；浮き子が1秒間に移動した軌跡をトレース
 下段：主流線と水衝部

のパターンが規定され、侵食作用が働くと考えられる水衝部の位置が異なり、流路の変動様式が規定されることが検証された。

2) 粗度河床での流れ

実際河川において、運搬されないような岩塊が存在する Step-pool 区間では、側方侵食が卓越していない結果として形成される掘削蛇行が生じていることが示された。このことから、この区間では砂礫堆河床に見られたような湾曲部における水流の偏流は、顕著ではないことが予想される。そこで、岩塊の存在する河床における流れのパターンを明らかにすることを目的とした実験を行った。

実際河川では岩塊が縦断的に分級されて大きな粗

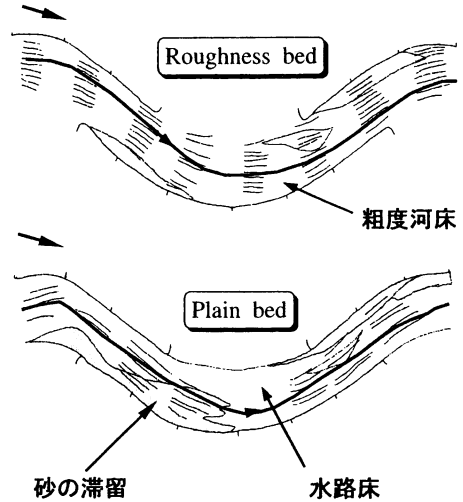
度をもった階段状の河床形を形成しており、各々の岩塊の集積域での粗度も大きくなっている。これらの形態は容易には破壊されないと考えられることから、岩塊の存在する地域はいわば粗度の大きな河床区間とみなすことができる。そこで実験では粗度の大きな河床を与えて Step-pool 河床形として想定し、そこでの流れの特徴を観察した。

実験には運搬されない岩塊として径30~40mmの碎石を使った。この碎石を幅1m、長さ10m（一波長分）のナイロン製のゴルフネット（2.5cmメッシュ）に8cm間隔でチェス盤状に張り付けて破壊されない粗度にした。このようにして作った礫のむしろを、平坦に均した砂面上に敷き詰めて実験を行った。

ここで注意しなければならないのは、このような大きな粗度を与えることによって有効ストリームパワーが低下してしまうことである。実際河川ではこの低下を補うために、このような粗度の大きい区間では勾配が急になっているが（第12図）、実験では勾配、流量を常に一定しているため、有効ストリームパワーの低下は直接流砂量の低下に現れることになる。実際に予備実験で勾配0.01、流量20l/sの粗度のない状態で運搬される流砂量を与えて実験を行った結果、礫のむしろによって与えた粗度は短時間のうちに埋積されてしまった。そこで本実験では、15~25m区間の一波長を選び、15mより上流側にある砂を排除して上流から運搬される流砂を断ち、運搬され得る量の粗砂を15m地点からを給砂して、その一波長区間を定常・等流状態にして実験を行った。

この実験の結果（第20-2図）、湾曲部には水裏側に剥離流によって形成される強制砂礫堆がわずかに生じたが、河床の岩塊によって流れが乱されるために、砂礫堆河床での実験で見られたような停止砂礫堆は形成されず、水流の集中、発散が生じないために偏流は起こらなかった。そのために水衝部は明瞭には見られず、側岸の侵食力が小さいことが示された。

また、砂礫堆が形成されない河床として、運搬物質がほとんどないような平滑固定床の状態での流れを予備実験で与えて流れのパターンを確認した結果（第20-2図）、粗度河床と同じような水流が生じて流れは湾曲部であっても偏流せず、明瞭な水衝部は



第20-2図 粗度河床(上)、平滑床(床)における流れのパターン
流向・流速；浮き子が1秒間に移動した軌跡をトレース

認められないことが示された。つまりこのような条件下でも、側岸侵食は卓越しないということが明らかになった。以上のことから、粗度の大きな河床では砂礫堆が形成されないために流れの偏流が生じず、側岸侵食が卓越しないということが検証された。

Ⅶ おわりに

穿入蛇行河川の流路変動を規定する要因を解明することを目的に、大井川中流域30km区間を対象とした現地調査と水路実験を行った結果、次のようなことが明らかになった（第1表）。

第1表 穿入蛇行河川の流路変動様式

Lithology	Sandstone / Mudstone dominant		
	large ← bed material size → small		
Characteristic of bed material	large ← amount of extremely large material → small		
Bed configuration	Step-pool	Boulder bar	Gravel bar with big boulder
			Gravel bar
Type of channel planform change	Entrenched	Enlarging	Migrating
	narrow	← channel width → wide	

- 1) 大井川の河床の骨格を構成しているのは主に砂岩である。この砂岩は粒径と形状によって岩塊、巨礫、礫の三つに大別できる。
- 2) 河岸に砂岩が露出している地域で砂岩の岩塊が河床に直接供給され、それが下流へ運搬される過程で数キロで破碎され、巨礫、礫へと急激に粒径を減少させる。
- 3) 河床には Step-pool (ステッププール)、Boulder bar (巨礫州)、Gravel bar with big boulder (巨礫集積部を伴う礫州)、Gravel bar (礫州) の4つのタイプの河床形態が存在している。これらの形態は河床構成物質の縦断的な変化に対応して連続的に配列している。
- 4) 流路変動様式は河床形態によって規定されている。Step-pool の区間には掘削蛇行、Boulder bar の区間には河道幅の狭い増幅型生育蛇行、Gravel bar with big boulder の区間には河道幅の広い増幅型生育蛇行、Gravel bar の区間には並進型生育蛇行がそれぞれ形成されている。
- 5) 大井川の穿入蛇行河川は、粗粒な物質によって河道プロセスが規定されて形成されているというデブリコントロール地形である。

謝辞

本研究は平成8年度筑波大学大学院地球科学研究科の修士論文を加筆・修正したものである。本研究を行うにあたり筑波大学地球科学系の地形分野の先生方には様々なご助言をいただき、特に山本憲志郎先生には格別の配慮をいただいた。筑波大学水理実験センターの方々にはお世話になり、特に飯島英夫技官には水路実験に際して大変お世話になった。現地調査においては、井川演習林事務所の大坪輝夫先生をはじめ、スタッフの方々に様々な便宜をはかっていただき、筑波大学自然学類の八木留美子氏、板倉雅子氏にはお手伝いいただいた。ご協力して下さった皆様に深く感謝いたします。

引用文献

四紀研究グループ (1968) : 第四紀変動図。第四紀研究, 7, 182~187.

加藤照之 (1984) : 東海地方の地殻上下変動。第四紀研究, 23, 111~116.

河内伸夫 (1976) : 中国山地の穿入蛇行。地理学評論, 49-1, 43~53.

小玉美宇・小玉芳敬・池田宏 (1993) : 砂礫を伴う水流による巨礫の磨耗に関する実験的研究。筑波大学水理実験センター報告, 17, 31~44.

小玉芳敬 (1993) : 梓川と寒河江川における“割れ円礫”の存在比率について。筑波大学水理実験センター報告, 14, 109~114.

前田浩則 (1990) : 山間地の曲流河道における凸岸部への巨礫の集積-大井川中流部の事例とモデル実験-。平成元年度筑波大学自然学類卒業研究。

眞板秀二 (1988) : 破碎帯流域における荒廃溪流の動態に関する砂防学的研究。筑波大学演習林報告, 4, 21~127.

杉浦友宣・池田宏 (1993) : 山地河川勾配に与える河床の凹凸の効果に関する実験的研究。筑波大学水理実験センター報告, 18, 139~149.

藪地結吏 (1991) : 穿入蛇行河道側方移動に及ぼす河床・河岸の凹凸の影響。平成2年度千葉大学理学部卒業研究。

Braun, D. D. (1983) : Lithologic control of bedrock meander dimensions in the Appalachian Valley and Ridge province. Earth Surface Processes and Landforms, 8, 223~237.

Dury, G. H. (1954) : Contribution to a general theory of meander valleys.

American Journal of Science, 252, 193~224.

Dury, G. H. (1964 a) : Principles of underfit streams. United States Geological Survey professional paper, 452-A, 1~67.

Dury, G. H. (1964 b) : Subsurface exploration and chronology of underfit streams. United States Geological Survey professional paper, 452-B, 1~56.

Dury, G. H. (1977) : Underfit streams : retrospect, perspective and prospect.

River Channel Changes, 281~293.

Deshaies, M. and Weisrock, A. (1995) :

- Amplitude of incised quaternary meander and river-basins area in north-eastern France : palaeogeographic implications (in French). *Geodynamica Acta*(Paris), 8, 33~55.
- Davis, W. M. (1893) : The topographic maps of the United States Geological Survey. *Science*, 21, 225~227.
- Hack, J. T. and Young, R. S. (1959) : Intrenched meander of the North Fork of the Shenandoah river, Virginia. United States Geological Survey professional paper, 354-A, 1~10.
- Harden, D. R. (1992) : Controlling factors in the distribution and development of incised meander in the central Colorado Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 102, 233~242.
- Hooke, J. M. (1990) : The linkages between bank erosion and meander behavior in gravel-bed rivers.
Department of Geography, Portsmouth Polytechnic. Working Paper No.14.
- Moore, R. C. (1926 a) : Origin of inclosed meander on streams of the Colorado Plateau. *Journal of Geology*, 34, 29~57.
- Moore, R. C. (1926 b) : Significance of inclosed meander in the physiographic history of the Colorado Plateau country. *Journal of Geology*, 34, 97~130.
- Rich, J. L. (1914) : Certain types of stream valleys and their meaning. *Journal of Geology*, 22, 469~497.
- Young, R. W. (1978) : Geological and hydrological influences on the development of meandering valleys in the Shoalhaven river catchment, southeastern New South Wales. *Erdkunde*, 32, 171~182.