

2. 河原の形成に関する地形学的研究 ——レクリエーションの場を確保するために——

- 第1章 はじめに
- 第2章 山地河川の特徴と研究課題
- 第3章 溪流の河原
- 第4章 磯床河川における砂礫堆形成とともに河岸の侵食
- 第5章 山間地の曲流河道における凸岸部への巨礫の堆積
- 第6章 穿入蛇行河道の側方移動に河床・河岸の凹凸が及ぼす影響
- 第7章 阿武隈川、郡山—福島間における急勾配区間の成因
- 第8章 富士山大沢における岩壠の発達について
- 第9章 砂礫を伴う水流による巨礫の摩耗に関する実験的研究
- 第10章 河原に関する雑感
- 第11章 河川環境研究の今後の課題

筑波大学地球科学系教授 高山茂美
筑波大学地球科学系助教授 池田宏
筑波大学農林工学系講師 真板秀二
筑波大学地球科学系助手 伊勢屋ふじこ

第1章 はじめに

河原はレクリエーションの場として将来その利用がますます盛んになるものと思われる。しかし、そのためには河原がどのように形成され、将来どのように変形するかを適切に予測しておく必要がある。

河原は河床の一部で水面上にある部分である。河川は山地河川と平地河川とに大別されるが、平地河川における河原の形成については砂礫堆の研究や蛇行河道の変遷、あるいはポイントバーや氾濫原の形成に関する研究などによって、かなり明らかにされてきた。実際、大都市近郊の高水敷は運動場やゴルフ場として利用が活発である。

一方、山地河川の河原には岩盤の露出した河原のように、砂礫が堆積した平地河川の河原と比較して、ひと味違った面白さがある。そのため、レクリエーションの場として山地河川の河原は将来その価値が高まるものと予想されるが、山地河川の成り立ちに関する研究はきわめて乏しい。

そこで、本研究ではとくに水流による土砂輸送に関する最近の研究成果に基づいて、山地河川における河原の形成を調べることとする。ただし、短期間に山地河川の動態を理解することは困難であるから、水路実験を適宜加えることとした。

第2章 山地河川の特徴と研究課題

1. 砂礫の輸送機械としての河川の仕組み

河川は水の位置エネルギーによって山地斜面から供給された砂礫を下流へ運搬する輸送機械であるとみなせる。河原の形成を理解するためには、河川の仕組みを理解することが必要である。河川の仕組みについては、実験室規模の流れと流砂の関係については、かなり明らかにされたといえよう。しかし、礫床河川については、砂床河川と比較すると流れと流砂の同時計測が困難なためもあって、いまだに不明な点が多い。

山間地の礫床河川ともなると、河床砂礫の淘汰が平地河川と比較してさらに悪いためもあって、その仕組みについては不明な点が多い。山地河川には、また、砂礫の淘汰が悪いというばかりでなく、河床や河岸に基盤岩石（岩盤）が露出しているという特徴がある。これは平地河川には見られない要素であり、山地河川における流れや流砂に及ぼすこの要素の影響を解明する必要があると考えられるが、従来の研究は少ない。

2. 本研究の目的と課題

本研究では、山地河川として大井川上流の渓流を主対象として、そこにおける流れと流砂、そしてその結果としての河原の形成について調べた。沖積河川の流砂はいうまでもなく山地河川から供給されるのであるから、沖積河川区間の将来を予測するためには、河川流域全体としての土砂収支の観点から輸送機械の成り立ちを理解する必要があるということも、山地河川を調べる理由である。

山地河川は山地斜面からの砂礫の供給量の時間的変動がきわめて大きいことが特徴である。砂礫供給量が多くて、河床が移動砂礫で覆われている場合に生じる土砂礫の輸送と、砂礫供給量が少なくて河川がいわば飢餓状態にある場合の土砂礫の輸送とでは著しい違いがある。

3. 多量の砂礫が運搬される河床での河原の形成

多量の砂礫が運搬される場合には、砂礫が垂直的・縦断的に分級されつつ運搬されること、この際、全体としては平坦床に近い河床を形成して流れても、詳細に見るときわめて低起伏の河床形が生じていてこと、先頭は礫で、小さな粒子ほど後方を流送されること、すなわち牛とカウボーイの位置関係に相当する動き方をすることが近年明らかにされてきた。このような状況の河川による河原の形成と変形を第3章で扱う。

4. 砂礫供給量が中程度の河川における河原の形成

砂礫供給量が中程度だと、それらの砂礫が河床で平面的に分級されて砂礫堆が形成される。砂礫供給量が少ない状態では固定している砂礫堆が、砂礫供給量が一時的に増大すると活発に移動し、側方侵食をして河道を拡幅する。第4章で、混合砂礫を用いた砂礫堆形成実験によって、流砂量の時間的変動が混合砂礫の縦断的分級に起因することと、流砂量の増大期に河岸侵食が盛んになることを明らかにする。

第5章、第6章では、大井川上流の接岨峡を対象とする。河岸（谷壁）を構成している岩盤の強度が低い区間、具体的には粘板岩の比率が高い区間では、川幅が相対的に広く、河床には砂礫堆が形成されている。このような区間では、湾曲部に集中した流れが下流へ発散するところで、大きな礫と細粒の砂礫とが二次流によって平面的に分級され、とくに粗大な礫が集積してアーマー・コートが形成される。この巨礫の集積体が水流を偏流させ、河道の湾曲を増大させる可能性について第5章で検討する。

一方、河岸を構成している岩盤の強度が高い区間、すなわち砂岩の比率が高く、しかも厚い砂岩層が卓越する区間では、川幅が小さく、河床には砂岩の岩盤が突出し、また谷壁から崩落した砂岩の岩塊が河岸に残留している。そのような区間では砂礫堆は形成されないか、あるいはきわめて不明瞭である。これは河床・河岸の岩塊が砂礫堆の形成を阻害するためで、砂礫堆が形成されない区間では河道位置が長期間にわたって固定している可能性がある。これを第6章で検討する。

5. 岩盤侵食河床の形成

第7章以下では岩盤侵食河床の特性について調べる。第7章では、岩盤侵食河床の縦断勾配が数万年間のあいだにどのように変化してきたかを、河岸段丘面などによって河川縦断形を復元することによって、岩盤侵食河床が動的平衡状態にあるかどうかを検討する。

第8章では、岩盤侵食河床の典型例として、富士山大沢と呼ばれる富士山の西側斜面に発達する谷における岩壙と呼ばれる特異な地形の成り立ちを明らかにする。

第9章では、岩盤侵食河床形がいったいどの程度の時間をかけて形成してきたものなのか、ある

いは将来どのように侵食されていくのか、このような問題を解決するための基礎研究として、岩盤の侵食速度を実験によって検討する。

6. おわりに

第10章では、研究代表者の高山茂美が、内外の河原を見てきた経験を踏まえて、河原の過去・今・未来と河原の利用について述べる。

第11章では、文部省在外研究員として米国の河川を多数巡査してきた池田 宏が、米国における河原の利用の現況と、グランド・キャニオンにおいて進められている河川環境研究を紹介し、最後に本研究を総括して今後の河川環境研究の課題を提言する。

第3章 溪流の河原

1. はじめに

溪流の河原はキャンプの場所として好適な条件を備えている。しかし、溪流はまた時として状態を急変させる。新しく山に入り込んでくる都市の人々が河原でキャンプを楽しむためには、溪流でどのようなことが起こり、どのような時にどのような河原がつくられるのか、また現在の河原は河床の変化過程のどの段階にあるのかを十分に知っておくことが必要である。そこで、ここでは大井川上流の東河内沢において10数年間継続してきた河原の観測結果に基づいて溪流における河原の形成について考察する。

2. 東河内渓流の平面形態と段丘（段丘状堆積地）の分布

山間地渓流は谷の平面形に影響されて屈曲し、峡谷部と拡幅部とが繰り返される。峡谷部では岩盤が露出し河床に砂礫はほとんど見られないが、拡幅部では多量の砂礫が供給される洪水時に砂礫が堆積して、渓流の谷幅全体が河原となる。その後、砂礫の供給が絶たれると、河原は侵食され段丘状地形として残される（写真-1）。



写真-1 溪流の河原の変形

3. 洪水時の流送物質と段丘状堆積地（河原）の形成

侵食された河床は一般に大きな礫が累々としていることが多い。これに対して、多量の砂礫が供給された時に生じた河原は主として径数cmの細粒の砂礫で構成されており、大規模な洪水時には細粒物質が多く流送されることを示している。たいていのキャンパーが段丘状の河原の上にテントを張っているのは、そこが細粒の砂礫で覆われていて平滑なためである。

東河内沢では河原の高さは河床から5mほどもある。しかし、高さが高いからといって安全とは一概にはいえない。山地からの砂礫の供給が盛んな東河内沢では5mの高さにある河原が一夜にして砂礫に埋められてしまうといった変化が生じる（図-1）。なお、河原の高さの変動幅は溪流毎に異なっていることを認識することが重要である。

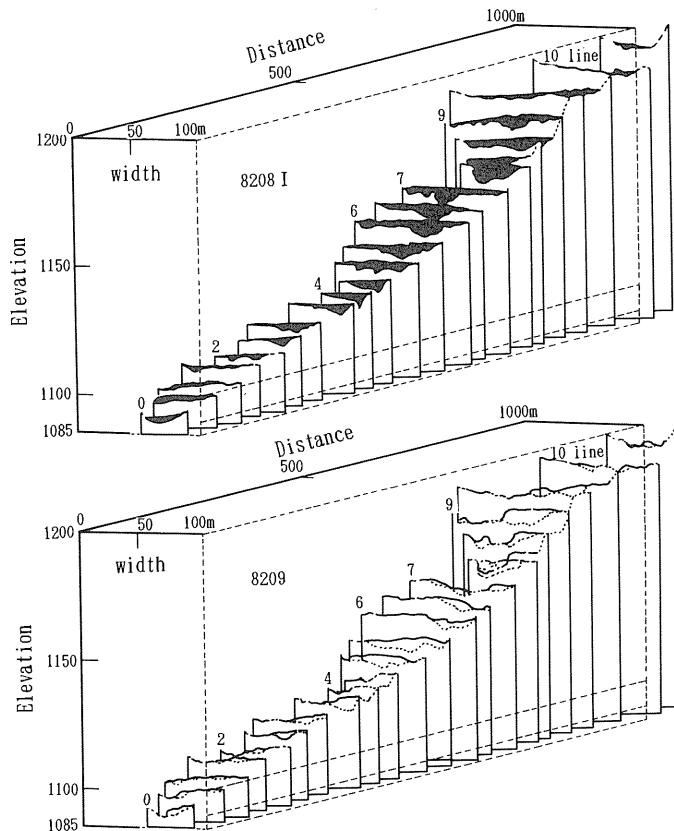


図-1 変形されやすい山間地渓流の河原

4. 段丘状堆積地（河原）の安全性を知るための樹木年代学手法

形成された河原の上にさらに砂礫が堆積しなければ、河原には植生が進入してくる。木本は年輪という時間情報を持っているので、河原の上に生えている樹木の年輪を調べることによって河原の形成時を知ることができる。東河内沢では河原に生えるヤマハンノキがとくに有効である。樹木に見られる年輪の異常や不定根の年輪を調べることによって河原のやや長期間の生い立ちを読みとることも可能である。

5. おわりに

以上、ここでは人間の利用という面から河原を考えた。しかし、河原は動植物にとっても重要な場であることを忘れてはならない。河川管理が構造物中心のハードな対応から環境にやさしいソフトな対応に重心を移そうとする姿を見せており、河川地形学と生態学とを結び付けた新たなディシプリンによる河原の理解も今後必要になってくるであろう。

第4章 磯床河川における砂礫堆形成にともなう河岸の侵食

1. 砂礫堆と河岸侵食

砂礫堆は磯床河川で一般的に見られる河床形である。砂礫堆上の流れは集中と発散とを繰り返しながら蛇行して河岸を侵食する。したがって、そのような河川における河原の形成を理解するためには砂礫堆の変形・移動特性を解明する必要がある。ところが、砂礫堆を調べた従来の実験ではもっぱら粒の揃った一様粒径砂礫が用いられてきた。実際河川の運搬物質は大小様々な大きさの砂礫の混合物であるから、従来の実験的研究成果は不十分である。そこで、ここでは混合砂礫を用いた実験を行って、一様粒径砂礫の場合との違いを明確にすることにした。

2. 混合砂礫を用いた砂礫堆の形成実験

実験には礫と砂との混合物（二粒径混合砂礫）を用いて、最初に固定壁直線水路において礫と砂との混合比率のみを変化させて砂礫堆形成に及ぼす影響を調べ、ついで側岸侵食性水路を用いて砂礫堆の特性によって河原の形成がどのように異なるかを調べた。給水量および給砂量は全ての実験で一定に保った。

3. 砂と礫との混合比率によって異なる砂礫堆の移動特性

実験の結果、砂ばかりの場合には波長の揃った砂礫堆が形成され、それらは一様に下流へ移動した。礫の混合比率を20%にすると礫が砂礫堆の背面で局所的に集積する場合が生じた。礫の集積体が生じている間は砂礫堆は停止した。礫の混合比率が40%になると礫の集積体の形成は一層顕著になった。礫の混合比率が60%にまでなると砂礫堆背面上の礫の集積体は堅固になり、容易に破壊されなくなつた。このため、砂礫堆はほとんどの期間、固定するようになった。

4. 混合砂礫の縦断的分級に起因する流砂量の時間変動と砂礫堆

ところが、給水・給砂を定常的に与えているにもかかわらず、水路内で時折急激な洗掘が生じて河床に蓄積されていた砂が放出され、一時的に礫の移動性が高まって礫の集積体が変形したり解消されるという、一様粒径砂礫の場合には見られない現象が生じた（図-2）。このような流出砂礫量の顕著な変動は礫の比率を80%にした場合にはさらに顕著になった。以上の実験結果から、礫の混合比率の高い流れにおいては流砂量が一時に増した時には砂礫堆は前進するが、流砂量が少ない期間には砂礫堆は停止していることが多いことが明らかになった。

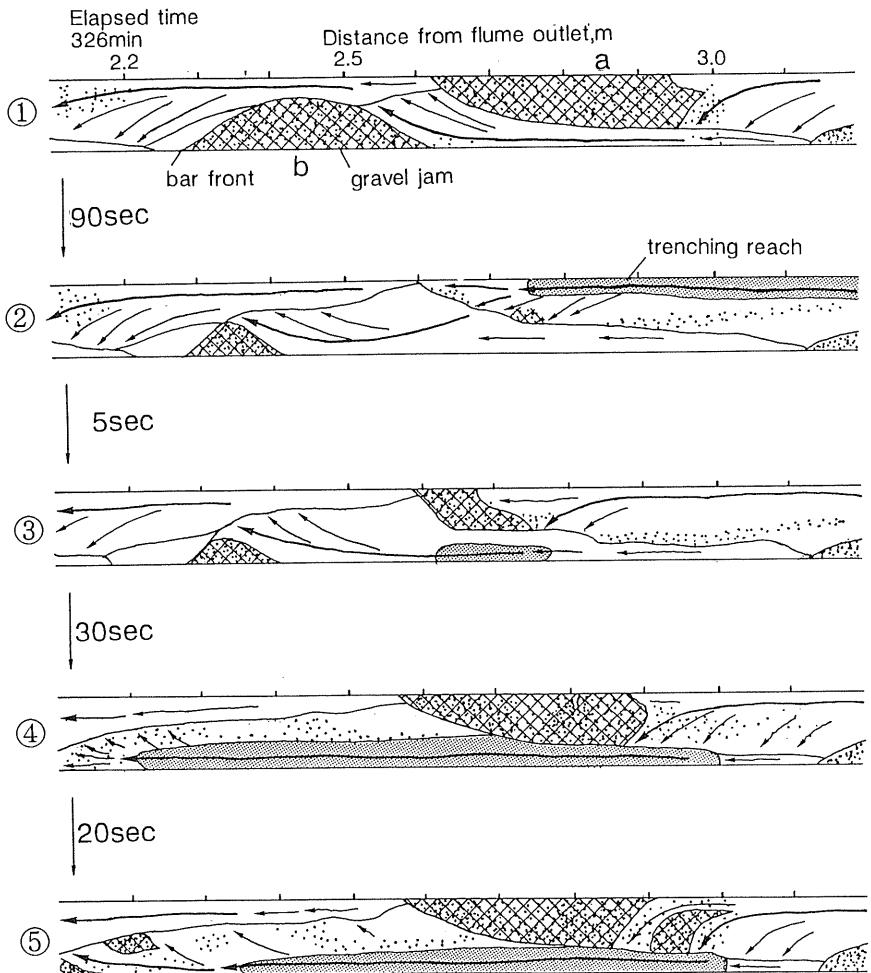


図-2 突発的に変形する混合砂礫河床の河原

5. 側岸侵食性水路実験

そこで、次に側岸侵食性水路を用いた実験によって、砂礫堆が前進している時と停止している時とで、河岸侵食速度や様式がどのように異なるかを調べた。侵食河岸の物質としては砂に2.5%のベントナイトを混ぜた混合物を用いた。礫の混合比率は60%とした。

6. 河岸の円弧状侵食期と直線的侵食期

実験の結果、砂礫堆が停止している期間には、水衝部が固定しているために、左右岸交互に円弧状に河岸が侵食された。ところが、流砂量が増大する期間には、停止していた砂礫堆は移動を開始し、水衝部が砂礫堆の前進につれて次第に下流へ変化するため、河岸は直線的に侵食されて河道は拡幅した。

河岸侵食速度は流砂量の少ない円弧状侵食期より、流砂量の多い直線的侵食期のほうが速いことが明らかになった。

7. 川を見る眼

本研究の結果、混合砂礫が輸送される場合には、上流から供給される砂礫量や水量が大きく変化しないとしても、流砂量が時間的に大きく変動することが明らかになった。山地河川では上流から供給される流量や流砂量が時間的にきわめて大きく変化するから、実際の河岸侵食と河原の形成過程はさらに複雑なものと考えられる。

したがって、実際河川の河原の将来を予想するためには、流砂量の長期的な変動を予測する必要がある。いいかえれば、それぞれの河川がいったいどのような状態にあるかを見抜く必要がある。このためには、ある一地点における流れと流砂を見る物理的な目に加えて、やや長期的な時間スケールで総合的に川を見ることのできる目が要求される。

第5章 山間地の曲流河道における凸岸部への巨礫の集積

1. 大井川上流の接岨峡

第4章で得られた実験成果を踏まえて、山間地の峡谷部において河道がどのように変化して河原が形成されるのかを調べた。調査対象河川は大井川上流の接岨峡と呼ばれる峡谷区間である。調査区間では上流の井川ダムなどの建設後は大出水時にのみ日平均流量で毎秒 500 トン程度の出水が 2、3 年に 1 度生じている。縦断勾配は 1/100～1/200 程度、川幅は 40～200m 程度であるが、場所による変化が著しい。



写真-2 大井川上流、接岨峡の穿入蛇行区間の河原

2. 河原の発達した唐沢周辺の河道

川根唐沢付近の屈曲の連続している区間には砂礫が堆積して生じた河原が発達している（写真-2）。そこで、この区間について河原の分布と河原の構成物質の特徴を詳細に調べた。この区間の河床勾配は 1/200、河道幅は 60～130m である。河道周辺を構成している基盤岩石は四万十層群の砂岩・頁岩互層である。

3. 高い河原と低い河原

空中写真判読によって、この区間には高さの違う2段の河原があることが分かった。河道湾局部の凸岸側に分布する河原とそれに接して下流側に分布する河原である。前者は高くて巨礫が集積しているのに対して、後者は砂質堆積物からなり、低くて狭い（図-3）。

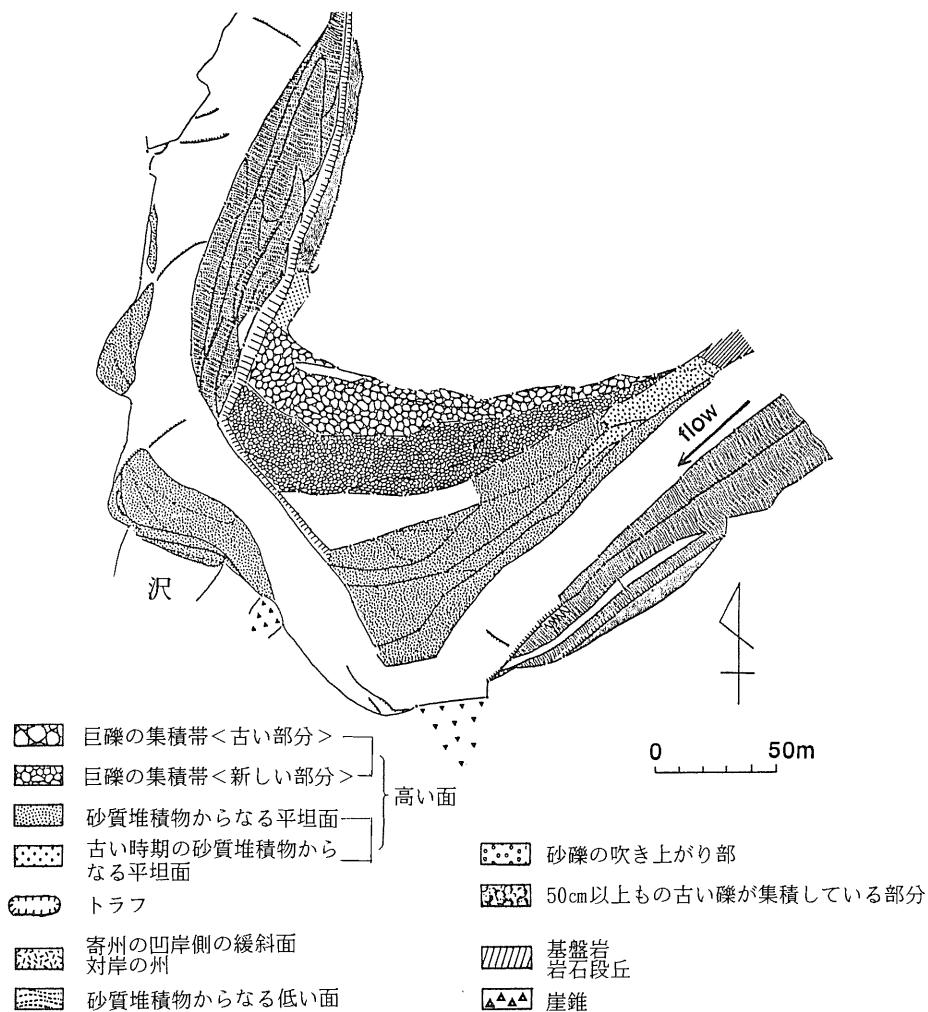


図-3 蛇行湾曲部の河原

4. 河原の形成に関する模型実験

凸岸部に発達している高い河原について、平面測量、横断測量、礫の粒径分布調査および礫の配列を測定して、それらの河原がどのような流れによって、いつどのように形成されたかを考えた。出水時の流れを観察・観測することはできないので模型実験を行った（写真-3）。実験では水平縮尺を1/500、垂直縮尺を1/63、すなわちひずみ比を8としたひずみ模型を製作して流砂の粒度組成のみを変化させた。



写真－3 蛇行河道湾曲部における河原の形成に関する模型実験

5. 平面的分級による凸岸部への巨礫の集積

実験の結果、河道の屈曲部（湾曲部）で生じる強い二次流によって砂礫は平面的に分級され、砂は凹岸側へ運搬されるが、礫はより水流表面の主流に影響されて凸岸部へ運搬され、そこで集積して易動度を減じて堆積して寄州を形成した。巨礫が集積した凸岸部の高い河原はこのようにして形成されたものと考えられる。

6. 河道の側方移動と河原の成長

平野の蛇行河川の河道変遷は一般に蛇行が下流へ移動する方向に生じることが多いが、大井川の峡谷区間では巨礫が集積して生じた河原が流れを偏流させる結果、第5章の実験によって示されたように、蛇行の振幅を一方的に増す方向に河道が移動し、それにつれて河道が成長していくものと考えられる。大井川が側方移動しつつ下刻してきた結果生じた河岸段丘の平面的分布は河道がその屈曲度を増してきたことを証明している。

7. 山地河川は大きな礫を運搬している？

河岸段丘は昔の河原の名残である。本研究の結果、山間地の蛇行河道では河原は運搬物質中のとくに大きな礫の集積場所であることが分かった。ということは、段丘堆積物は河床を運搬されている物質の大きさを示していないということである。このことは重要な知見であろう。山地河川は大きな砂礫を運搬しているものと誤解している人が多いからである。山地河川の仕組みを理解するためには、河原に残されている砂礫と河床を運搬している砂礫との違いを見抜くことが必要である。

第6章 穿入蛇行河道の側方移動に河床・河岸の凹凸が及ぼす影響

1. 生育蛇行と掘削蛇行

蛇行状に屈曲する谷の中を流れている穿入蛇行には、両岸の谷壁が対称的なものと、谷の横断形が非対称なものがある。前者は掘削蛇行、後者は生育蛇行と呼ばれている。地盤の隆起速度が大きいか、川の下刻速度が速い場合には掘削蛇行すなわち、河道が側方移動しないで、もっぱら下刻のみが生じるため河道の平面形は時間的に変化しない蛇行が生じ、反対に下刻がゆっくりしているとその間に河川が側方移動するから生育蛇行（つまり、下刻しつつ河道の平面形が次第に変換する蛇行）になると考えられてきた。このような考え方から、河岸を構成している岩盤が硬い（侵食されにくい）場合には、掘削蛇行になるとされている。

2. 掘削蛇行と生育蛇行が交互に配列する接岨峡

大井川上流の接岨峡は穿入蛇行の典型的な例といえよう（図-4）。ここでは、掘削蛇行と生育蛇

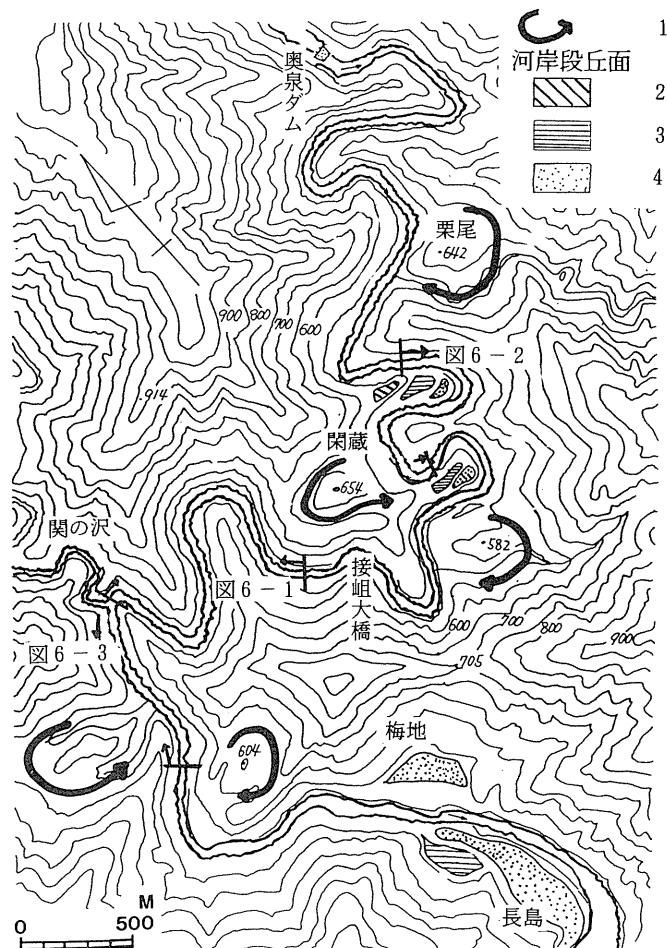


図-4 大井川上流、接岨峡の穿入蛇行

行区間とが同一河川の隣接する区間に交互に存在するから、地盤の隆起速度の影響ではないと考えられる。この区間内で流量や流砂量は一定と見なされるから、下刻速度も大差ないとみてよいだろう。したがって、接岨峡における掘削蛇行と生育蛇行の違いは河岸を構成している岩盤の性質を反映しているものと予想される。

3. 基盤岩石の岩質と蛇行のタイプとの関係

接岨峡では、生育蛇行は泥岩優勢の砂岩頁岩互層地域（閑蔵区間）に、また、掘削蛇行は砂岩が主である区間（接岨峡区間）に対応していることが多い。それゆえ、硬い砂岩が河岸を構成している区間では、河道の側方移動速度は小さいから掘削蛇行となり、逆に侵食されやすい頁岩が河岸を構成している区間では生育蛇行になっていると考えることができる。しかし、例外もある。

4. 砂礫堆の発達している生育蛇行区間

砂礫堆の発達した河道区間では巨礫の凸岸側への集積によって高い河原が形成され、河道は側方移動することは第5章で詳しく述べた通りである。川幅が比較して大きいが、これは河岸を構成している基盤岩石が軟らかというばかりでなく、河道の側方移動が盛んであるためでもある。

5. 掘削蛇行区間のおろしがね河床

掘削蛇行区間の河床は比較的狭く、河床には砂岩の岩盤や径数mに達する岩塊が累々としているので、おろしがね河床と呼んだ（写真-4）。もし自分が礫になってこの区間を運搬されたとしたら、河床に露出している硬い砂岩に衝突して、あたかも大根がおろしがねでみじんに砕かれるように、こなされてしまうだろうというイメージから名付けられたものである。



写真-4 おろしがね河床では砂礫堆は形成されない

6. おろしがね河床では砂礫堆が形成されない理由

接岨峡を流れる水量や流砂量は上下流にはほぼ一定しているものとみなせるから、生育蛇行区間では砂礫堆が形成されるのに、掘削蛇行をしてきたおろしがね河床区間で砂礫堆が形成されないのはなぜ

かを水路実験によって調べた。その結果、生育蛇行区間と等量の流量・流砂量の条件下でも、河床に大きな凹凸が存在すると、それが流れの集中・発散の大局的なパターンを壊すため、砂礫堆は形成されなくなることが明らかになった（写真-5）。

おろしがね河床でも、もし多量の砂礫が供給されて岩盤河床が砂礫で覆われれば、河床には生育蛇行区間と同様に砂礫堆が形成されて河岸が侵食されるだろう。実際に、接岨峡では、大出水によって砂礫が供給された時におろしがね河床が砂礫で埋積されたことがあるが、数年すると砂礫は流送されてしまって、以前と同様のおろしがね河床に戻ったという。このことは、接岨峡における流砂量が少ないことが掘削蛇行の発達を促していることを示している。

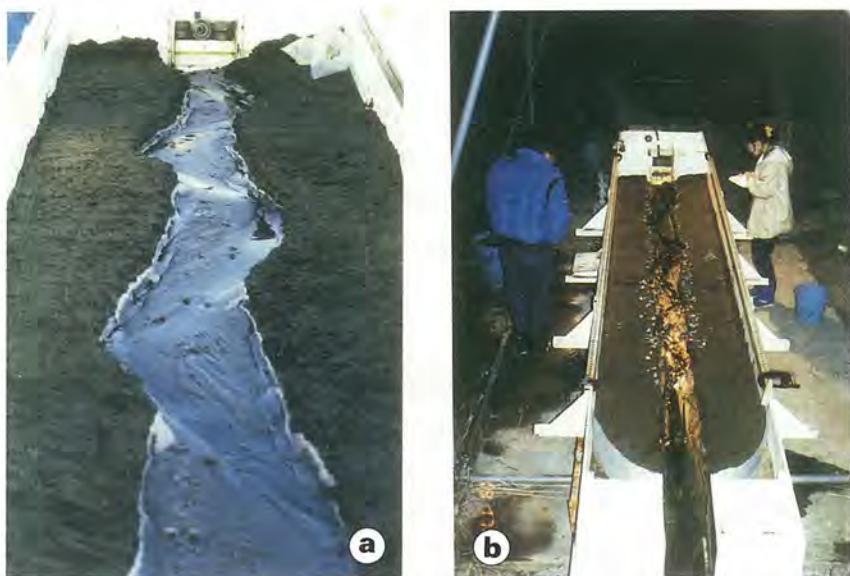


写真-5 河床に岩塊がある河道は側刻しにくい

7. レクリエーションの場としてのおろしがね河床

砂礫の堆積した河原はレクリエーションの場として馴染み深い。しかし、峡谷部のおろしがね河床も砂礫の堆積した河原とはひと味違った良さがあるようと思われる。ここには、オフ・ロードカーもモーター・ボートも入り込めない。

第7章 阿武隈川、郡山-福島間における急勾配区間の成因

1. 岩盤侵食河床の河原

岩盤が露出した河床は、砂礫が堆積した河原とは一味違ったレクリエーションの場として今後活用されるようになると考えられる。しかし、岩盤侵食河床の成り立ちや変化についてのわれわれの知見は乏しい。岩盤侵食河床は山間地河川ばかりでなく、人々の住む都市の近傍にも存在する。ここでは、そのような一例として阿武隈川中流の峡谷部の河原について調べた。

2. 阿武隈川中流の河川縦断形

阿武隈川は郡山盆地と福島盆地との間で峡谷をなしている。盆地を流れる区間では勾配は1/1000であるが、峡谷部では数倍急である。阿武隈川の河川縦断形は、その河岸に残されている河岸段丘面（かつての阿武隈川の河原）や支流の河岸段丘面あるいは支流と本流との間に生じている遷急点（河床勾配が急変する地点）などの高度分布から、最近数万年間という地質時代の間で基本的に一定していたことが明らかになった。すなわち、峡谷部の河床は次第に河床を侵食して低下してきたが、その縦断勾配はその間、ほぼ一定に保たれてきたということである。このことから、岩盤河床の勾配は平衡勾配ではなく、たまたまその大きさになっているものとみなしてきた従来の考えを検討する必要が生じた。

3. 峡谷部の岩盤河床

郡山盆地と福島盆地では阿武隈川は礫混じりの砂を運搬しており、砂礫が堆積して広い河原が生じている。しかし、峡谷区間では河床に花崗岩の基盤岩石が露出し、谷壁から崩落した岩塊が岩盤上に残留して、凹凸の大きな河床となっている（図-5）。岩塊の大きさは花崗岩の節理間隔の大きいことを反映して、径数mという大きさのものがある。

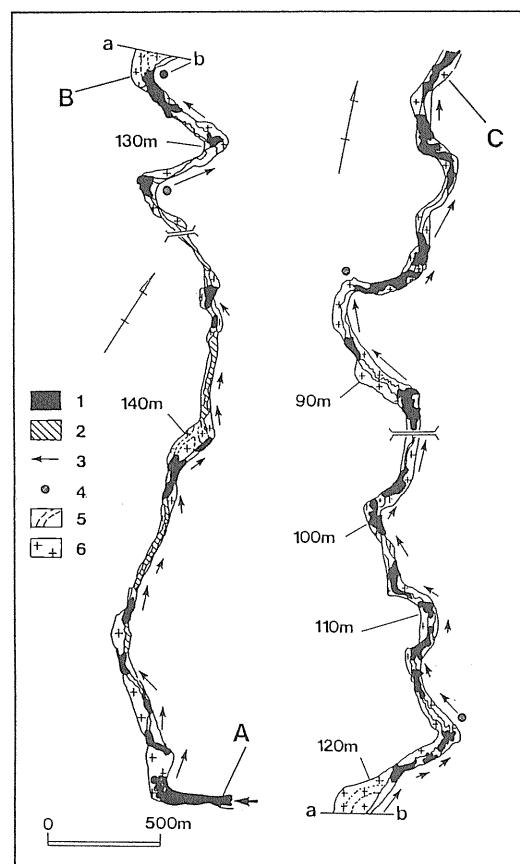


図-5 阿武隈川、郡山-福島間の峡谷部の瀬-淵河床

4. 峡谷区間の勾配が急な理由

峡谷区間の勾配が時間的に一定していること、つまり時間依存性がないということから、縦断勾配が上・下流と比較して数倍急な理由は、河床の凹凸が大きいためであると考えられる。すなわち、河床の凹凸によって水流のエネルギーが消耗させられるため、砂礫の輸送機械としては峡谷部の流れはきわめて効率が悪い。そこで、峡谷部では盆地部と同量の砂礫を輸送するために、急勾配になっているのであると考えられる。流量は盆地部と峡谷部とで大差ないから、川は勾配を大きくしてストリーム・パワーを大きくしているのであるというわけである。

5. 岩盤河床の凹凸が勾配に及ぼす影響に関する水路実験

水路実験によって、河床に移動しない凹凸を与えたときの影響を調べた。実験では水路に砂を流し平衡勾配を作り出した後、岩盤河床の凹凸を模擬するべく鉄のチェーンを砂床の一部区間に敷き詰めて、下流端の堰を低下させ、再び平衡勾配が形成された後に、チェーンを敷いた区間の勾配が敷かなかった区間と比較してどの程度異なるかを調べた。ここではチェーンを用いた点が従来にない新たな手法である。すなわち、砂床に礫などを置くと、混合効果のために礫は移動させられてしまうため、良い結果は得られなかつたのである。

河床にチェーンがあることによって、水流のもつエネルギーは消耗され、砂礫の輸送効率が落ちるために、チェーンを敷いた区間の勾配は急になった。チェーンを敷いた区間の勾配の大きさは水路下流端の堰を段階的に下げても平衡状態では常に一定値となった。このことは、河床の凹凸の大きさが一定していれば、峡谷区間の勾配が一定していて、河床が低下しても時間的に変化しないことを示している。

6. 岩盤河床の凹凸の程度と勾配との因果関係

本研究からは、峡谷部の河床勾配が盆地部のそれと比較して数倍急なのは、盆地部の河床と比較して岩盤河床の凹凸がきわめて大きいためであり、もし岩盤河床でもその凹凸がさほど大きくなれば、盆地部と峡谷部とで勾配はそれほど違わないであろうと考えられる。

本研究では、岩質による節理間隔の大きさを反映して岩盤河床の凹凸の程度が決定され、河床勾配はそれを反映しているという考え方をしたが、そうではなく、あらかじめ決まっている河床勾配に対応して岩盤河床の凹凸の大きさが形成されるという可能性もある。そこで、第Ⅷ章では溶岩流を下刻した峡谷の地形を対象として、岩盤河床の形成を調べることとした。

第8章 富士山大沢における岩礫の発達について

1. 富士山大沢の岩礫

富士山の西側斜面には大沢と呼ばれる大規模な崩壊地から発する沢がある。この沢は1000年ほど前から次第に発達してきたものと考えられている。この間に源頭部の崩壊地から流出して下流へ流れた砂礫の量は 6,700万立方米に達するといわれている。

大沢の標高1260mから900mの区間には、上流からの多量の砂礫によって、ちょうどボブスレーのコースのように溶岩が樋状に侵食された区間があって、岩樋と呼ばれている。岩樋区間には、ゴルジばかりでなく、それとは対照的に砂礫が堆積してやや幅が広い区間（堆積地と呼ぶ）が挟在する（図-6）。

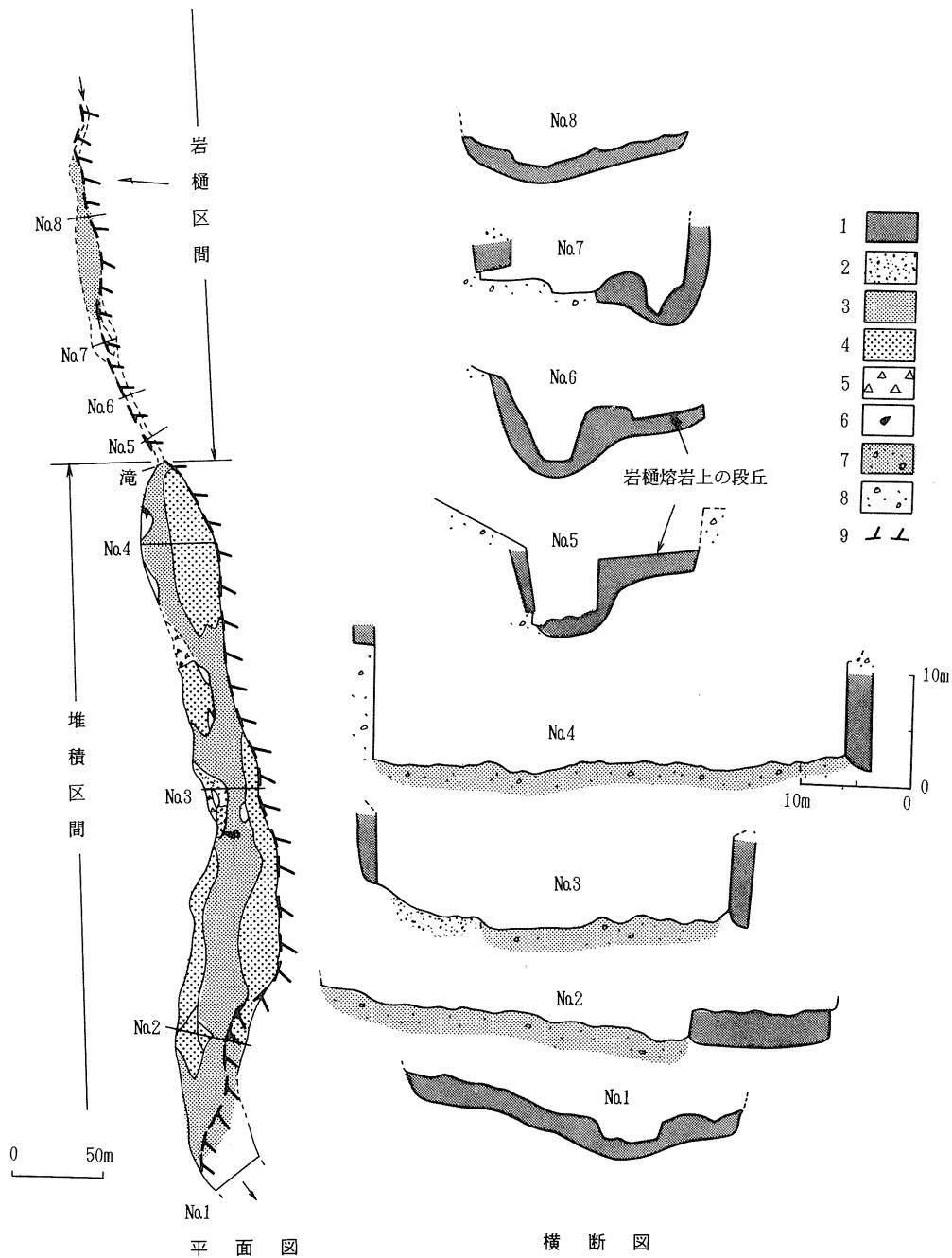


図-6 富士山大沢、岩樋部の河原

2. 溶岩流の流れる以前の谷筋と岩樋の関係

岩樋区間の地質構造を現地で調べた結果、岩樋の地形には、旧谷筋を埋めて流下した溶岩流（岩樋溶岩流）が強く影響していること、いいかえれば、ゴルジは溶岩の厚い所、すなわち旧谷筋と現在の谷が一致している場所に形成され、幅広い砂礫の河原がある堆積地は旧谷筋以外の場所で形成されていることが分かった。

3. 溶岩流の堆積面より緩勾配な堆積地

岩樋区間では、溶岩の上を流れているゴルジの区間では勾配が溶岩流表面の勾配にほぼ等しい。すなわち、10度ほどである。ところが、溶岩を掘り抜いた堆積地の勾配は7度である。そのため、ゴルジの最下流端と堆積地との境界は滝になっている。

4. 岩樋の地形変化に関する水路実験

岩樋区間ではどのような経過をたどって今日のような地形が形成されたのか、そして、将来、岩樋区間はどのように変化していくのだろうか。この点を考えるために、実験水路を用いた模型実験を行った。水路に溶岩に見立てて石膏を混ぜた砂を厚く敷き詰め、砂を伴う水流を流して、“溶岩”がどのように侵食されるかを観察した。その結果、溶岩の表面にはゴルジが生じるが、水流は初期の勾配を保って次第に溶岩を下刻すること、すなわち、溶岩流の表面に形成される谷は溶岩流の勾配が原因となって、結果的に岩盤侵食河床の凹凸の大きさが決まること、一方、溶岩の下流端の急勾配区間は次第に遡上することが分かった。

実験を通じて、通過する砂礫の多少が岩盤侵食河床形にきわめて大きな影響を与えていることを認識した。たとえば、滝はそこを通過する砂礫の大きさがきわめて小さいか、量が少ない場合に生じているということが分かった。大きな礫を含んだ水流は、あるいは多量の砂礫を伴う水流は岩盤を激しく下刻するから、早瀬は生じても、滝にはならないというわけである。ともかく、通常は水流のない岩樋はレクリエーションの場としてすぐれている。将来の有効利用を期待したい。

第9章 砂礫を伴う水流による巨礫の磨耗に関する実験的研究

1. 河床の巨礫

支谷や谷壁から水流によっては運搬されないほど大きな岩塊が供給されることが山地河川の特徴である。それらの岩塊は河床に残留して、しばしばアーマー・コートを形成し、山地河川における流れや河原の形成に強い影響を与える。山地河川は長期的にみると山地の隆起に伴って次第に下刻しているが、河川が河床を下刻し続けるためには、河床に生じるアーマー・コートを破壊するか、あるいは避けるかする必要がある。

したがって、砂礫を伴う水流によって河床の巨礫がどのように破碎・摩耗されるのかという知識が、河川地形の成り立ちや今後の変化を予測するために必要となる。ところが、水流による岩盤や巨礫の摩耗速度や摩耗様式についての知識はきわめて乏しい。

2. えぐれ礫

岩盤の露出したような山地河川にしばしば見られる下流側が円弧状にえぐられた巨礫をえぐれ礫と呼ぶが、ここでは、巨礫の摩耗についての手がかりを得るために、えぐれ礫に注目し、渡良瀬川の上流でその分布や形態を調べ、回流水路を製作してえぐれ礫の成因を調べた。製作した回流水路は幅 0.5m、内径 2 m のもので、水深 0.7m で毎秒 2 m の表面流速が作り出せるものである。

実験結果、えぐれ礫は礫の下流側で生じる剝離域に十分な大きさの礫が取り込まれる場合に形成されること、しかも、礫の上流側には礫があまりぶつからないこと、つまり、えぐれ礫は水流によって運ばれる砂礫の量が少なく、しかし、強い流れによって礫の背後では礫が盛んに動かされるといった河川で形成されることが分かった。えぐれ礫は巨礫の下流側が砂礫によって侵食されて形成されることはだれでも考えるところであるが、本研究の結果、巨礫の上流側が侵食されないということが一層重要であるということが認識されたのである。また、えぐれ礫とポット・ホールとは、前者は凸地形であり、後者は凹地形であるが、ともに渦流によって生じた形態であるという共通点も明らかになった。

3. 岩質による摩耗速度の違い

さらに、巨礫の摩耗速度は岩質によって異なると考えられるので、チャート、安山岩、結晶質石灰岩の巨礫を試料礫として、その摩耗速度を回流水路を用いて調べた。実験では、とくに水流に含まれる砂礫の大きさを変えて、その影響を調べた。その結果、巨礫の摩耗は水流に伴われる砂礫の粒径が大きい場合に顕著になることが明らかになった。また、岩質別の摩耗速度については、結晶質石灰岩、安山岩、チャートの順に小さくなった。

第10章 河原に関する雑感

1. 人々は河原とどうかかわってきたか

古くから河原は宗教上の行事とみなせる祭礼の場であり、処刑場、野外劇場、戦場ともなった。近代になると、野球場、運動場などに利用され、第二次大戦中は食料不足を補うために畠にされたが、日本経済の高度成長と共にレクリエーション用の空間の拡大が急速に進んだ。

2. 河川を治めることにほぼ成功しつつある今、河川環境を考え直そう

都市河川は大規模な堤防で囲まれ、河川工事区間の生態系はかなりの影響を受けている。そればかりでなく、河原はしばしばゴミ捨場となっている。レクリエーションの場としての河原の環境整備が望まれる。

3. 河川地形学の知見を生かすために

河原はそこを流れる河川によって形成されたものであり、今後も変形し続けるものであるから、河原を利用する際には、形成途上にある地形を固定しようとするところに無理があることを認識しなければならない。

4. 河原の未来、あるべき姿を探る

河原をレクリエーションの場として利用するためには、流れる水の清らかさ、静けさ、そして澄んだ空気など、河原をとりまく河川環境全体が保全されなくてはならない。今日では建設用骨材としての川砂利を掘ったあの砂利穴が放置されてゴミ捨て場になっているところがある。今後は不法投棄の場を作らないといった配慮が望まれる。

第11章 河川環境研究の今後の課題 －米国事情に学ぶレクリエーションの場としての河原の展望－

1. 米国における河原の利用の現状

米国にはカヌーやカヤックやゴム・ボートで川下りを楽しむ人々が大勢いる。比較的安全な渓流にはたいてい川下り業者によるツアーがあって、容易に誰でも川下りを楽しめるようになっている。わが国の川下りと比較して、時間的にゆとりのあるものが多い。わが国でも、今より長い休暇を楽しめるようになるものと期待される。その際には、川遊びのような自然の中でのレクリエーションが盛んになるだろう。

米国における川遊びの場所には、個人あるいは団体の所有する川や湖と、国立公園や国有林の中の川や湖がある。川遊びの盛んな川には河原にオートキャンプ場が整備されている。わが国のキャンプ場と比較して最も違うのは、ハードの面ではなく、利用者のマナーだろう。米国では夜9時以降、朝7時までは静粛にすることが徹底している。

米国には国立公園や国有林のほか、国立草原とか国立河川（National River）というものが近年設定されている。レクリエーションの場所として河川を適切に整備し、維持・管理し、環境を保全しようとするものである。そのほとんどは、山間地の峡谷部区間である。

国有林はまた、レクリエーションの場として広く利用されている。近年、多目的利用森林が多数設定されている。木を伐って売るということだけでなく、環境保全に役立てたり、あるいは国立公園と同様、森林や渓流をレクリエーションの場として整備しつつある。

林野庁に限らず、わが国の建設省に相当する内務省の工兵隊（U.S. Corps of Engineers）もまた、ダムなどの建設地の河原にキャンプ場を建設するなどして親しまれる環境整備に努めている。

2. グランド・キャニオンの河川環境研究プロジェクト

1989年度に米国地質調査所（U.S. Geological Survey）の Dr. David Rubin と Middlebury College の Dr. Jack Schmidt が筑波大学水理実験センターに来て、大型水路（幅4 m、深さ2 m、長さ160 m の世界最大の流砂用実験水路）において、グランド・キャニオンの峡谷部における河原の形成に関する基礎的な実験を実施した。

1991年5月には、水路実験成果を踏まえて、コロラド川グランド・キャニオンにおける河原の形成を、3週間にわたって峡谷をボートで下りながら調査した。われわれの研究グループは、米国地質調査所の研究者を中心とした12名のほか、3名のボートマンの計15人で、2隻のゴム・ボートを使用し

た。

グランド・キャニオンを川下りをするには、食料をすべてボートに積み込んでテントやスリーピング・バッグを持って行く。夜は峡谷の底の河原にテントを張って寝る。砂からなる河原は、砂が飛んでくるのを我慢すれば、涼しく、背中は痛くないし、上から石が落ちてくる心配も少ない。河原はグランド・キャニオンを下る人々にとってなくてはならないものである。

河原は細粒な砂で構成されているために変形されやすい。風で侵食されるし、波で削られる。たくさん的人が登り下りすると崩れるなどと心配される。河原は上流にダムが造られて以降、大きく変化したと言われている。

そこで、河原の形態を測量し、水面下は音響測深機によって、また砂の厚さを地震探査と地質ボーリングによって調べ、流れと波の性質を実測して調べると共に、トレンチを掘って、堆積構造を調べて、最近の出水による河原の変形過程を調べた。数カ所の河原について観測した結果、グランド・キャニオンの河原はダム建設後的小出水では従来言われてきたほどには変化していないことが分かった。

河原の形成に関する調査は、グレン・キャニオン環境研究 (Glen Canyon Environmental Studies) プロジェクトの一環としてなされているもので、グランド・キャニオンという一つの川を対象として、異なる分野の研究者が共同研究をしているという点が特徴である。わが国では、総合研究と題する研究はたくさんあっても、残念ながら、GCESのようにフィールドと同じにして多数の専門の異なる研究者が共同しあうような総合研究はきわめて限られている。自然はあまりに細分化した専門家によってはその仕組みを解明できそうにないと認識が高まりつつある。わが国においても、単に個別研究を寄せ集めるだけでない、真の共同研究が望まれる。

3. 河川環境研究の今後の課題

グランド・キャニオンで年間2万人の人が川下りを安全に楽しめるのは、最近の時代にはほとんど顕著な地形変化をしていないためである。わが国の峡谷とはこの点が全く違っている。それぞれの川には個性がある。河川流域相互を比較研究することによって、各河川の特徴を把握すること、河川毎の変動特性と現況とを理解するための河川環境の比較河川学的研究が望まれる。

なお、河川流域環境の理解には長期的観測が欠かせない。河川流域で生じる様々な変化はきわめてゆっくりとしたものが多く、しかも河川によって個性があるから、短期間の観測による結果からだけでは、むしろ誤った環境保全方策を立案しかねない。すでに米国では全国13流域を対象とした、長期的河川環境比較研究プロジェクト (Long Term Ecological Studies) がスタートとして10年を経過している。

さらに、やや長期間の河川環境の変化を予測するためには、河川流域を一つの土砂礫の輸送システムとしてとらえることが必要不可欠である。平野の河川を流れる砂礫は上流の山地河川から供給されるのであるから、山地河川から平野の河川までの砂礫の流れを全体として把握する必要がある。

河川流域における砂礫の流れを把握するためには、砂礫が風化して、細かく碎かれ、摩耗し、出水時に濁りとして河床から失われることを明確にすることが当面の課題である。そのためには、専門分野の異なる多くの研究者の協力のもと、地質の異なるいくつかの河川流域における長期観測と河川流

域相互の比較研究が必要である。河川流域の成り立ちを正しく理解することによって、河川環境を適切に保全し、活用し、かけがえのない自然を子孫に残したいものである。

謝 辞

本研究は昭和63年度～平成2年度の河川環境管理財団からの研究助成によった。一連の研究は、研究代表者および分担者と共に、現地調査や水路実験に参加してくれた米山哲郎（筑波大学環境科学研究所平成3年度修了）、前田浩則（筑波大学自然学類平成元年度卒業）、藪地結吏（千葉大学理学部平成元年度卒業）、佐藤浩（筑波大学自然学類平成2年度卒業）、長谷川祐二・北島美宇（筑波大学自然学類平成3年度卒業）ほかの学生諸氏との議論の上になしめた成果である。研究の遂行には筑波大学水理実験センターの小玉芳敬氏および飯島英夫氏に献身的なお力添えを頂いた。このほか、水路実験および現地調査に当たって多数の方々にお世話になった。ここに記して感謝の意を表します。

図-1 変形されやすい山間地渓流の河原

大井川上流の東河内沢では、1982年8月の洪水では河床に砂礫が堆積して5～8m河床上昇した(a)が、同年9月の洪水時には逆に数m侵食された(b)。

図-2 突発的に変形する混合砂礫河床の河原

混合砂礫河床では砂礫堆の高まりに礫が集積して河原が形成される。しかし、この河原は安定したものではなく、局所洗掘によって多量の細粒物質が一時的に供給されると、集積していた礫が流送されて河原は急激に大きく変形する。

図-3 蛇行湾曲部の河原

大井川上流、接岨峡の穿入蛇行区間では、湾曲部に広い河原が発達している。河原は巨礫が集積した高い河原とその下流側に位置する細粒な砂礫からなる低い河原とに大別される。

図-4 大井川上流、接岨峡の穿入蛇行

大井川が砂岩・頁岩互層の山地を下刻してきたこの区間では、下刻過程で大井川が側方に移動して段丘面や河原を発達させてきた区間（生育蛇行区間）と河道位置が固定していて、河原が発達していない区間（掘削蛇行区間）とが交互に繰り返されている。

1. 旧流路（カットオフされた旧蛇行河道）、2. 高位段丘面、3. 中位段丘面、4. 低位段丘面

図-5 阿武隈川、郡山-福島間の峡谷部の瀬-淵河床

花崗岩の岩盤が露出した河床は、瀬と淵とが繰り返される瀬-淵河床となっている。

1. 淀、2. 淀あるいは瀬のいずれにも分類できない区間、3. 瀬、4. 瀬の範囲で特に勾配の大きい地点、5. 洪水時ののみの流路、6. 花崗岩の岩盤が露出している範囲

図-6 富士山大沢、岩樋部の河原

大沢は、富士山の溶岩流を侵食している区間では狭い岩盤侵食河道を形成しているが、溶岩からはずれた所では、大沢の幅は大きくなって、広い河原が発達している。

1. 岩樋溶岩、2. 旧期溶岩、3. 河床、4. 段丘化した河床、5. 崩落した砂礫、6. 岩塊、7. 河床堆積物、8. 泥流堆積物、9. 岩樋溶岩が流下した旧谷筋の谷壁位置

写真-1 渓流の河原の変形

大井川上流の東河内沢では、豪雨に伴って多量の砂礫が供給されると広い河原が形成される(a)が、その後急速に侵食されて段丘状地形となる(b)。

写真－2 大井川上流、接岨峡の穿入蛇行区間の河原

湾曲部凸岸側には粗大な礫が集積して河原を形成している。

写真－3 蛇行河道湾曲部における河原の形成に関する模型実験

大井川上流、接岨峡の穿入蛇行区間の模型を製作して、湾曲部における高い河原、低い河原の形成過程を実験で調べた。

写真－4 おろしがね河床では砂礫堆は形成されない

大井川上流、接岨峡の穿入蛇行区間のうち、長期間河道位置が固定している区間の河床には、砂岩の岩塊が累々として河原は形成されていない(a)が、側方移動してきた区間（生育蛇行区間）では、第5章で見たように、砂礫堆が形成されている(b)。

写真－5 河床に岩塊がある河道は側刻しにくい

河床に砂礫堆が形成されると水流は側岸に集中して河岸を侵食し、次第に河道蛇行が発達する(a)。しかし、河床に岩塊があると、流れが乱されて砂礫堆は形成されなくなるため、河岸侵食は弱まる(b)。