

砂礫を伴う水流による巨礫の摩耗に関する 実験的研究

Experimental Study Using a Circular Flume on Abrasion of
Boulders with Gravel and Sand Particles in Transport

小玉 美宇*・小玉 芳敬**・池田 宏***

Myu KODAMA, Yoshinori KODAMA and Hiroshi IKEDA

I はじめに

山間地を流れる河川では、山地斜面からの土砂礫の崩落や土石流に伴い、巨礫が河床に供給される。これらの巨礫の一部は通常の出水では流下せず、残留礫として河床に存在し続ける。この残留礫は河床粗度として流水や流砂に強い影響を与え、山間地河川の河床勾配をも規定する要因のひとつに考えられている(佐藤, 1991; 佐藤・池田, 1992)。

山間地河川が河床を低下させるためには、何らかの方法により、集積した残留礫を避けるか、または破壊する必要がある。残留礫の周囲を通過する岩屑によって、残留礫をその場で摩耗し重量を減少させるプロセスは、集積した残留礫に対して河川が取り得る最も基本的な対応策といえよう。実際、山間地河川において巨礫(残留礫)表面の様子や形態を観察すると、出水時に他の礫が激しく衝突したことによって生じたと考えられる無数の傷跡が巨礫の表面に残されており(例えば, Kodama, 1992, p.10)、また下流側があたかもスプーンでえぐられたかのごとく侵食された巨礫がしばしば観察される(第1図)。

巨礫には確かにこのような摩耗作用が確認され、しかもこの摩耗作用は頻度の高い小規模の出水時にも、細粒岩屑の流下に伴って生じると考えられる。つまりこのプロセスを探ることは、山間地河川での

地形変化の鍵を握る巨礫の挙動を理解するために極めて重要である。

ところが、山間地河川を対象とした巨礫の摩耗に関する従来の研究は極めて少ない。摩耗様式あるいは摩耗礫の形態に関しては、Kuenen (1947) が実際河川の巨礫の摩耗形態を報告している。彼は河床物質に砂が卓越する河川では礫の上流側がいくつかの小面を刻む形式で侵食されると指摘し、更に飛砂による巨礫の風食形態との違いについても言及している。また Gregory (1915) は、野外で巨礫の侵食速度を測定し、砂岩礫の上流側が年間最大 2 cm 侵食されたが下流側は全く侵食されなかったと報告している。伊藤 (1979) の写真11は河蝕形を三稜石型に分類した巨礫を示したものであるが、下流側から撮影したと思われるこの風景写真から、巨礫の一部がえぐれた侵食形態を読み取ることができる。しかし伊藤 (1979) は、巨礫の下流側が侵食されたとは述べていない。このように、前述した従来の研究には、巨礫の下流側がえぐれる侵食形態についての明確な記載は認められないのである。

また巨礫の摩耗速度に関しては、Kuenen (1955) は回流水槽実験で、Suzuki and Takahashi (1972, 1981) は噴砂摩耗実験で、定量的に調べている。ところがこれらの実験はいずれも、研磨材として砂サイズのみを扱っており、礫サイズも通常の出水で多

*筑波大学第一学群自然科学類 **筑波大学水理実験センター ***筑波大学地球科学系・水理実験センター

量に流下する山間地河川における巨礫の摩耗を議論するには不十分である。

本研究の目的は、礫の下流側がえぐれる侵食形態に注目し、山間地河川における巨礫の摩耗の実態を観察した上で、水路実験により巨礫の摩耗形態を規定する要因、及び礫を研磨材に含む場合の巨礫の摩耗速度を明らかにすることである。

II 渡良瀬川上流部における巨礫の摩耗

1) えぐれ礫の特徴

本研究で注目した下流側が円弧状にえぐれた巨礫(第1図)とは、礫の上流側と下流側の間に明瞭な変換線があり、上流側が流線型をなし、一方下流側はスプーンでえぐったかのごとく侵食されたものである。このような形状の礫を本研究では「えぐれ礫」と呼ぶ。

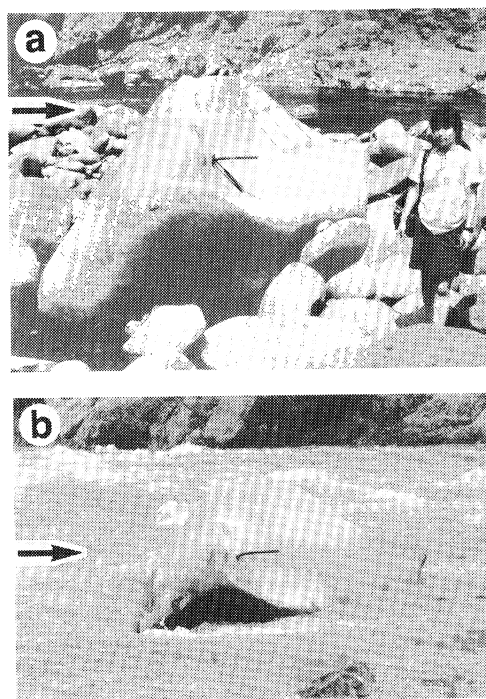
えぐれ礫には、次のような特徴が認められた。a) 礫上流側には、たくさんの衝突痕が観察され、表面のきめが粗い(凹凸が激しい)のに対し、下流側は滑らかである。b) 下流側のえぐれ面は、斜め上方を向いている。c) 礫が河床から突出している。d) 長軸が流れに直行している。e) 礫の下流側に粒径数cm以下の小さい礫が集積している。以上のえぐれ礫の特徴を第2図に模式図で示した。

多くの河川での観察から、このようなえぐれ礫は、扇状地河川の河床礫中にも稀に見られるものの、典型的なものは山間地河川の峡谷部に多いことが判った。安山岩や花崗岩や砂岩といった岩種の礫に多く認められ、粒径は1m前後を下限として数mのものまで認められた。

そこで、これらの岩種の巨礫が河床に多数存在する河川のひとつとして本研究では渡良瀬川を選び、山間地河川における巨礫の摩耗の実態を、特にえぐれ礫に注目して観察した。

2) 渡良瀬川山間地の概観

渡良瀬川は、群馬・栃木の県境界にある皇海山(2,144m)に源を発し北関東を貫流して利根川に注ぐ。このうち本研究の調査対象は群馬県大間々町高津戸峡より上流の山間地区間で、流域面積は約470km²、流路延長は50km余りに及ぶ。流域の地質図を



第1図 礫の下流側が円弧状にえぐれた巨礫「えぐれ礫」(渡良瀬川・新栄橋の直下流にて撮影)

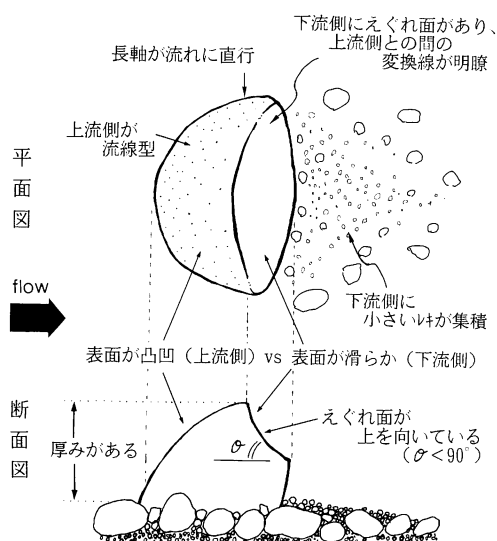
a. 写真左側が上流。インブリケートした中央の巨礫(安山岩)は、下流側が顕著に侵食され円弧状にえぐれている。そのえぐれた面の上部に“S62.2.22”と油性マジックで書かれた文字をかるうじて読み取ることができた。またすぐ隣には“鮎禁漁……平成3年6月1日”の貼紙が残っていた(1991年8月16日撮影)。

b. 1991年8月23日、台風12号通過後の減衰期に、第1図aと同一の礫をやや下流側から撮影。河岸沿いに残る洪水痕跡から、出水のピーク時にはこの巨礫の頂部より更に1.5m程、水位が上昇したものと推定された。“鮎禁漁……”の貼紙はすっかりはがれ、またマジックの文字は明らかに薄くなり、微かに残る程度であった。

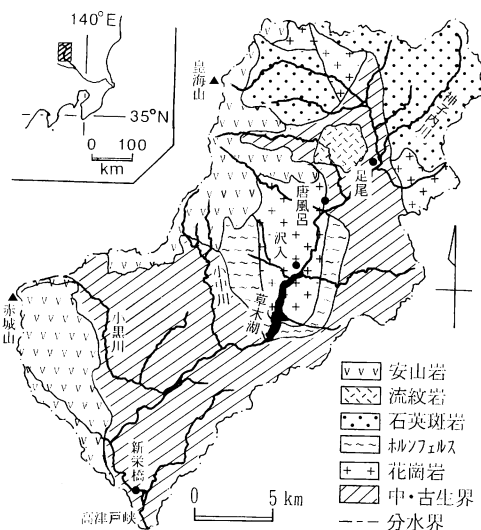
著者らは、1991年12月22日に再びこの巨礫を観察したが、マジックの文字は全く見えなくなっていた。つまり、1991年最大の出水となった台風14号(8月31日)と、更に引き続いて週末毎にやってきた数々の台風による出水により、この巨礫の下流側は摩耗されたと考えられる。

第3図に示す。

花崗岩・石英斑岩や安山岩が分布する源流から流れ出た渡良瀬川は、その後唐風呂まで砂岩・頁岩及びチャートの互層地帯を流れる。河床に存在する巨



第2図 えぐれ礫の特徴を示す模式図



第3図 調査地域（渡良瀬川上流部）の位置図及び岩相図

礫は大半が花崗岩である。

唐風呂から草木ダム上流にかけては沢入の花崗岩が分布する。草木ダム建設前の2万5千分の1地形図から計測したこの区間の平均河床勾配は約1/43で上流（足尾ダム下流～唐風呂の平均河床勾配、約1/

57）・下流（草木ダム下流～小黒川合流点の平均河床勾配、約1/110）と比べ急になっている。河道幅は100 m前後で峡谷をなし、花崗岩の巨礫（中径2～4 m）が集積し階段状の河床形をなす区間と、巨礫が点在した区間とが縦断方向に交互に繰り返される。但し河床砂礫層は薄く、河床の至るところに基岩が観察された。

草木ダムから下流では再び堆積岩地帯を流れ、左支川・小黒川合流点まではとりわけ、谷幅が数100 mと広く、段丘もよく保存されている。この河床にはしばしば堆積岩の岩盤が露出する。また左支川・小中川からは安山岩の巨礫が本川に供給され、河床には花崗岩と安山岩の巨礫が共存する。更に小黒川合流点から下流では、赤城火山の山麓緩斜面の張り出しにより河谷幅が狭くなり、同時に安山岩が本川に多量に供給され、河床に占める巨礫の大半が安山岩となる。

3) えぐれ礫の縦断的分布と分布区間の特徴

本研究では特に、栃木県足尾町南橋付近で右支川・神子内川が合流してくる地点から群馬県間々町下谷戸の新栄橋まで、約35kmの区間で渡良瀬川本川の河道や河床の様子を観察し、巨礫の摩耗形態に注目してえぐれ礫の分布を調査した。その結果、えぐれ礫の分布は、山間地河川の河相と密接に関連していることが明らかになった。すなわち、山間地区間の渡良瀬川は大きく4つの特徴的な河相（岩盤河床区間、巨礫の集積区間、巨礫の点在区間、川幅の広い砂礫堆区間）の繰り返しであり、そのうちのひとつの区間（巨礫の点在区間）に卓越してえぐれ礫が観察されることが判った。以下それぞれの区間の特徴を述べる。

岩盤河床区間：第4図は堆積岩の岩盤が河床に露出した区間である。波長10m～数100m程度でステップ（比高の小さな滝）とプール（淵）が交互に配置する河床形態を示している。巨礫の分布は岩盤が侵食段丘状に高まった所に限られ、それらはえぐれ礫の形状を示さない。また河床を更に下刻して複断面の河道を形成している区間も観察された（第4図、b）。花崗岩地域でも同様である。

巨礫の集積区間：河床表面を粒径50cm～3 mの



第4図 渡良瀬川の岩盤河床区間（足尾町・原橋により撮影）

基盤岩は堆積岩（頁岩）である。矢印は流向を示す。

a. 上流側を向いて撮影。河道幅約50mで、皿状の横断形をなす平坦河床。

b. 下流側を向いて撮影。左岸側に乗り上げ集積した巨礫は径1～2mのもので、大半が花崗岩礫である。

巨礫がお互いに噛み合いながらまんべんなく覆っている。但し、礫層は極めて薄く巨礫の直下には岩盤がある場合が多い。これらの巨礫がつくる粗度は他の区間と比べ格段に大きい。

この区間にはえぐれた形態を示す巨礫がまばらに

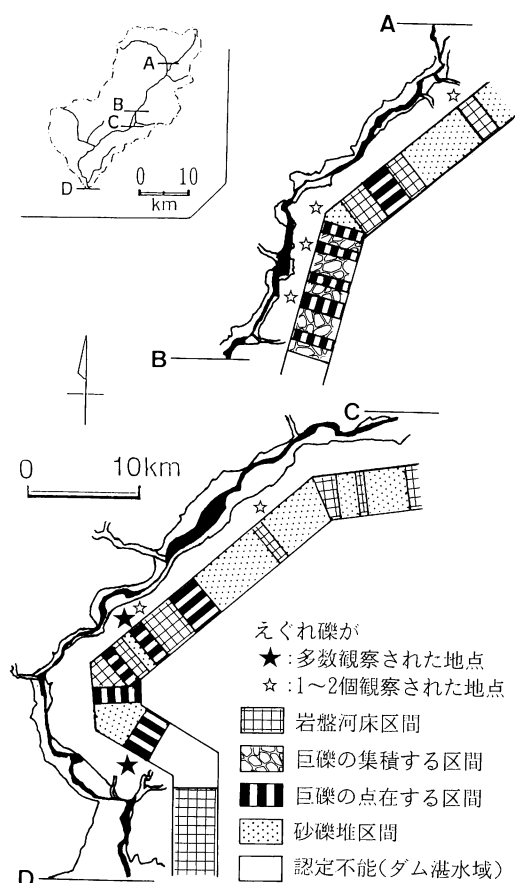
観察された。しかしそれらのえぐれ面の方向は、上流側や下流側、川岸方向、あるいは上方とまちまちであった。つまりこれらの礫は、これより上流区間で形成されたえぐれ礫が流下し、巨礫の集積帯にトラップされたものである可能性が高い。

巨礫の点在区間：この区間でえぐれ礫が多数観察された。河床表面には粒径数10cm以下の小さい礫が多く、その中に巨礫がお互いに孤立して分布する。点在するそれぞれの巨礫の周囲は細礫で覆われていて比較的平滑であり、河床に巨礫が突出しているように見える。これらの巨礫は下部が細礫中に埋まり、突出しているのは上部のみである。インブリーケートしているものも多く、それらは高い確率でえぐれ礫であった。但しえぐれの深さはまちまちで、えぐれ面の数も単数とは限らず多いものでは3～4面のものも観察された。

川幅の広い砂礫堆区間：これは草木ダム下流から小黒川合流点にかけての盆地に典型的に認められる区間で、川幅が数100mと広く、河床には砂礫堆が形成され網状流を示す。ここでは砂礫堆の形状に応じて河床礫が平面的に分級され同じような粒径の礫が集まるために、河床表面は比較的滑らかで、流水に対する粗度が小さい。巨礫が稀に見られるが、それらは他の河床礫の面より上方に突出しているため非常に際立って見える。この中にはえぐれ礫も認められた。

以上4つの区間の縦断的な分布を第5図に示す。河道沿いの（★）印をつけた所で、巨礫のえぐれ礫が多数観察された。巨礫のえぐれ礫が1～2個観察された所は（☆）印で示している。この図から、巨礫が点在する区間にえぐれ礫が多数存在することが判る。

隣り合う区間では、巨礫の岩質はほぼ同じとみなすことができ、しかも出水時に通過する細粒岩屑の粒度組成にもあまり違いはないと思われる。従ってえぐれ礫の形成には、巨礫の配置環境として次の2点が必要条件であると考えた。つまり、第1に巨礫が水流に対して孤立して突出していること、これは、突出礫の後流域に剝離渦が生じる必須条件であろう。第2に巨礫が長期間位置を変えずに河床に留まり、



第5図 渡良瀬川上流部の河相区分とえぐれ礫の分布
渡良瀬川上流部を草木湖を挟んで二分した平面図の隣に、河相を区分した帯を付けた。平面図の黒塗りは河道幅に相当し、河道を挟んだ実線は山地斜面の脚部にあたる。

巨礫の下流側に対する摩耗作用が継続すること。岩盤区間にえぐれ礫が少ないのは、巨礫が流亡しやすいためであろう。

これらの条件下で、えぐれ礫の形成に有効に働くのはどの粒径の研磨材であろうか？ またえぐれ礫はどれ程の歳月をかけて形成されるものであろうか？

III 巨礫の摩耗に関する回流水路実験

1) 実験目的

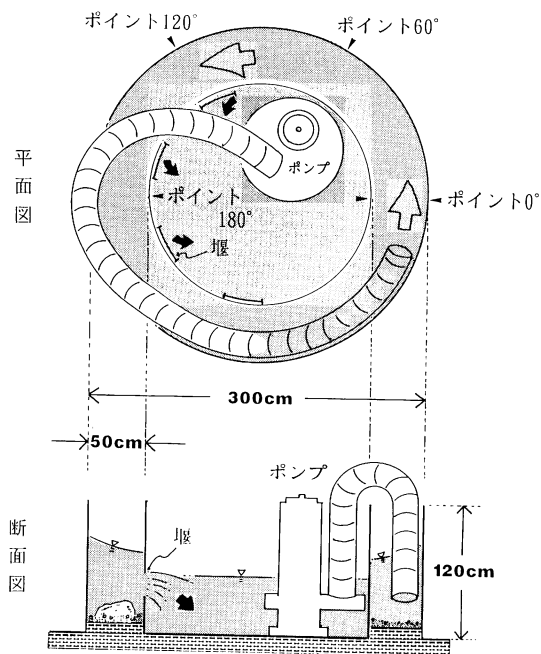
出水時に流送される細粒岩屑による巨礫の摩耗を、

野外で短期間に測定し、量的に評価することは困難である。また礫床河川特有の巨礫の摩耗形態と考えられるえぐれ礫の成因を、野外での観察のみから議論するにも限界がある。そこで本研究では水路実験により、巨礫の摩耗様式及び摩耗速度を調べた。特に、細粒岩屑の粒径を制御することで、研磨材の粒径が巨礫の摩耗様式や摩耗速度にどのように影響するか注目した。

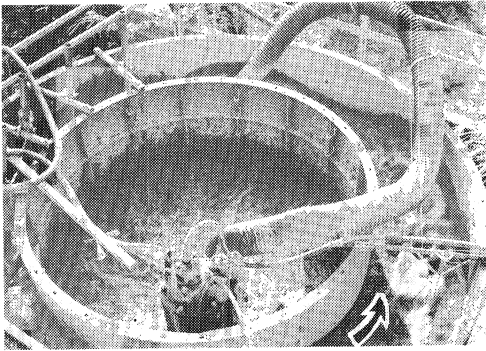
2) 実験装置

実験装置として、a) 渡良瀬川などの実際河川で出水時に生じる流速に近い水流を再現できること、b) 巨礫サイズの試料礫の数倍の水深を維持できること、c) 細粒岩屑と水を長時間にわたって流し続けられること、の3点を満たす回流水路を考案した。

製作した回流水路は、直径3 m、水路幅50cm、高さ120cmのドーナツ状のものである(第6図、第7図)。水路側壁には鉄製のマンホール用型枠を用い、土台部分にはモルタルをうった。そして、回流水路部分の水路床をモルタルで約10cmの高さに底上げし、水路側壁の位置を固定した。



第6図 実験装置(回流水路)



第7図 実験中の回流水路の様子

水路内壁の4箇所には、水路床からの高さ35～50cmの部分に直角三角堰（堰幅：30cm、堰高：15cm）を設けた。水はこの堰を通して中央部に落ち、毎秒約50リットルの吐出能力があるサンドポンプ（KK鶴見製作所：水中強力サンドポンプ、型番GPT-15B、ホース径15cm）で吸い上げられる。そしてホースで再び水路に吐き出されて、その勢いで反時計回りに水路内を回流する仕組みとなっている。水を吐き出す際の勢いでホースが踊るのを防ぐために、足場パイプでホースを水路外壁に沿い固定した。このため、試料礫の摩耗実験に使用可能な区間は半周となった。便宜上、ホース排出口よりやや下流を起点として順に「ポイント0°」～「ポイント180°」と呼ぶ（第6図）。なお、ポンプの出力はインバーター（可変周波数電源装置）で制御し、実験開始時には徐々に出力を上げることができる。

本実験装置を用いると、水路部で水深約70cmの水塊を最大2 m/secの流速で回流させることができる。つまり、まず水路部と中央部に水を70cm貯め（水路部での水深は、底上げ10cm分だけ引いた60cm）、その後サンドポンプを最大能力で運転した。すると1分も経たないうちに水路部の水位は約10cm上がって水深70cmとなり、中央部の水位は逆に下がり水深約60cmとなって安定した。この時の流速を電磁流速計（TK-103D型小型電磁流速計：測定範囲0.01～2.0m/sec）を用いてポイント30°～ポイント120°で測定したところ、表層部では毎秒2 m以上の流速があり、水路中央底層部でも0.5～1.1m/secの流速が得られた。

なお、水路上・下流においては流速の大きさには大差がなかった。

3) 実験条件

巨礫の摩耗に関与する要因として、「流速」、「研磨材の粒径」、「巨礫の岩種」、「巨礫の形状」、「巨礫の配置環境」及び「巨礫の風化度合い」等が考えられる。

本研究では、「研磨材の粒径」による巨礫の摩耗様式、及び摩耗速度の違いと、「巨礫の岩種」による摩耗速度の違いについて調べた。そのために、「流速」は実験装置の最大能力約2 m/secで一定とした。なお、「巨礫の形状」や、巨礫が集積あるいは孤立して立地しているかといった「巨礫の配置環境」の影響に関しては、系統的には調べなかった。「風化度合い」の影響に関しても、試料礫の多くを実際河川の河床から採取した巨礫を用いることで、風化程度はそれぞれの試料礫に備わった条件とみなした。

(1) 試料礫

等粒状結晶質石灰岩の巨礫2個と安山岩6個、及びチャート3個の、3種類計11個の試料礫を用いた（第1表、第8図）。石灰岩はいずれも、重量約25kg、中径30cm程で、不要になった彫像を利用したものである。そのため「鳥」を模した礫と、「人頭」を模した礫とがある。安山岩は渡良瀬川の河床から採取したものである。5 kgから30kgまであり、中径も10数cmから30cmまで様々である。チャートも渡良瀬川の河床から採取した。

(2) 研磨材

研磨材としては、粒径の異なる5種類の岩屑を用いた（第2表、第9図）。すなわち、粒径の細かいものから順に、a）豊浦標準砂：+2.5～+2.0φ（中央粒径0.2mm）、b）ろ過砂（規格JWWA A-103合格品、有効径 $d_{10}=1.5\text{mm}$ ・均等係数 $d_{60}/d_{10}=1.4$ ）：-1.0φ（中央粒径2.0mm）、更に渡良瀬川の河床から採取した3種類の大きさの中礫、すなわち、c）-2.0～-3.0φ（4.0～8.0mm）、d）-3.5～-4.0φ（1.1～1.6cm）と、e）-4.5～-5.5φ（2.2～4.5cm）である。この3種類の中礫を本研究では便宜上、中礫（小）・中礫（中）・中礫（大）と呼ぶ。

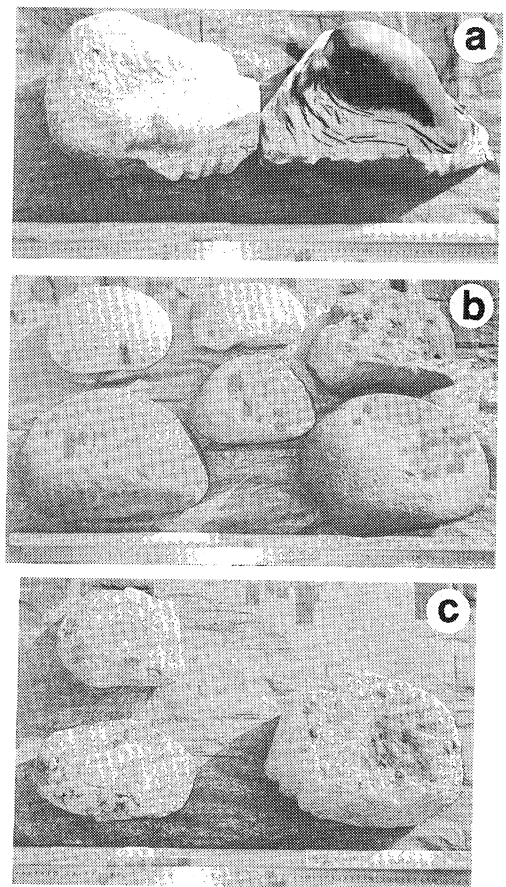
第1表 試料礫一覧

岩種	粒 径 (cm)			初期重量	含水率 (%)
	長軸	中軸	短軸		
石灰岩	33	25	23	25.19kg	—
	37	36	21	24.18kg	—
安山岩	39	29	22	29.46kg	1.80
	40	27	17	23.03kg	1.78
	30	23	16	11,844g	5.84
	27	21	14	9,433g	1.86
	26	19	12	6,944g	5.60
	25	16	10	5,008g	3.77
チャート	31	24	17	19.59kg	—
	26	18	14	7,887g	—
	22	18	10	4,873g	—

以上5種類の研磨材を組み合わせ、3つのCASEの実験(第10図)を行った。つまり、**CASE 1**:粗砂のみを研磨材として用いた実験、**CASE 2**:砂(粗砂と細砂)に中礫(中・大)を加えたものを研磨材とした実験、**CASE 3**:更に中礫(小)を加えた実験である。このように本実験では、研磨材の粒径として単一粒径ではなく、混合粒径を積極的に用いた。それは粒径の混合効果により礫の易動度を高め、本実験装置が作り出せる流水条件下で最も効率よく、研磨材を流送するためである。

4) 実験手順

全てのCASEにおいて、まずはじめに研磨材を水路内に敷き、更に第1表に示した試料礫を、それらが実験中に流下しないように工夫して水路床に並べた。その際、渡良瀬川での観察結果に倣って、試料礫の長軸は流れに直行するように配置した。次に水を貯め、水路内の水深を60cmに保った。そしてサンドポンプの出力を徐々に上げ運転を開始し、1分程かけて最大流速に達するようにした。これは急激に流速を上げることにより、試料礫が転動することを防ぐためである。この状態で長時間運転し、周囲を通過する細粒岩屑により、停止している試料礫のどの部分がどのように摩耗されるかを調べた。なお堰を通過して中央部に落ちた砂礫(研磨材)は、サンドポンプで完全に吸い上げることができずに中央部の



第8図 実験に用いた試料礫

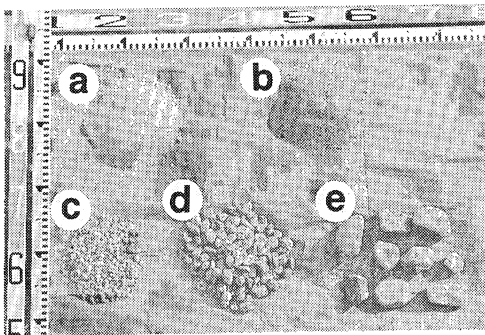
- a. 等粒状結晶質石灰岩(彫像)
 - b. 安山岩(渡良瀬川河床礫)
 - c. チャート(渡良瀬川河床礫)
- スケールのひと目盛りは20cmである。

縁にたまってしまったため、実験中、数時間おきに中央部に入りスコップで砂礫をサンドポンプの近くにかき寄せる作業を繰り返した。

各実験CASEについて以下に詳しく説明する。**CASE 1**では、研磨材は粗砂のみ、試料礫は12kgの安山岩にペンキを塗布したものをを用いた。この礫は、割れ円礫(小玉, 1990 a)の形状(長軸30cm, 短軸16cm)をしており、流線型の部分を上流側に、平らな部分を下流側に向けてインプリケートさせてポイント90°に配置した。インプリケートした試料礫の下には、鉄塊の重石を置き試料礫が流下しないように

第2表 研磨材一覧

粒 径	名 称	通 称	重 量
+2.5~+2.0φ (=0.2mm)	細 砂	豊浦標準砂	300kg
-1.0φ (=2.0mm)	粗 砂	ろ過砂	516kg
-2.0~-3.0φ (=4.0~8.0mm)	中 礫 (小)	渡良瀬川の河床礫	93kg
-3.5~-4.0φ (=1.1~1.6cm)	中 礫 (中)	渡良瀬川の河床礫	111kg
-4.5~-5.5φ (=2~5cm)	中 礫 (大)	渡良瀬川の河床礫	14kg
合 計			1,034kg



第9図 実験に用いた研磨材のサンプル

- a. +2.5~+2.0φ b. -1.0φ
c. -2.0~-3.0φ d. -3.5~-4.0φ
e. -4.5~-5.5φ

した。数時間毎に運転を止めて試料礫の状態を観察しながら、通算30時間の運転を行った。

CASE 2では2通りに分けて実験した。CASE 2-1では粗砂に中礫(中)を混入し、試料礫として安山岩(割れ円礫)と石灰岩(「鳥」型の彫像)のそれぞれにペンキを塗布したものを用いた。安山岩はポイント90°、石灰岩はポイント60°に配置し、CASE 1と同様、数時間毎に試料礫の状態を観察し、30時間の運転を行った。実験時間をCASE 1と同じにしたのは、研磨材としての中礫(中)の効果をみるためである。

CASE 2-2では、更に細砂と中礫(大)とを混入

CASE	研 磨 材					実験時間 hours	研磨材の 総重量 kg
	f. sand +2.5~+2.0φ (=0.2mm)	v.c. sand -1.0φ (=2.0mm)	s. pebble -2.0~-3.0φ (=4.0~8.0mm)	m. pebble -3.5~-4.0φ (=1.1~1.6cm)	l. pebble -4.5~-5.5φ (=2~5cm)		
1		100%				30	516
2	1	82.3%		17.7%		30	627
	2	31.9%	54.8%	11.8%	1.5%	800	941
3		29.0%	49.9%	8.9%	10.8%	50	1034

第10図 実験 CASE 一覧

し、試料礫に石灰岩(「人頭」型の彫像)を加え、「鳥」型石灰岩の重石としてその直下流に配置し400時間実験した。更に残りの安山岩全てとチャートを加えて再び約400時間運転し、岩種による摩耗速度の違いを調べた。30kgの安山岩はポイント30°に、残りの安山岩とチャートはポイント120°~180°に配置した。そして数十時間毎に試料礫を取り出し、安山岩は電気炉(110°Cで約24時間乾燥)で、石灰岩とチャートは天日で24時間乾燥させた後に計量した。安山岩だけを電気炉で乾燥させたのは、自然乾燥や実験直後の湿潤状態では計測値が安定せず、重量変化を調べるには不適當であったためである。なお、石灰岩とチャートに関しては、自然乾燥状態と実験直後の湿潤状態の計測値がほぼ等しく、つまりグラム単位での差は認められず、重量変化を調べるには自然乾燥時の計量で充分であった。

CASE 3では、研磨材に更に中礫(小)を混入し、安山岩(割れ円礫)と石灰岩(「鳥」型)にペンキを塗り直して、それぞれポイント90°とポイント60°に配置した。運転時間は50時間である。これも数時間おきにポンプの運転を止めて試料礫を取り出し、摩耗される部位と摩耗程度とを観察した。

5) 実験結果

実験の結果、a) 研磨材としての効果は、砂サイズだけの時より礫サイズを混入したときの方が格段に大きいこと、b) 摩耗速度は、岩種により異なること、c) 研磨材の粒径により、侵食部位が異なること、以上3点が明らかになった。

(1)粗砂のみの実験 (CASE 1)

粗砂のみを研材として用いた実験では、実験開始から数時間足らずで水路内の水が茶色く濁った。粗砂が活発に動いているらしく、濁度は時間と共に増加した。しかし ポイント90°に配置していた試料礫(割れ円礫の安山岩)を取り出してみると、全面に塗布していたペンキはほとんど削れておらず、グラム単位での摩耗は認められなかった。第11図aは30時間後のものであるが、上流側、すなわち流線型の上面部分のペンキがわずかに点状に削られているだけで、それもざっとみただけでは分からない程度の微々たる量であった。下流側の平らな破断面のペンキは、ほとんど削られた形跡が認められなかった。

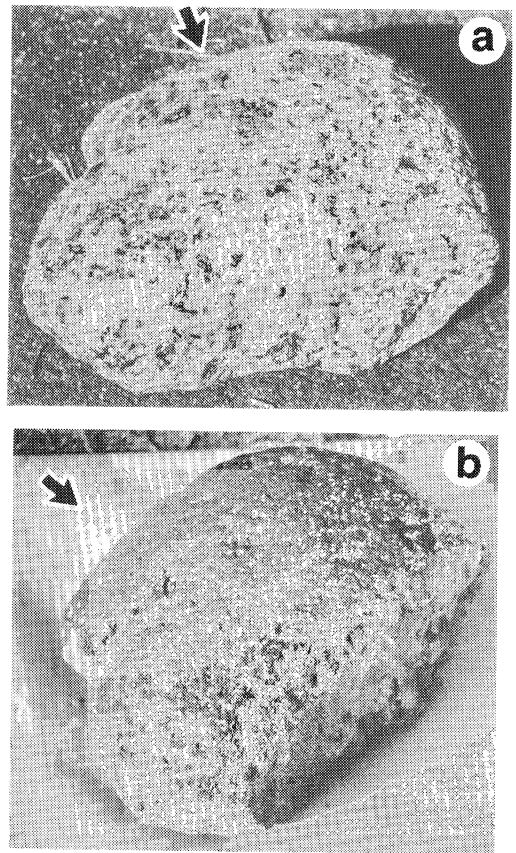
(2)粗砂と中礫(中)の実験 (CASE 2-1)

粗砂と中礫(中)を用いた実験では、更に濁度が増加した。水路壁が透明ではないので、水路内の研磨材の挙動を知る手がかりは、研磨材が鉄製の水路壁やホース固定用の足場パイプに衝突するコツンコツンという音や、引きずるように動くジョリジョリという音だけであった。実験後、ポイント90°、及びポイント60°に配置した試料礫を取り出してみると、上流側のペンキがかなり削られており、CASE 1との侵食量の差がはっきり認められた。第11図bは30時間後、つまりCASE 1と同じ実験時間後の割れ円礫安山岩の様子である。下流側がほとんど削れないという傾向は同じだが、上流側の侵食量は極端に増え、変換線の角張っていた箇所が少々丸みを帯びていた。つまり礫サイズを研磨材として使用した時には、砂だけのときよりも摩耗量のはるかに大きくなることが明らかになった。

(3)細・粗砂と中礫(中・大)の実験 (CASE 2-2)

粗砂と中礫(中)に更に細砂と中礫(大)を混入したCASE 2-2では、研磨材の衝突音が、ゴツンゴツンという激しいものになった。これは中礫(大)の衝突音であろう。濁度も急増し、あまりに濁ったために電磁流速計が使用不能になってしまった程である。

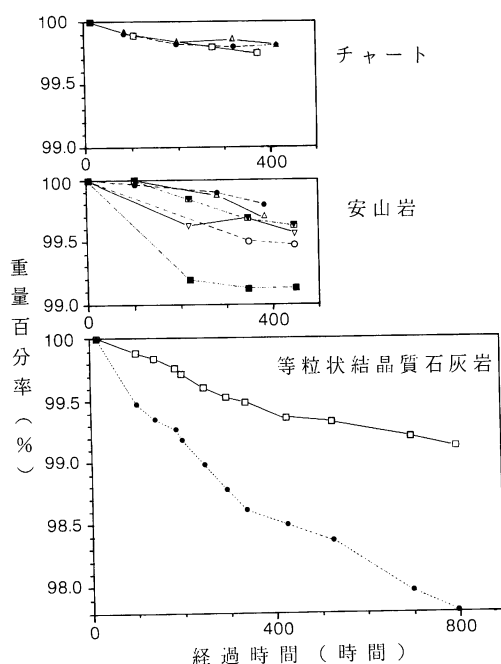
試料礫の摩耗もかなり進み、第12図に示すように800時間で最大2.2%の重量減少が測定された。なお、石灰岩については溶食の可能性が考えられるため、



第11図 実験途中の試料礫の様子
a. CASE1. 30時間後.
b. CASE2-1. 30時間後.

別途、水中に400時間置いて重量変化を調べた。その結果、グラム単位での重量損失は認められず、つまり溶食速度は摩耗速度と比べ非常に遅く、本実験での重量減少は細粒岩屑による摩耗によることが確認された。

第12図に示されるように、岩種によって摩耗速度は異なる。つまり、a) 石灰岩は摩耗が速く進み、b) チャートは石灰岩の約5分の1程度のゆっくりした速さで、c) 安山岩はその中間である。但し石灰岩では、同じ岩種でも試料礫の配置によりばらつきが認められた。つまり、大きな重量減少が生じた「鳥」型の試料礫はポイント60°に配置し、その半分以下の重量減少しかなかった「人頭」型は、「鳥」型



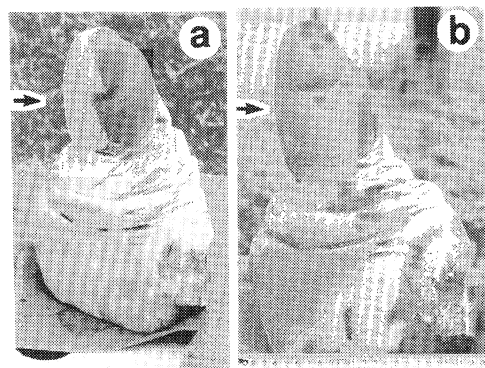
第12図 試料礫の重量変化 (CASE2-2)

の重石として直下流側に配置したものであった。また安山岩の摩耗速度にばらつきがあるのは、試料礫毎の岩相の違いを反映している可能性が高いが、詳細は明らかではない。

(4) 細・粗砂と中礫 (小・中・大) の実験 (CASE 3)

細・粗砂と中礫 (中・大) に、更に中礫 (小) を混入した研磨材の条件で50時間実験を行った。その結果、他の CASE ではほとんど摩耗が進行しなかった試料礫の下流側が、初めて局所的かつ集中的に侵食を受けた。第13, 14図にその様子が示されている。

CASE 3 では試料礫の下流側の一部は真っ白になる程、ほぼ完全に摩耗されているのに対し (第14図, a), 上流側は全面的にペンキが薄くなっているものの、依然として色が残っている (第14図, b)。中礫 (小) を研磨材に加えたことで、本実験条件の範囲内では、上流側より下流側の方が選択的に摩耗が進んだことになる。つまり、研磨材の粒径によって侵食部位が大きく異なることが明らかになった。



第13図 実験 CASE2-2 と CASE3 における試料礫の摩耗様式の違い

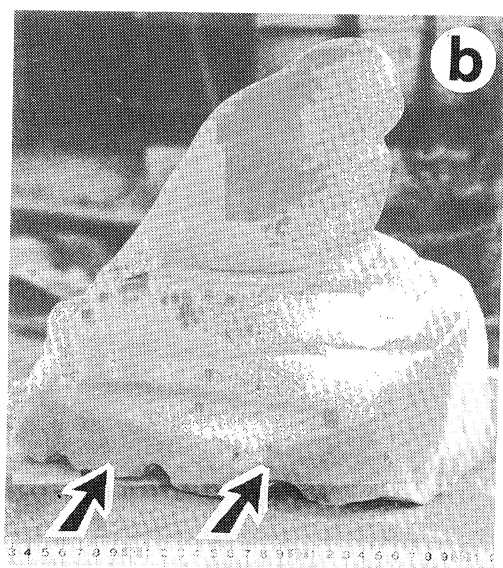
- a. CASE2-2 (500時間後) では、上流側のペンキがほとんど削れてしまっているのに対し、下流側は所々白くなっている程度である。
- b. CASE3 (50時間後) では、下流側の方が上流側より、ペンキの削れ加減が大きい。土台部分のペンキの削れは、下流側へ斜め上方に走っている。舞い上がった細粒岩屑によるものか。

IV 考 察

1) 巨礫の摩耗における gravel-blasting の重要性

巨礫の摩耗に関する従来の研究では、研磨材として砂サイズのみを扱い、主に sand-blasting による摩耗作用が注目されてきた。しかし砂礫床河川においては、出水時には礫も盛んに流送され、巨礫の研磨材となり得る。

本研究では粗砂による摩耗速度と中礫による摩耗速度との違いについて定量化はしていないが、第11図から摩耗速度にオーダーの違いがあることは明らかである。研磨材の粒径が大きい程、つまり砂よりは礫の方が格段に摩耗速度が速くなると考えられる。このことは、粗砂による巨礫の摩耗速度は細砂よりもずっと速い、という Kuenen (1955) の実験結果を更に延長したものとなる。砂粒よりも質量の大きい礫粒子の方が、衝突の際の侵食力が大きいことは容易に想像されるし、当然の結果であろう。研磨材の粒径や水の流速が更に大きくなると、試料礫の摩耗速度はもっと大きくなることが期待される。つまり本実験で示された巨礫の摩耗速度は、実際河川で生じている摩耗速度よりも、はるかに小さい値である



第14図 実験 CASE3 における試料礫の摩耗様式

- a. ペンキが明瞭に削れた下流側の面、礫の下部が侵食されていないのは、水路床の堆積物中に埋もれ、かつ重石が直下流に置かれていたためである。
- b. 上流側の面のペンキは、水路外周側を中心に全面がぼんやりと薄くなっていた。

と思われる。

また礫が研磨材となるには、砂の存在が重要であると考えられる。つまり、粒径の混合効果によって礫の易動度が高まり、巨礫に激しく衝突することによって初めて、gravel-blasting が有効に作用するからである。

2) CASE 3 の実験で試料礫の下流側が選択的に摩耗された理由

本実験の条件下では、 $-2.0 \sim -3.0\phi$ ($4.0 \sim 8.0$ mm) の礫を研磨材に加えた時にのみ、試料礫の下流側に集中的な摩耗が生じた。更に注目されるのは、この粒径の研磨材が、試料礫の上流側を下流側程には摩耗しなかった点である。この事実はえぐれ礫の成因を考える上で極めて重要であろう。

試料礫周辺での水流は、他の CASE の場合と等しいと仮定できる。すると、試料礫周辺での細粒岩屑の運搬様式が、粒径毎に異なるために摩耗部位に違いが生じたことになる。残念ながら本研究では実験装置の制約上、試料礫周辺での細粒岩屑の運搬様式を直接観察することはできなかった。しかし試料礫の後流域に剥離渦が形成されていたことは想像できるし、従ってこの渦の流れに取り込まれて浮遊し、礫の下流側を効果的に摩耗することのできる粒径の限界が、本実験の条件下では $-2.0 \sim -3.0\phi$ ($4.0 \sim 8.0$ mm) にあったものと考えられる。これより大きな礫は下流側の剥離渦では浮遊できず、そのために試料礫の下流側が摩耗されなかったのではないか。一方砂は、後流域で活発に浮遊したであろうが、粒子の質量が小さいために、研磨材として有効に作用し得なかったのであろう。

巨礫下流側の剥離渦に捕捉された岩屑は、しばらくの間は渦の中で浮遊し、やがてその一部が剥離渦から逃れ流下する。剥離渦に捕捉された岩屑はたとえ少量であったとしても、渦に捕捉されている間中、各粒子が巨礫の下流面を幾度も攻撃することになる。渡良瀬川でえぐれ礫の下流側にしばしば観察された径数 cm 以下の小さな礫こそがまさに、剥離渦に捕捉されてえぐれ面を侵食している研磨材であると考えられる。つまり、渡良瀬川の出水時には、巨礫の後流域に形成される剥離渦に径数 cm 以下の礫が捕捉さ

れて浮遊しているのであろう。

一方、試料礫の上流域であるが、試料礫が流れに対して突出していると、流水には試料礫の上流側の面への衝突を避け脇へ回避する強い渦が生じるものと想像される。これは、いわゆる Horseshoe Vortex (Greeley and Iversen, 1985, pp.207-209など) あるいは Neckrace Vortex に相当するものである。この渦は後流域に形成される剝離渦よりも強いので、粒径が小さく質量も小さい研磨材はこの強い渦に取り込まれてしまい、試料礫を回避して流下するのではないだろうか。そのため、 -3ϕ (8 mm) より小さい礫では巨礫の上流側があまり摩耗されなかったものと考えられる。それに対して、より大きな粒径の礫は運動の慣性力が大きいので、この渦流でさほど変向されることなく巨礫の上流側に衝突し、その面を侵食するのである。

以上のような岩屑の運搬様式を考えると、えぐれ礫の特徴のひとつとして認められる“河床からの突出”は、単にえぐれ礫の下流側に剝離渦を形成するだけではなく、えぐれ礫の上流側に礫を回避する強い渦流を生じさせ、えぐれ礫の上流面への研磨材の衝突を弱める効果をも生み出しているのである。

3) えぐれ礫の形成条件

渡良瀬川山間地で、下流側がえぐれた巨礫の分布とそこでの河道・河床の様子を観察した結果、えぐれ礫が形成されるには、巨礫の配置環境に一定の条件が必要であることが分かった。それは河道幅が比較的狭く、砂礫床の上に巨礫が点在して突出していることである。

この巨礫の配置環境には、a) 流水が巨礫の下流側で剝離して後流域に渦が形成され、逆に上流側には巨礫を回避する強い渦が形成される点、b) 巨礫が比較的長期間その場にどまる点、c) 巨礫の後流域に形成される剝離渦にちょうど取り込まれる大きさの細粒岩屑が巨礫の周囲を通過する点、の3つの条件が備わっていると考えられる。

巨礫が集積してお互いに噛み合うような環境では、流水に対する粗度が大きく巨礫の周辺で水流が激しく乱れるのに対し、巨礫が点在している区間では巨礫の下流側に明確な剝離渦が生じやすく、更に上流

側にも巨礫を回避する強い渦が形成されると考えられる。一方、岩盤河床の環境では、河床が滑らかであるために巨礫は比較的容易に流下してしまうのに対し、砂礫床区間では、巨礫の一部が河床堆積物にしばしば埋まるために流下しにくく、長期間にわたって巨礫の下流側に摩耗作用が継続すると考えられる。更に河道幅が広いと洪水流が平面的に広がるため、研磨材となる細粒な礫が卓越して流下する川筋と点在する巨礫の位置とが一致しなくなる可能性があるのに対し、峡谷部では十分な水深があるために細粒岩屑の偏流が起こりにくく、細粒岩屑の流下する道筋と巨礫の位置とが一致する可能性が高いと考えられる。これらの細粒岩屑の一部が巨礫下流側の剝離渦に捕捉され、下流側の面を侵食するのである。

更に山間地の渡良瀬川は、堆積段丘面上を流れていた氷期の状態と比べると、現在は至る所で河床に基盤岩が観察され、流送されている河床砂礫の量は少ないという印象を受ける。このこともえぐれ礫の形成には重要ではないだろうか。つまり、もし砂礫が山から盛んに生産され、出水時に多量の砂礫が渡良瀬川を流下するとすると、巨礫の上流側に激しく衝突する礫の数も多く、そのために巨礫は比較的短期間に破碎・摩耗されて重量を減少させると考えられる。更に多量の砂礫が流送される環境下では巨礫の易動度も高くなり、下流側がえぐれる前に流下してしまうのではなかろうか。氷期と比べ河床砂礫の供給が少ない現在の渡良瀬川では、巨礫は残留礫となりなかなか流下しないし、巨礫の上流側もさほど速くは摩耗されないものと思われる。するとえぐれ礫は河床低下した掃流砂礫量の少ない河川で形成される特徴的な形態ということになる。これに関しては、段丘礫層中の巨礫に含まれるえぐれ礫の存在比率と現河床での比率を比較したり、また現在砂礫を盛んに流している河川での巨礫に占めるえぐれ礫の比率を、河床低下傾向にある河川での比率と比較するような調査を行い、まず傍証を集めることが先決であろう。

巨礫の岩質に関しては、粘っこく破碎されにくいものが、えぐれ礫を形成しやすいものといえよう。

チャートの巨礫には無数の層理や節理が入っており、周囲を流下する礫の度重なる衝突によってチャートの巨礫は容易に破碎すると考えられる。また回流水路実験からも判るように細粒岩屑による摩耗速度は遅い。つまり、チャートでは摩耗による侵食より、弱線に沿った破碎の影響の方が大きい。えぐれ礫は形成されにくいと考えられる。一方、安山岩の巨礫は、破碎作用に対して極めて強い抵抗性を示し(小玉, 1990b), 摩耗作用で円礫となる傾向が強い。インプリケートした安山岩の巨礫が、他の巨礫の衝突によって稀に破碎されると、その剖面は下流側を向き、かつ河床面に対し斜め上方を向くことになる。この割れ円礫の配置環境が前述の条件を満たしていれば、この剖面の後流域には強い剝離渦が形成され、ここに捕捉された細粒岩屑により、摩耗が進行してえぐれ礫が形成されるのであろう。

V おわりに

山間地河川の峡谷部に形成される残留礫は、地形変化に強い影響を与える。この残留礫の流亡を誘発する要因のひとつに、砂礫を伴う水流により、巨礫をその場で摩耗して小さくする作用が考えられる。本研究では、渡良瀬川山間地における巨礫の摩耗の実態調査と、回流水路を用いた巨礫の摩耗実験を実施した。

渡良瀬川では、巨礫の下流側がえぐれる特異な形態の「えぐれ礫」に注目して、その形態的な特徴やえぐれ礫が分布する環境を現地調査した。その結果、砂礫が河床表面を覆った峡谷部で、しかも巨礫が点在して河床から突出する区間にしばしばえぐれ礫が観察されることが明らかになった。この環境では、巨礫の後流域に渦が形成されるとともに、河床砂礫に半分埋もれた巨礫は容易には流亡せず、細粒岩屑による摩耗が長期間作用するためであろう。

研磨材の粒径が巨礫の摩耗に与える影響を回流水路実験で調べた結果、次の3点が明らかになった。つまり巨礫の摩耗速度は、a) 「sand-blasting」より「gravel-blasting」の方がはるかに大きいこと。b) 岩種による摩耗速度は、大きい方から石灰岩、安山岩、チャートの順であり、400時間に及ぶ回流水

路実験での重量減少率はそれぞれ、0.5~1.5%、0.3~0.9%、0.3%以下であった。但し摩耗速度は、研磨材の粒径や流速に強く依存するため、実際河川では本実験の値より大きい摩耗速度であると思われる。更に、c) 研磨材の粒径が巨礫の摩耗形態と密接に関わっていることが指摘された。つまり、本実験の条件範囲内では唯一、4~8 mm 径の研磨材を用いた実験で、試料礫の下流側が摩耗され、他の粒径の研磨材では、上流側のみが摩耗されることが明らかになった。

巨礫の摩耗様式のひとつである「えぐれ礫」の形成条件を探るには、研磨材の粒径と摩耗部位がどのように関連しているかを調べる必要がある。本実験では装置の制約上、水路内での砂礫の運搬様式を直接観察できなかったために、この点を明らかにできなかった。巨礫周辺での細粒岩屑の運搬様式を直接観察できる実験装置を用いて、巨礫の摩耗部位と摩耗速度を定量化し、えぐれ礫の形成を調べるのが当面の課題であろう。

謝 辞

本稿は、小玉美字(旧姓:北島)による平成3年度筑波大学第一学群自然科学類の卒業論文を加筆修正したものである。本研究を進めるにあたって、筑波大学地球科学系の地形分野の諸先生方、及び上武大学商学部の伊勢屋ふじこ先生に御助言を頂いた。また実験では、装置の製作を手掛けて下さった筑波大学水理実験センターの飯島英夫技官を始めとして、同大学地球科学研究科の渡部真氏、環境科学研究科の米山哲郎氏、地球科学研究科研究生のShlomo Sharoni氏、そして自然科学類の長谷川祐二氏、那須野功氏など、たくさんの方々の御力添えを頂いた。記して皆様に感謝致します。

文 献

- 伊藤隆吉(1979):「日本のポットホール」古今書院, 132 p.
小玉芳敬(1990a): 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, No14, 109-114.

- 小玉芳敬 (1990 b) : ERC-ABRASION-MIXER による
渡良瀬川の河床礫の破碎・摩耗実験. 筑波大学水理
実験センター報告, No14, 115-130.
- 佐藤 浩 (1991) : 阿武隈川, 郡山-福島間における急勾
配区間の成因. 筑波大学第一学群自然科学類, 平成 2
年度卒業論文, 50p.
- 佐藤 浩・池田 宏 (1992) : 阿武隈川, 郡山-福島間にお
ける急勾配区間の成因. 筑波大学水理実験センター
報告, No16, 158-159.
- Greeley, R and Iversen, J. D. (1985) : *Wind as a
Geological Process on Earth, Mars, Venus and
Titan*. Cambridge University Press, Cambridge,
333p.
- Gregory, H. E. (1915) : Note on the shape of pebbles.
American Journal of Science, Ser. 4, **39**, 300-304.
- Kodama, Y. (1992) : Effect of abrasion on down-
stream gravel-size reduction in the Watarase
River, Japan : field work and laboratory experi-
ment. *Environmental Research Center Papers*,
No15, 88p.
- Kuenen, Ph. H. (1947) : Water-faceted boulders.
American Journal of Science, **245**, 779-783.
- Kuenen, Ph. H. (1955) : Experimental abrasion of
pebbles. I. wet sandblasting. *Leidsche Geologische
Mededeelingen*, **20**, 142-150.
- Suzuki, T. and Takahashi, K. (1972) : An experiment
on the rock abrasion by sand impact at moderate
speeds, 中央大学理工学部紀要, **15**, 239-257.
- Suzuki, T. and Takahashi, K. (1981) : An experimen-
tal study of wind abrasion. *Journal of Geology*, **89**,
509-522.