

# ERC-ABRASION-MIXER による 渡良瀬川の河床礫の破碎・摩耗実験

ERC-ABRASION-MIXER Experiment of River-Bed  
Gravels from the Watarase River

小玉 芳敬\*

Yoshinori KODAMA

## I はじめに

沖積河川において河床礫の大きさが下流方向に小さくなる原因として、小玉ほか（1989）は渡良瀬川における粒径別岩種構成比の上下流変化の実態から、破碎・摩耗作用の重要性を指摘した。本稿は、その続報に当たる。

礫の破碎・摩耗過程を野外で定量的に観測することは極めて困難である。そこで礫の細粒化の様式や速度を調べるには、室内実験が有効な手段となる。Daubrée (1879) 以来、数多くの研究者によって回転ドラムや回流水槽を用いて礫の細粒化過程を調べる実験が行なわれてきた (Wentworth, 1919 ; Marshall, 1927, 1929 ; Krumbein, 1941 ; Rayleigh, 1942, 1944 ; Sarmiento, 1945 ; Potter, 1955 ; Kuenen, 1955, 1956 ; Bradley, 1970 ; Bradley *et al.*, 1972 ; 渡部, 1973 ; 森脇ほか, 1985, 小玉, 1990a など)。

その結果これらの実験の多くから提示された礫径の減少率は、実際河川のものと比べはるかに小さな値であった (Shaw and Kellerhals, 1982 ; Fig. 17)。そのため現在多くの研究者は、「摩耗作用」は沖積河川における礫径の下流方向への減少にほとんど影響しないと考えている。

ところが岩種毎に礫の細粒化過程を調べた従来の実験の多くには、次の 4 つの問題点がある。つまり、

① 実験で礫に加わる衝撃が、実際河川で礫に加わるものと比べはるかに小さい点、② 実験試料として碎石や人工的に整形した礫を用いた点、③ 実験時間が長い点、さらに④ 試料礫の粒径に関しては、pebble サイズの单一粒径実験がほとんどで、実際河川のように粒径が混合した時の細粒化過程が不明である点、の 4 点である。

まず①に関しては、例えば回転ドラム実験 (Wentworth, 1919 ; Marshall, 1927, 1929 ; Krumbein, 1941 など) では、ドラムの回転に伴い安息角を越えて不安定になった礫が転がり落ちる程度で (Kuenen, 1956, Fig. 1), 矿同士の衝突速度はせいぜい数 10 cm/sec と小さい。衝突と言うよりもむしろ礫同士が擦れ合うと言う方が妥当かも知れない。また回流水槽実験 (Kuenen, 1955, 1956 ; Bradley, 1970 ; Bradley *et al.*, 1972) では、個々の礫は 1 ~ 2 m/sec の速度で転動した。しかし実験で同時に投入された試料礫の個数が少ないために礫同士はほとんど衝突せず、試料礫には水槽底面やそこに埋め込まれた細礫との間での摩耗しか生じなかった。

ところが扇状地河川で河床砂礫の移動が生じるような出水時に川の端に立つと、地響きを伴った雷のような音が聞かれる。これは、流送される礫がお互いに激しく衝突することによる音と推定される。その証拠に河原にある礫の表面には、他の礫の衝突で

\*筑波大学水理実験センター

形成された percussion mark がしばしば観察される (Oya, 1981 ; 小玉, 1990b など)。例えば渡良瀬川下流部では、チャート礫の表面に直径 5 ~ 6 mm ほどの percussion mark が観察される。これは Oya (1981) の提案した式によると、直径 10cm の礫の場合、水中で 2 ~ 3m/sec の速度で衝突した衝撃により形成されたものとなる。

そこで実際河川の出水時に推定されるような、礫が激しく他の礫に衝突しながら流送されている様式を、小玉 (1990a) は回転ドラム実験に取り込んだ。また水山 (1990) は礫の落下試験で、礫に加わる衝撃を従来のものよりも大きくした実験を行った。但し水山 (1990) では礫は鉄板面に 5 ~ 6 m/sec の速度で衝突しており、しかも衝突は水中でなく空気中で生じた。これらの状況は少なくとも扇状地河川での礫同士の衝突状況とは、大きく異なると考えられる。

②に関してはすでに Bradley (1970) が指摘したように、実際河川で礫が砂礫堆内部や氾濫原に滞留する間に受ける風化が、礫の細粒化に強く影響する。すると碎石や人工的に整形した礫を試料とした実験は、風化殻を除去した新鮮な礫で実験していることになり、野外での風化した礫の細粒化特性を評価できない。

③に関しては②との関連で Bradley (1970, pp. 77-78) が指摘した。長時間連続して同じ試料礫で実験を続けることは、実際河川での礫の流下にそぐわない。つまり、実際河川では礫は長期間砂礫堆内部などに滞留し、まれに水流に洗い出されて流下する。しかし流送される礫はまもなく下流のいずれかの砂礫堆に止まり、次に移動する機会までそこに滞留し風化されると考えられる。従って室内実験で調べられる風化した礫の細粒化特性は、実際河川において一つの礫が一つの出水で移動した間に受ける細粒化に限られる。なぜなら、実験時間が長くなり細粒化が進むに従って、試料礫に備わった風化の程度は実際河川の状態からどんどん離れていくためである。それゆえにたとえ長時間実験を続けてデータを得ても、それは野外を解釈する上ではほとんど意味を持たなくなると考えられる。

すなわち、従来の多くの実験では②③の観点からすると、風化に伴い強度が低下した礫の細粒化過程がほとんど調べられていない。従って実際河川での礫径の減少を議論するには不充分であるといえる。

さらに④に関して、Pettijohn (1957, p. 536) によれば Sarmiento (1945) が礫の細粒化に及ぼされる粒径の混合効果の存在を指摘した。また Marshall (1927) や小玉 (1990a) は、混合粒径で粒径比を変えた試料礫を用いた実験で、礫の細粒化過程を調べた。そして、粒径の混合効果の重要性を指摘した。にもかかわらず先に挙げた従来の多くの実験では、試料礫の粒径が単一の場合しか扱われていない。

本研究の目的は、礫に加わる衝撃を実際河川に相似させた実験を行い、河床礫の細粒化特性を定量的に調べることである。すなわち、上述の 4 つの問題点を改良した実験、つまり実際河川で生じる礫の細粒化条件により相似した実験で、礫の細粒化特性を再評価することである。試料礫としては、渡良瀬川の現河床にある安山岩礫とチャート礫を用いた。それらは、渡良瀬川において粒径別岩種構成比の下流方向への変化傾向が著しく異なったためである (小玉ほか, 1989)。

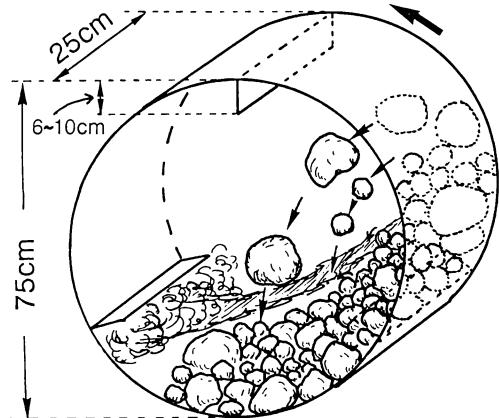
## II 実験方法

### 1) 実験装置

礫同士の衝突が水中で繰り返し生じる様な実験装置を製作した (小玉, 1990a の実験装置を一部改良)。装置は第 1 図に模式的に示すような円筒型の回転ドラムであり、コンクリートミキサーを改良して作製した。以後、この装置のことを ERC-ABRASION-MIXER ("MIXER" は、Mechanical Impact EXplains Elimination of Rocks to sand の略) と呼ぶ。回転ドラムの内径は 75cm、幅は 25cm である。投入試料礫の量が比較的少くとも効果的に礫同士の衝突が生じるようにドラムの幅を狭くした。

さらにドラムの円周面上に垂直な棚を 3ヶ所に均等に設けた。これが試料礫をすくい揚げ、最終的には礫を自由落下させる。この自由落下した礫は、ドラムの底部に位置する他の試料礫に水中で衝突する。棚の形状は、試料礫の一部をうまくすくい揚げられ、

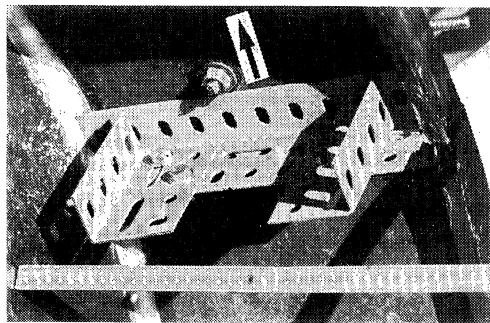
## ERC Abrasion MIXER



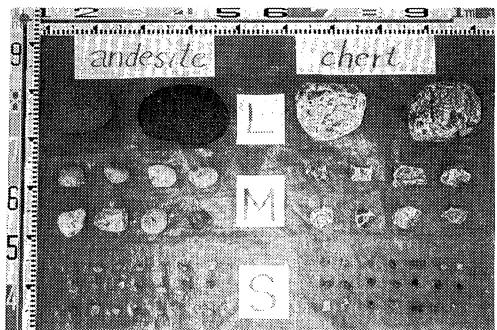
第1図 実験装置の模式図

しかも投入した水がいつもドラム底部に残るように予備実験で試行錯誤して決めた。最終的にはL型アングルを用いてU字型に組んだものを採用した(第2図)。突出した2本の腕は、円周面から10cm、腕をつなぐ棚の高さは6cmである。

回転ドラムの裏面は合板からなり、ドラムに固定し水漏れしないようにコーキングを施した。なおドラムの円周面と裏面には厚さ2mmのゴム板を全面に張り付け、試料礫が鉄板との摩擦で摩耗しないようにした。手前側の蓋は透明な厚さ3mmの塩化ビニール板で製作し、実験中にドラム内の様子を観察できるようにした。なおこの透明な蓋はボルト・ナ



第2図 ドラム円周面上に取り付けた棚



第3図 実験に用いた試料礫の見本

ットと万力を用いて比較的容易にドラムに脱着できるように工夫した。また蓋とドラムの接点にはゴムを挟み込み水漏れを防止した。

なおドラムの回転速度はインバータ(可変周波数電源装置)で制御することによって、負荷に関わらず一定速度が得られるようにした。また回転ドラムの軸の方向はハンドル操作で容易に調整できる。

### 2) 実験試料

実験試料の見本を第3図に示す。これらは、全て渡良瀬川の現河床(小玉ほか, 1989のNo.3の洲)から採取した安山岩とチャートの礫である。粒径は3種類、つまり $-6.5\phi \sim -7.0\phi$ ,  $-5.0\phi \sim -5.5\phi$ ,  $-3.5\phi \sim -4.0\phi$ であり、以後、大きい方からそれぞれL, M, Sと呼ぶ。

試料礫の採取に当っては、まず河床表面の礫を剥ぎ、その下部から掘り出した砂礫をふるい分けた。さらに岩種別の細粒化特性を捉るために、安山岩礫とチャート礫を多種類の岩種からなる膨大な砂礫のなかから、一粒一粒拾い集めた。この作業には多大な時間と人力を要した。特に安山岩のSは河床に極端に少なく、これを必要量揃えることは容易ではなかった。そこで安山岩のSに関しては、渡良瀬川の粒径別岩種構成比の調査時に岩種分けをした9地点の礫(小玉ほか, 1989)も試料に加えた。但しその量は安山岩のS試料全体の約25%であった。

また本研究では河床から採取した礫を非整形のまま試料礫として用いた。そうすることで礫が砂礫堆内部に滞留する間に受ける風化を考慮した。つまり、

試料礫はすでに現河床で風化されたものである。次に説明する12種類(case)の実験それぞれにつき、渡良瀬川の現河床から採取した礫を実験試料として準備した。つまり、各 case 毎に乾燥重量で約30kg の試料礫を揃えた。但し、二粒径混合の case では各大きさともに約15kg ずつ揃え合計で30kg とした。なお試料礫の表面についた泥は、実験前に水で充分に洗い落とした。

### 3) 実験の種類

本研究では礫同士の衝突が生じる条件下で礫の細粒化特性が、①安山岩とチャートで、②粒径毎に、さらに③二つの異なる粒径の礫が衝突した場合で、どの様になるかを調べた。そのために第1表に示すような12通り(以下、それぞれを case と称する)の実験を実施した。

単一粒径の場合は3つのサイズ、すなわち以下ではLサイズ单一粒径実験をLLで、同様にM,Sサイズ单一粒径実験をMM,SSと表現し、それぞれ安山岩とチャートにつき3case ずつを実施した。二粒径混合の場合は、3つの粒径の全組合せ、つまりLS, LM, MSの3case を両岩種につき実施した。

### 4) 実験手順

各 case 毎に、次のa～dの手順を4～5回繰り返し、実験結果のばらつきを均した。以後それぞれの繰り返しをrunと呼ぶ。各 run は、a. 試料礫と水をドラムへ投入、b. ERC-ABRASION-MIXER の運

転、c. 運転停止後、ドラム内の全岩屑を採取して粒度分析、d. そのうち投入試料礫と同じ大きさの礫だけを次のrunの実験試料として準備、の手順で行った。それぞれにつき詳しく述べる。

#### a. 試料礫と水をドラムへ投入

実験直前に試料礫の乾燥重量を1g 単位で電子天秤を用いて測定し、その試料礫と水約22リットルをドラムに投入した(第4図)。水の量は、礫同士の衝突が水中で生じるのに最低限必要な量とした。なぜならドラム内を水で満たしてしまうと礫は水中を沈降することになり、そのためには礫同士の衝突速度は最高でも沈降速度まで、つまりLサイズ礫でもせいぜい約1m/secにしかならない。また実際河川では水流は礫よりも速く流れ、礫に対して移動方向に力を与えるわけだが、ドラム内の水は逆に礫の運動に對して抵抗となり、その速度を弱める働きをする。つまり礫の運動に対する水の働きは実際河川とドラム実験では相反する。そこで投入する水の量は極力少なく、但し礫同士の衝突が実際河川と同様に必ず水中で生じるように約22リットルとなった。

#### b. ERC-ABRASION-MIXER の運転

蓋を取り付け回転ドラムを垂直に起こし、水漏れないことを確認してERC-ABRASION-MIXERの運転を開始した(第5図)。実験で生じる礫同士の衝突速度が渡良瀬川での礫同士の衝突速度に相似するように、ドラムの回転速度を全ての実験で毎分25回

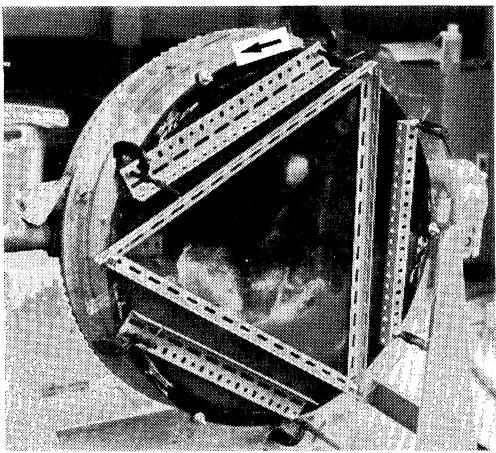
第1表 粒径の組合せによる12case の実験

SAMPLE SIZE	ROCK TYPE	
	ANDESITE	CHERT
UNIFORM	A-LL A-MM A-SS	C-LL C-MM C-SS
MIXED	A-LS A-LM A-MS	C-LS C-LM C-MS

ここでA:安山岩、C:チャート、L:-6.5~-7.0φ、M:-5.0~-5.5φ、S:-3.5~-4.0φを示す。



第4図 試料礫の投入状況



第5図 ERC-ABRASION-MIXER の実験状況

棚でくい揚げられた礫がドラム内を自由落下して、激しく踊る濁り水のなかに飛び込んでいる。水漏れを防ぐために蓋の固定にはL型アングルと万力も使用した。さらに礫が衝突して蓋が破損しないようにアングルで蓋を補強した。三角形に組まれたアングルの各頂点付近に棚が設けられている。

転に調節した。この回転速度のとき棚でくい上げられた試料礫の一部は、ドラムの最上位近くにまで達して自由落下を始めた。その結果、試料礫同士が衝突する速度は最高で約3m/secに達した。

筆者は、この速度が渡良瀬川下流部において出水時に礫同士が衝突している速度に近いと考えている。つまり、栃木県足利市付近における渡良瀬川の出水時の状況は、水深2~3m、流心部における流速4~5m/secに達する(建設省関東地方建設局・渡良瀬川工事事務所の資料による)。このような状況下で礫は一般的にある距離転動し、しかる後に躍動(saltatio)に移行する(土屋ほか, 1969; 矢野ほか, 1969; 土屋・青山, 1970)と推定される。躍動を続ける礫の速度は、一次近似では礫の沈降速度分だけ回りの流体から後れて移動すると考えられる(Bagnold, 1973)から、流心部の河床付近での流速を4m/secと仮定すると、径10cmほどの礫は最高で約3m/secの速度で躍動し、河床に停止した礫に衝突すると概算される。

各runではERC-ABRASION-MIXERを3~5

分間運転して停止した。従来の研究のほとんどが1時間、数時間あるいは、1日単位の実験であるのに比べ、本研究では実験時間が極めて短いことが特徴である。

ERC-ABRASION-MIXER実験では礫同士の衝突による激しい衝撃を試料礫に加えたために、従来の実験よりも短い時間で礫の破碎・摩耗が生じることが予備実験で明らかになった。つまりはじめ透明であった水が、ドラム運転後1~2分もすると次第に濁り始め、経過時間と共に濁りの度合が強くなつた。さらに1分もすると、試料礫が破碎して生じた細粒岩片が濁り水の中で激しく舞っている様子が透明な蓋越しに観察された。

そのために長時間ERC-ABRASION-MIXER実験を続けると次の2つの問題が生じる。まず①单一粒径で始めた実験が、礫の破碎に伴い次第に混合粒径の実験へと変化することになり、一定の粒径条件での礫の破碎・摩耗特性を捉えるためには不都合である。また②生産岩屑の粒径分布から安山岩とチャートの破碎・摩耗様式を探るとき支障となる。なぜなら、試料礫が破碎されてできた礫は、さらに破碎されて砂以小の岩屑に変化してしまう可能性が高い(小玉, 1990aの混合効果による)。そのためにはじめから砂以小の岩屑を生産した細粒化様式と区別がつきにくくなるからである。

以上2つの問題点を解決するために、ERC-ABRASION-MIXER実験では、破碎された岩屑が透明な蓋越しに確認され始めた3~5分で回転ドラムの運転を停止した。

### c. 運転停止後に行う粒度分析

ERC-ABRASION-MIXERの運転停止後に、ドラム内にある全ての岩屑(試料礫と試料礫が破碎・摩耗されて生産された岩屑のすべて)を細心の注意を払って採取した。その手順はまず①ドラムを水平に倒し、蓋を外した(このとき砥石で刃物を研いだ時の臭いがした)。そして試料礫が破碎して生産された礫や試料礫を手で取り出した。そのとき表面についた細粒岩屑を、ドラム内の水で充分に洗い落とした。次に②ドラムを徐々に傾けてドラム内を充分に水洗いしながら、残りの岩屑と濁り水をバケツに移した。

第2表 単一粒径実験の結果

RUN No.	A-LL-1 3	A-LL-2 4	A-LL-3 3	A-LL-4 5	C-LL-1 3	C-LL-2 3	C-LL-3 4	C-LL-4 5
実験時間(min)	30864.	30751.	30532.	30319.	29664.	28134.	28000.	27592.
投入試料重量(g)	30864.	30751.	30532.	30319.	29664.	28134.	28000.	27592.
φ								
-6.5 < φ < -7.0	30751.	30532.	30319.	29725.	28134.	28000.	27592.	25962.
-6.0 < φ < -6.5	0.0	0.0	0.0	0.0	774.0	0.0	0.0	1084.6
-5.5 < φ < -6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	418.0	0.0	0.0	0.0
-5.0 < φ < -5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	93.9	0.0	152.5	220.2
-4.5 < φ < -5.0	0.0	0.0	0.0	14.4	16.5	0.0	49.5	53.6
-4.0 < φ < -4.5	0.0	0.0	0.0	23.5	44.9	0.0	10.2	34.7
-3.5 < φ < -4.0	0.0	0.0	0.0	17.0	21.0	9.6	33.2	24.4
-3.0 < φ < -3.5	0.0	1.2	4.0	19.8	29.1	12.9	15.5	21.0
-2.5 < φ < -3.0	0.3	4.6	6.9	24.1	15.2	8.6	11.0	22.3
-2.0 < φ < -2.5	0.3	3.3	8.6	25.2	13.6	9.4	13.5	14.9
-1.5 < φ < -2.0	0.8	3.1	7.5	23.9	14.2	9.3	13.1	14.2
-1.0 < φ < -1.5	1.1	3.7	7.2	28.4	10.9	8.9	11.0	12.6
sand	65.60	142.10	117.83	293.80	59.30	58.00	68.80	92.40
silt	42.69	56.45	57.23	117.04	18.87	16.65	28.44	28.64
clay	2.21	4.55	3.74	6.86	0.53	0.65	1.26	6.46
TOTAL (g)	30864.00	30751.00	30532.00	30319.00	29664.00	28134.00	28000.00	27592.00
実験時間(min)	A-MM-1 3	A-MM-2 3	A-MM-3 4	A-MM-4 5	C-MM-1 3	C-MM-2 3	C-MM-3 4	C-MM-4 5
投入試料重量(g)	30157.	28874.	28267.	27777.	30047.	29820.	29514.	29003.
φ								
-5.0 < φ < -5.5	28874.	28267.	27777.	27082.	29820.	29514.	29003.	28834.
-4.5 < φ < -5.0	951.60	347.50	127.50	300.20	64.31	198.54	299.30	0.00
-4.0 < φ < -4.5	14.01	0.00	27.05	0.00	21.65	5.90	53.27	57.78
-3.5 < φ < -4.0	11.30	0.00	5.63	0.00	31.35	26.20	43.28	7.85
-3.0 < φ < -3.5	6.94	0.00	1.56	3.34	18.56	2.53	12.52	1.00
-2.5 < φ < -3.0	4.74	0.49	0.50	3.58	8.27	2.43	8.97	4.91
-2.0 < φ < -2.5	2.67	0.93	1.04	1.92	5.52	3.18	4.80	5.05
-1.5 < φ < -2.0	1.64	0.68	0.81	0.99	4.34	3.30	3.98	2.61
-1.0 < φ < -1.5	1.56	0.80	1.10	1.48	3.71	2.91	2.60	2.37
sand	169.58	128.42	155.47	182.52	40.80	33.49	45.30	43.74
silt	112.03	124.84	166.19	199.48	25.68	23.97	33.64	39.16
clay	6.93	3.34	3.15	1.49	2.81	3.55	3.34	4.53
TOTAL (g)	30157.00	28874.00	28267.00	27777.00	30047.00	29820.00	29514.00	29003.00
実験時間(min)	A-SS-1 3	A-SS-2 3	A-SS-3 4	A-SS-4 5	C-SS-1 3	C-SS-2 3	C-SS-3 4	C-SS-4 5
投入試料重量(g)	30000.	29452.	28932.	28464.	30003.	29542.	29247.	28990.
φ								
-3.5 < φ < -4.0	29452.	28932.	28464.	27991.	29542.	29247.	28990.	28765.
-3.0 < φ < -3.5	388.88	373.08	333.10	323.19	424.20	272.20	233.81	191.14
-2.5 < φ < -3.0	8.12	12.56	6.53	8.89	1.70	0.73	0.50	3.18
-2.0 < φ < -2.5	6.04	7.56	3.54	3.77	1.40	0.92	1.02	1.50
-1.5 < φ < -2.0	5.26	4.00	2.05	2.05	0.38	0.44	0.65	1.20
-1.0 < φ < -1.5	3.30	3.35	1.96	1.63	0.78	0.29	0.34	0.63
sand	41.12	28.80	22.61	21.43	5.59	3.41	1.50	4.58
silt	86.46	73.81	84.58	99.92	22.52	13.44	15.76	20.05
clay	8.82	16.84	13.63	12.12	4.43	3.57	3.42	2.72
TOTAL (g)	30000.00	29452.00	28932.00	28464.00	30003.00	29542.00	29247.00	28990.00

第3表 二粒径混合実験の結果

RUN No.	A-LS-1 3	A-LS-2 3	A-LS-3 3	A-LS-4 3	A-LS-5 3	C-LS-1 3	C-LS-2 3	C-LS-3 3	C-LS-4 3	C-LS-5 3
実験時間(min)										
投入試料重量(g) L	14965.	14935.	14895.	14850.	14800.	15303.	15263.	15213.	15192.	15122.
S	14965.	13252.	11902.	10796.	9874.	15303.	14107.	13142.	12269.	11554.
ϕ										
-6.5 < -7.0	14935.	14895.	14850.	14800.	14749.	15263.	15213.	15192.	15122.	15086.
-6.0 < -6.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-5.5 < -6.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
実験後	-5.0 < -5.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
粒度	-4.5 < -5.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
分布	-4.0 < -4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	25.90	20.90	9.50	23.30	0.00
	-3.5 < -4.0	13252.	11902.	10796.	9874.	9032.	14107.	13142.	12269.	11554.
	-3.0 < -3.5	883.00	746.50	604.76	504.05	454.81	820.20	586.30	520.10	417.40
	-2.5 < -3.0	338.80	244.10	211.43	174.66	166.65	155.92	160.73	147.74	153.19
	-2.0 < -2.5	133.40	98.43	82.93	69.82	63.99	74.42	77.90	62.27	57.65
	-1.5 < -2.0	59.12	45.58	39.45	33.03	33.53	35.81	38.02	36.33	28.91
	-1.0 < -1.5	39.71	30.00	24.51	20.95	19.89	22.99	24.02	22.37	18.46
	sand	205.50	152.11	131.11	112.77	103.11	75.51	79.12	69.67	64.80
	silt	77.46	67.95	51.60	53.10	47.05	23.32	25.95	23.85	20.05
	clay	6.01	5.33	5.21	3.62	3.97	1.93	2.06	2.17	1.24
TOTAL (g)	29930.00	28187.00	26797.00	25646.00	24674.00	30606.00	29370.00	28355.00	27461.00	26676.00
RUN No.	A-LM-1 3	A-LM-2 3	A-LM-3 3	A-LM-4 3	A-LM-5 3	C-LM-1 3	C-LM-2 3	C-LM-3 3	C-LM-4 3	C-LM-5 3
実験時間(min)										
投入試料重量(g) L	15276.	15167.	15096.	14895.	14871.	15261.	15237.	15215.	15189.	15161.
M	15276.	15076.	14590.	14227.	13776.	15261.	14676.	14363.	13927.	13493.
ϕ										
-6.5 < -7.0	15167.	15096.	14895.	14871.	14747.	15237.	15215.	15189.	15161.	15133.
-6.0 < -6.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
-5.5 < -6.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
実験後	-5.0 < -5.5	15076.	14590.	14227.	13776.	13463.	14676.	14363.	13927.	13493.
粒度	-4.5 < -5.0	43.38	275.79	303.36	233.91	183.18	451.27	205.87	310.67	365.25
分布	-4.0 < -4.5	9.77	17.80	9.45	0.00	21.74	50.24	14.09	46.40	20.00
	-3.5 < -4.0	10.54	8.83	15.91	7.10	2.64	6.20	12.04	16.11	7.21
	-3.0 < -3.5	6.59	6.07	0.94	11.34	8.53	15.56	14.58	6.36	6.10
	-2.5 < -3.0	4.03	8.78	4.68	2.36	4.44	10.16	7.44	9.50	5.14
	-2.0 < -2.5	2.94	8.37	2.69	1.77	1.90	4.53	5.49	3.99	2.12
	-1.5 < -2.0	2.71	5.99	2.14	1.51	2.38	4.95	3.61	3.75	2.96
	-1.0 < -1.5	3.16	4.95	2.44	1.79	2.66	3.70	4.20	3.17	2.22
	sand	131.17	128.80	130.24	124.02	121.79	37.07	42.07	37.71	28.90
	silt	89.20	86.66	86.50	85.57	83.12	24.12	23.91	22.97	20.83
	clay	5.51	4.96	5.65	5.63	4.62	1.20	1.70	1.37	1.27
TOTAL (g)	30552.00	30243.00	29686.00	29122.00	28647.00	30522.00	29913.00	29578.00	29116.00	28654.00
RUN No.	A-MS-1 3	A-MS-2 3	A-MS-3 3	A-MS-4 3	A-MS-5 3	C-MS-1 3	C-MS-2 3	C-MS-3 3	C-MS-4 3	C-MS-5 3
実験時間(min)										
投入試料重量(g) M	15013.	14786.	14586.	14314.	14055.	15000.	14920.	14548.	14324.	14167.
S	15013.	14723.	14443.	14238.	14109.	15000.	14813.	14708.	14445.	14286.
ϕ										
-5.0 < -5.5	14786.	14586.	14314.	14055.	13760.	44920.	14548.	14324.	14167.	14091.
-4.5 < -5.0	91.43	141.66	209.65	209.78	232.91	0.00	358.90	206.33	146.56	57.97
-4.0 < -4.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	63.37	0.00	0.00	0.00	16.04
実験後	-3.5 < -4.0	14723.	14443.	14238.	14109.	13986.	14813.	14708.	14445.	14286.
粒度	-3.0 < -3.5	259.29	187.61	128.67	66.12	74.49	151.70	77.94	242.12	130.54
分布	-2.5 < -3.0	12.39	12.65	9.86	5.15	5.90	10.29	5.16	5.84	8.55
	-2.0 < -2.5	8.61	6.36	4.48	2.51	2.87	4.70	3.11	4.11	3.71
	-1.5 < -2.0	5.33	4.43	2.95	2.23	2.23	2.84	2.49	2.08	2.41
	-1.0 < -1.5	3.25	2.77	2.11	1.20	0.77	1.74	1.54	1.44	1.14
	sand	44.92	44.64	36.50	33.65	34.56	14.89	11.38	9.79	8.74
	silt	84.14	64.63	73.27	59.87	58.64	15.65	14.38	13.46	12.32
	clay	7.64	15.25	9.51	7.49	5.63	1.82	2.10	1.83	2.03
TOTAL (g)	30026.00	29509.00	29029.00	28552.00	28164.00	30000.00	29733.00	29256.00	28769.00	28453.00

このとき $63\mu\text{m}$ の格子ふるいを用いて、砂よりも大きな岩屑とシルト・粘土とを分離した。そして③バケツの濁り水中のシルトと粘土については沈降速度(Rubey, 1933)の違いを利用して、濁り水からシルトの沈澱粒子を分離して採取した。④残った濁り水を1~2週間放置してうわ水を捨て、沈澱粒子(粘土分)を小量の水と共に蒸発皿に採取した。

以上のようにして採取した全ての岩屑をまず炉乾燥させた。そして礫は $0.5\phi$ 間隔で粒度分析した。また砂・シルト・粘土はそれぞれ一括して乾燥重量を測定した。なお試料礫が細粒化してきた岩屑の重量は、原則として $0.01\text{g}$ 単位で電子天秤を用いて測定した。

#### d. 各 case 毎に繰り返し使用される試料礫

実験試料の量に限りがあるために、各 case 毎に4~5回繰り返された run では同一の試料礫を使用した。つまり各 run で粒度分析が終了した後、投入試料の粒径階級に残った礫だけを次の run の試料礫とした。そのために投入する試料礫の量は run が重なるに従って減少した。また繰り返し行った run の積算時間は、すべての case で15分間であり、従来の実験と比べると極めて短い。

### III 実験結果

各 case, run 每の実験時間・投入試料重量・実験後の粒度分析結果を第2表と第3表に示す。各 run の名称は「岩種一粒径の組合せ—繰り返しの順位」で表示する。例えば、「A-LL-3」は安山岩の L サイズ単一粒径実験で3回目に実施された run を意味する。

また粒度分析結果のうち、シルトと粘土の重量に関しては、その和が実験前の投入試料重量と実験後の砂以大の岩屑の重量の残差に等しくなるように補正した。

#### 1) 生産岩屑の重量比率と試料礫の重量損失率

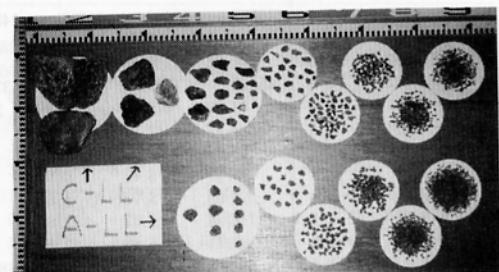
これらのデータから安山岩とチャートの細粒化特性を定量的に比較するために次の2つの重量比率を定義する。つまり、第2表と第3表の粒度分析結果にみられるように各 run で試料礫は細粒化し、投入試料礫の $0.5\phi$ 階級より小さい階級の岩屑に変わった。このような岩屑を本研究では「生産岩屑」と呼び、

生産岩屑の重量を投入試料礫の重量で除したものを「生産岩屑の重量比率」と称する。また各 run 後に投入試料の $0.5\phi$ 階級に残った試料礫の重量と、投入試料礫の重量の差を「試料礫の重量損失量」と呼び、これを投入試料礫の重量で除したもの「試料礫の重量損失率」と称する。

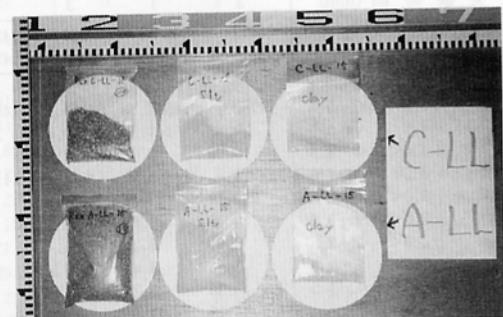
すると单一粒径実験では「生産岩屑の重量比率」と「試料礫の重量損失率」の和は1となる。また二粒径混合実験では大きい方の試料礫が破碎してできた岩屑の一部が、実験後に小さい方の階級に加わっている可能性がある。そのため、小さい方の試料礫の重量損失率は実際よりも多少低くなる可能性が残るが、第3表からその量は問題とならないほど小さいと推定される。

#### 2) 安山岩礫とチャート礫の細粒化特性の概略

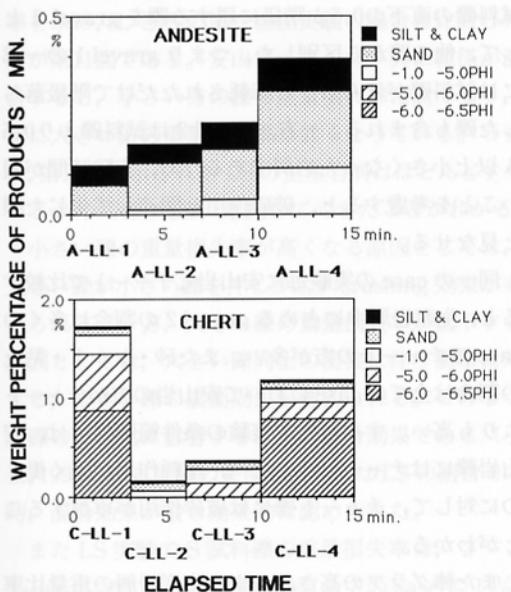
実験から、安山岩礫とチャート礫で細粒化特性に3つの相違点と2つの共通点が認められた。つまり



第6図 L サイズ単一粒径の実験で5分間に生産された全ての岩屑 (2 mm 以上)



第7図 L サイズ単一粒径の実験で5分間に生産された砂以小の全ての岩屑



第8図 L サイズ単一粒径実験の各 run で生産された岩屑の重量比率とその構成粒径

棒グラフの幅は各 run の実験時間に対応する。

相違点は①チャート礫では試料礫の破碎に伴い礫が多く生産されるのに対して、安山岩礫では砂以小の岩屑が多く生産される点、②L サイズではチャートの方が急激に細粒化する点、③S サイズでは逆に安山岩の方が速く細粒化する点の 3 点であり、共通点は④試料礫に破碎が効果的に生じた時に重量損失率が高くなる点、と⑤LS 実験で細粒化に及ぼされる粒径の混合効果が顕著である点の 2 点である。まず①の細粒化様式の違いが最も顕著であった LL 実験の結果から説明する。

### 3) LL 実験における安山岩礫とチャート礫の細粒化特性

#### a. 細粒化様式

第 6 図と第 7 図には、A-LL-4 と C-LL-4 で 5 分間の実験で試料礫から生産された全ての細粒岩屑を粒径順に並べてある。つまり、チャート（上行）では破碎されて大きな岩屑が生産されたのに対して、安山岩（下行）では  $-5.0\phi$  より小さい岩屑しか生産されなかった。ところが granule になると安山岩の方が量が増え、さらに第 7 図に示す砂・シルト・粘土に至っては、安山岩の方が多くの岩屑を生産した。

このような細粒化様式は LL 実験の他の run でも認められた（第 8 図）。つまり、いずれの run においても安山岩では砂以小の岩屑を主に生産しているのに対して、チャートでは生産岩屑に占める砂以小の割合が少ないことがわかる。

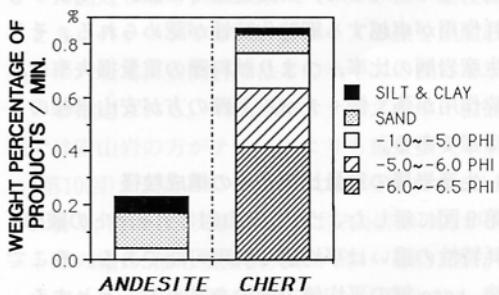
#### b. run 毎の細粒化速度

さらに生産岩屑の重量比率に関しては、安山岩では run の回数が重なるに従って漸増した。これには実験時間が長くなるにつれて①試料礫に破碎が生じ  $-5.0\phi$  以小の礫を生産したこと、また②その破断面から granular disintegration (鉱物剝離) が盛んになったこと、さらに③礫表面の texture が礫同士の衝突で次第に粗くなり、表面からの granular disintegration が増加したこと、以上 3 つの原因が関わっていることが観察された。

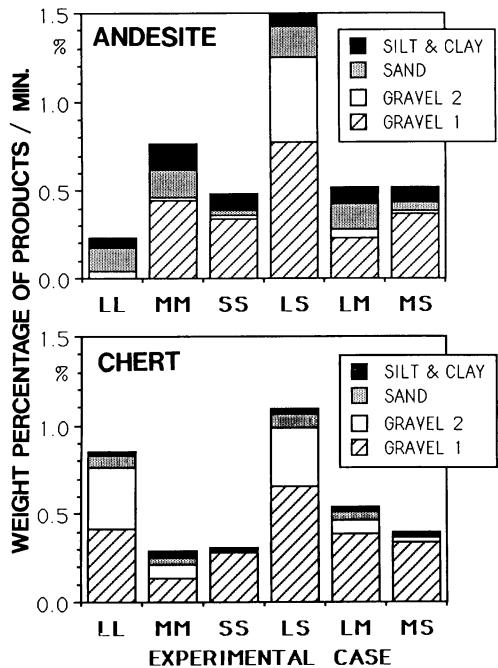
一方チャートでは生産岩屑の重量比率が、run 每に大きく異なる。つまり C-LL-1 と C-LL-4 では破碎して  $-5.0\phi$  より大きな礫が多量に生産された。そのため生産岩屑の重量比率、言い替えれば試料礫の重量損失率が高くなかった。また破碎は確率的に生じる現象であるため、生産岩屑の重量比率は run 每に大きく異なる。

#### c. 1 分間当たりの平均値で安山岩とチャートの細粒化特性を比較

これらの run 每のばらつきを実験時間を考慮した重み付け平均でそれぞれ安山岩とチャートにつき均し、1 分間当たりの生産岩屑の重量比率とその構成粒



第9図 L サイズ単一粒径の実験における生産岩屑の重量比率とその構成粒径



第10図 生産岩屑の重量比率とその構成粒径

径を比較したのが第9図である。LL実験における安山岩礫とチャート礫の平均的な細粒化特性がこの図から充分に読み取れる。

本研究では便宜上、砂以小の細粒岩屑を生産する試料礫の細粒化様式を「摩耗作用」と呼び、礫を生産する細粒化様式を「破碎作用」と呼ぶこととする。すると本実験の条件範囲内でLL同士が衝突するとき、チャート礫では主に破碎作用が摩耗作用よりも卓越するのに対して、安山岩礫では破碎作用よりも摩耗作用が卓越する細粒化特性が認められる。そして生産岩屑の比率、つまり試料礫の重量損失率は、破碎作用が強く働くチャート礫の方が安山岩礫の4倍ほどである。

#### 4) 生産岩屑の重量比率とその構成粒径

第9図に示したように、安山岩とチャートの破碎・摩耗特性の違いは平均値で表現可能である。そこで以後、case毎の平均値で議論を進めることとする。第10図に全てのcaseにつき、1分間当たりに生産された岩屑の重量比率とその構成粒径を示した。ここで

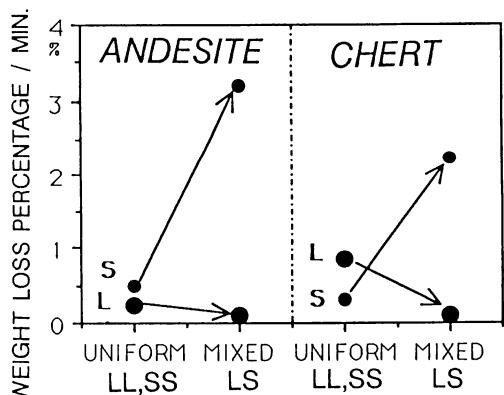
試料礫の直下の $0.5\phi$ 階級に属する礫をgravel 1として、他の礫から区別した。つまりgravel 1の一部には試料礫がほんの少し摩耗されただけで階級落ちした礫も含まれる。一方、gravel 2は試料礫より $0.5\phi$ 以上小さくなった岩屑であるため、実験時間が短いことを考慮すると、破碎作用と関連して生じた礫と見なせる。

同一のcaseの実験毎に安山岩とチャートで比較すると、生産岩屑中に占めるgravel 2の割合は多くのcaseでチャートの方が多い。また砂・シルト・粘土の割合は全てのcaseにおいて安山岩の方がチャートよりも高い。すなわち本実験の条件範囲内では、安山岩礫にはチャート礫と比べ、摩耗作用が強く働くのに対して、チャート礫には破碎作用が卓越することがわかる。

また棒グラフの高さ、つまり生産岩屑の重量比率をまず単一粒径実験で比べてみると、安山岩ではLサイズで最も低く、M・Sサイズで比較的高いのに対して、チャートでは逆にLサイズ礫が最も高く、M・Sサイズが低い。一方二粒径混合実験では、安山岩・チャート共にLSのcaseで生産岩屑の重量比率が最も高い。特に安山岩ではこのcaseが唯一gravel 2の生産率が高くなっている。つまり、LS実験では破碎が効果的に生じていることがわかる。

#### 5) 磕の細粒化に影響する粒径の混合効果

LS実験でL,Sそれぞれの試料礫につき重量損失



第11図 磕の細粒化に影響する粒径の混合効果

率を求め、L と S の单一粒径実験の場合と比較したのが第11図である。安山岩・チャート共に粒径が混合すると、小さい方の礫の重量損失率は高くなり、逆に大きい方の重量損失率は低くなっている。つまり、第10図に示された LS の生産岩屑はほとんどすべて S サイズ礫が破碎・摩耗してできたことがわかる。

小さい礫の重量損失率が高くなる原因としては、大きい礫が小さい礫を押しつぶす crushing 効果が考えられる。一方、大きい礫の重量損失率が低下する原因としては、大きい礫同士の衝突に伴う衝撃に対する、小さい礫の緩衝効果が考えられる。この 2 つが礫の細粒化に影響する粒径の混合効果である（小玉, 1990a）。本実験の条件範囲内では LS の組合せの時、混合効果が最も効果的に認められた。

また LS 実験で S 試料礫の重量損失率は、2 ~ 3 %/min.に達し、単一粒径の時(全ての case で 1 %/min.以下) と比べてはるかに大きい。つまり、細粒化を考える際に、粒径が混合することは極めて大切な条件である。さらに安山岩の S がチャートの S よりも約 1 %/min. 重量損失率が高い。これは LL 実験でチャートの方が安山岩よりも重量損失率が高いことと対照的である。

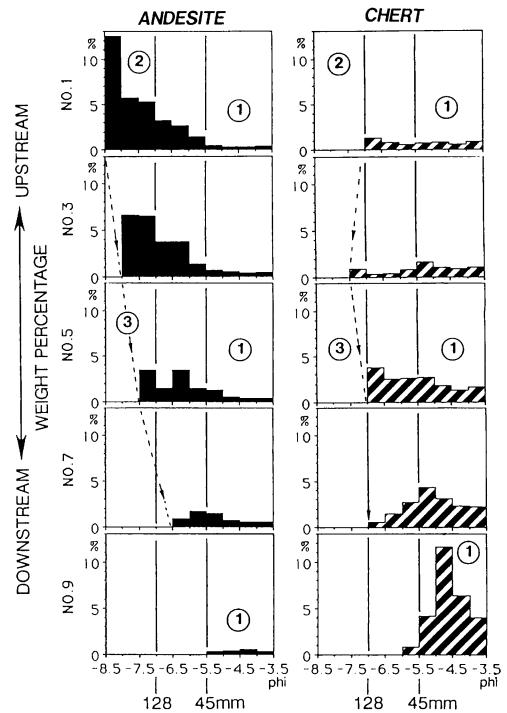
#### IV 考 察

##### 1) 渡良瀬川における粒径別岩種構成比の縦断的な変化の解釈

小玉ほか (1989, 第 6 図) は、渡良瀬川において粒径別岩種構成比の下流方向への変化が、安山岩とチャートで著しく異なることを示した。第12図にその様子を抜粋して示す。

ここに 3 つの特徴が認められる。つまり、①-5.5  $\phi$  以下の安山岩礫は河床に極端に少ないのでに対し、チャート礫は下流方向にその存在比率を高めること、②-7.0  $\phi$  よりも大きな安山岩礫は河床に多くあるのに対して、チャート礫は極端に少ないと、③ boulder, cobble サイズの安山岩礫はその比率が下流方向に急減するのに、チャート礫はあまり変化しないこと、の 3 点である。

①に関しては、ERC-ABRASION-MIXER 実験から得られた安山岩礫とチャート礫の破碎・摩耗特性



第12図 渡良瀬川の河床礫に占める安山岩礫とチャート礫の存在比率の縦断変化  
小玉ほか (1989) の第 6 図から安山岩とチャートを抜粋した。①～③は本文参照。

で定性的に説明できる。この点を M, S サイズの礫の生産と消費の両面から検討する。

実験結果によると、チャート礫は一般に破碎され、小さな礫になる傾向が強いのに対して、安山岩礫は砂以小の細粒物質を生産する特徴が認められる(第 6 ~10 図)。つまり、boulder や cobble 矿が細粒化するとき、チャートでは M, S サイズの礫を生産しやすいのに対して、安山岩ではこのサイズの礫になりにくいと推定される。一方、M, S サイズの单一粒径実験では安山岩の方がチャートよりも重量損失率が高い(第10図)。またこのサイズは大きな礫に crushing され易く、特に LS 実験の S では安山岩礫の方がチャート礫の約 1.5 倍も重量損失率が高い(第11図)。

すなわち、安山岩礫の方がチャート礫よりも M, S サイズの礫を生産しにくいのに併せて、これらのサイズは crushing され易い特性があり、そのためには河

床に極端に少ないと解釈される。一方チャート礫では大きな礫は破碎され易く、そのとき pebble サイズの礫も生産される。しかも pebble サイズのチャート礫は安山岩礫と比べ crushing されにくい。そのために下流方向にチャート礫の存在比率が高まっているものと解釈される。

②に関しては、まず第 1 に上流から供給される礫のサイズが強く影響していると考えられる。つまり、安山岩は火山泥流等で巨礫として多量に河川に供給されるのに対して、チャートは巨礫として供給される量が比較的少ないと考えられる。

また仮にチャートの巨礫が多量に河川に供給されても、巨礫同士がぶつかり合う条件(LL 実験の結果を外挿する) では、チャート礫はたやすく破碎して粒径を急激に減少する特性が考えられる。なぜなら、堆積岩であるチャート礫には層理や節理が密に発達し、これらに沿って風化が進み、そのために礫の破碎に対する強度が低下するためである。実際チャート礫をハンマーで叩くと弱線沿いに割れ、割れた面にはしばしば風化に伴う汚れが観察される。大きな礫ほど衝突時の衝撃力も強く、また多くの層理面や節理面が存在するために、強度が低下すると考えられる。このことは、チャート礫の巨礫が河床に少ないことと矛盾しない。

一方安山岩礫は巨礫ほど破碎しにくい傾向がある。実際安山岩の巨礫をハンマーで叩き割ろうとしても容易ではない。これは、安山岩がチャートと比較すれば均質で、内部に卓越する弱線が存在しないためであろう。実際、安山岩の巨礫を割ってみても内部は新鮮で、風化に伴う変色はせいぜい表面数 mm に風化リングとして認められる程度である。

③に関しては、本実験の条件範囲内で得られた結果からは説明がつかない。但し L サイズの安山岩礫は主に摩耗作用で粒径を減少させることを考慮すると、たとえ大きい礫が移動しない条件でも流送される細粒物質によって摩耗され、その場で粒径を小さくすることが考えられる。しかもこのような状況は、大きい礫も流送されるような大規模出水ばかりでなく、比較して小規模の出水でも出現する。従って、一つの礫が摩耗作用を受ける機会は多いと考えられ

る。一方同じような状況にさらされてもチャート礫はあまり摩耗されないためにその場で粒径を減少しにくいと考えられる。この違いが両岩種の大きな礫の存在比率の下流方向への変化をもたらしている可能性がある。

## 2) ERC-ABRASION-MIXER 実験から得られる粒径減少率

### a. 粒径減少率の算出方法

ERC-ABRASION-MIXER 実験の結果が礫径の下流方向への減少をどれほど説明し得るか? を従来の研究と同様に、礫径の減少率を用いて検討する。

河床礫の粒径の下流方向への減少には Sternberg (1875) の法則 ((1)式) がよく当てはまる。

$$W = W_0 e^{-a_w X} \quad (1)$$

ここで  $W_0$  は特定の礫の任意起点 ( $X = 0$ ) における重量、  $W$  は距離  $X$  だけ流下したときの特定礫の重量、  $a_w$  は摩耗係数である。また重量  $W$  と粒径  $D$  の関係は、  $W \propto D^3$ だから(1)式は次のように変形される。

$$D = D_0 e^{-a_b X} \quad (2)$$

ここで  $D_0$  は特定の礫の任意起点 ( $X = 0$ ) における粒径、  $D$  は距離  $X$  だけ流下したときの特定礫の粒径、  $a_b$  は礫径の減少係数である。そして、

$$a_w = 3 a_b \quad (3)$$

となる。この礫径の減少係数  $a_b$  は、礫径の下流方向への減少率を表している。つまり、この値が大きいほど礫の大きさは下流方向に急激に減少することを示している。

本実験の結果から(1), (3)式より  $a_b$  を求め、従来の実験結果や実際河川での礫径の減少率と比較する。そのため、(1)式の  $W_0$  は投入試料礫の重量、  $W$  は実験後に投入試料の粒径階級及び gravel 1 に属する岩屑の重量とした。

gravel 1 を  $W$  に含めたのは、従来の研究との比較のためである。つまり、従来の実験では礫に働く衝撃力が弱かったために、主に摩耗作用で礫径は連続的に減少した。一方、本研究で粒度分析した岩屑のうち gravel 1 の一部は、試料礫が連続的に粒径を減少させたものである可能性が高い。すると gravel 1 の一部は、従来の実験では試料礫として重量測定さ

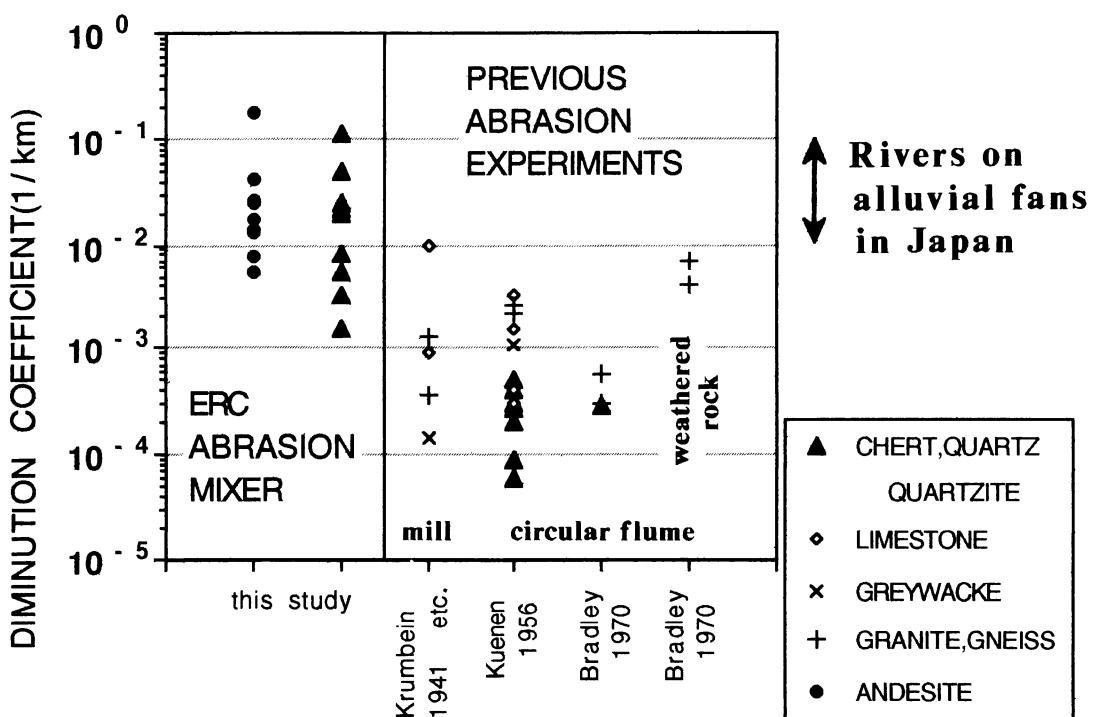
れたものに当たる。そこで本研究でも gravel 1 を  $W$  に含めた。つまり、試料礫の実際の重量減少はこの方法で求めたものよりもさらに大きいことになる。

ドラム実験で問題となるのは距離  $X$  である。つまり、一定時間のドラム実験で礫に働く破碎・摩耗作用が、実際河川でどれほどの距離、礫が流送される間に受ける破碎・摩耗作用に相当するか？この礫の「移動相当距離」の見積りにはなんらかの仮定が必要となる。

従来の研究ではドラムの円周×回転数を便宜的に移動相当距離と見なしてきた (Wentworth, 1919 ; Krumbein, 1941 など)。ドラムに多量に投入された礫の運動は、単にドラムの円周面に沿って転動することではなく、礫の上を転がり落ちたり、また礫の集団全体がドラムの回転で引きずり上げられ、そのまま滑り落ちる運動を繰り返したりする。つまり、礫

の移動距離が円周×回転数に単純に対応するわけではない。しかし今のところ、他に適当な距離の算定法は提案されていない。そこで本研究でもこの方法に従い、従来の実験結果と比較する。つまり本研究では、全ての実験が 1 分間当たり約 60m ( $0.7\text{m} \times \pi \times 25$  回転) の移動距離に相当する。この移動相当距離を用いて、各 case で 4 ～ 5 回の run それぞれにつき粒径減少率を求め、その平均値を各 case の粒径減少率とした。

ちなみに、ERC-ABRASION-MIXER 実験では躍動 (saltation) に伴う礫同士の衝突速度を実際河川に相似させていている。つまり、実験で一つの礫が落下する回数が、衝突回数にはほぼ等しくなるわけで、その回数分躍動して礫が流下するものと仮定できる。実験中 L サイズ礫は 1 分間当たり 35 ～ 40 回落下することを測定した。ここで礫が 1 回の躍動で流下する距



第13図 粒径の減少率の比較

従来の実験及び日本の主要な扇状地河川の値は、Shaw and Kellerhals (1982) の Table 12 に従った。

離を最大に見積り粒径の30倍 (Wiberg and Smith, 1985 など) と仮定すると、40回×粒径×30が躍動回数から求めた礫の1分間当りの最大に見積った移動相当距離となる。つまり、L : 131m, M : 46m, S : 16m である。これらの値は、ドラム円周×回転数による方法で算出した約60m とオーダー的に大差はない。つまり、粒径の減少率をオーダーで議論する場合には、どちらの方法で求めた移動相当距離を採用してもほぼ同様な結果になる。

#### b. 粒径減少率の比較

ERC-ABRASION-MIXER 実験から求めた粒径減少率を従来の実験結果と比較して第13図に示した。ERC-ABRASION-MIXER 実験では、チャートと安山岩いずれの場合も粒径の減少率は  $10^{-3} \sim -1$  にある。従来の実験のチャートでは  $10^{-3}$  よりも小さな値しか得られていない (Kuenen, 1956; Bradley, 1970)。石灰岩の碎石 (Krumbein, 1941) や風化した花崗岩や片麻岩を用いた実験 (Bradley, 1970) ですら  $10^{-2}$  しか得られていなかった。つまり、ERC-ABRASION-MIXER 実験で得られた礫径の減少率は従来の実験の結果よりも 1~2 オーダー以上大きな値を示している。さらに日本の主要な扇状地河川における礫径の減少率は  $10^{-2} \sim -1$  のオーダーであり、ちょうど ERC-ABRASION-MIXER 実験で得られた値とオーダー的に一致することがわかる。

礫径の下流方向への減少の原因を扱っている最近の研究では、選択運搬作用が主流である (Knighton, 1982; Brierley and Hickin, 1985; Dawson, 1988; Ashworth and Ferguson, 1989 など)。その主な原因是、従来の摩耗実験から提示された礫径の減少率が実際河川のものよりも 1~2 オーダー以上小さな値であった点にある。現在多くの研究者は、この点を寄りどころに、摩耗作用はマイナーな要因と見なしている。ところが礫同士の衝突を野外に相似させた ERC-ABRASION-MIXER 実験から得られた礫径の減少率はオーダーで日本の主要な扇状地河川のものと一致した。この結果は、礫の破碎・摩耗作用が充分に実際河川での粒径減少率を説明し得ることを示唆している。

#### V おわりに

出水時に生じる礫同士の衝突速度を実際河川に相似させた礫の破碎・摩耗実験 (ERC-ABRASION-MIXER 実験) を行った。試料礫は渡良瀬川の現河床から採取した安山岩礫とチャート礫で、3つのサイズ (L, M, S) を用い、単一粒径実験及び二粒径混合実験を実施した。

その結果、次の5点が明らかになった。①礫同士の衝突を野外に相似させた実験では礫は破碎し、礫径を急激に減少させる。②チャート礫は破碎して礫を生産するのに対して、安山岩礫は摩耗して、砂・シルトなどを生産する細粒化特性がある。③L サイズでは、チャート礫は割れて急激に重量損失するのに対して、安山岩礫は割れにくくあまり重量損失がない。④S サイズでは、安山岩礫はチャート礫よりも重量損失が大きい。⑤粒径が混合することが礫の細粒化に強く影響する。その際に crushing 作用が重要である。以上の実験結果から渡良瀬川における pebble サイズの安山岩礫とチャート礫の縦断的な変化特性が定性的に解釈できた。

さらに、ERC-ABRASION-MIXER 実験の結果から礫径の減少率を求め、従来の実験結果や日本の主要な扇状地河川での粒径減少率と比較した。その結果、① ERC-ABRASION-MIXER 実験で得られた礫径の減少率は従来の実験のものよりも 1~2 オーダー以上大きな値を示していること、さらに②日本の主要な扇状地河川における礫径の減少率と、ERC-ABRASION-MIXER 実験で得られた減少率とがオーダー的に一致することが明らかになった。すなわち ERC-ABRASION-MIXER 実験の結果は、礫の破碎・摩耗作用で充分に野外での粒径減少を説明できる可能性を示している。

#### 謝 辞

本研究を進めるに当り、筑波大学地球科学系の池田宏・伊勢屋ふじこ両先生には、終始有益なご助言を頂いた。実験試料の採取にもご助力頂いた。実験装置 (ERC-ABRASION-MIXER) の製作に当っては、池田宏先生に契機を与えて頂き、筑波大学水理

実験センターの飯島英夫技官に多大なるご協力を頂いた。実験は宮坂恵美子さんの協力を得て行った。特に実験試料を揃えるための岩種分け作業で大変ご助力頂いた。本稿の作成に当っては、伊勢屋ふじこ先生に粗稿段階から幾度も読んで頂き、多くの貴重なご意見を賜った。筑波大学地球科学系地形学分野の諸先生方ならびに院生諸氏には、地形学演習をはじめとして機会ある毎にご助言を頂いた。実験装置の命名には、大型水路を使用した実験のために、当時水理実験センターの外国人研究員として来学された Middlebury College (USA) の John C. Schmidt 博士と U. S. Geological Survey, Menlo Park の David M. Rubin 博士の助言を得た。記して皆様に深謝いたします。

本研究は、文部省科学研究費補助金 一般研究 B (河川における混合砂礫の流送機構の研究、代表者 筑波大学地球科学系 高山茂美教授 課題番号 62, 460, 235) の一部を使用して行なった。

## 文献

- 小玉芳敬・池田 宏・伊勢屋ふじこ (1989) : 渡良瀬川における粒径別岩種構成比の縦断変化—沖積礫床河川における礫の破碎・摩耗効果の重要性—. 筑波大学水理実験センター報告, 13, 13~25.
- 小玉芳敬 (1990a) : 磨の破碎・摩耗による細粒物質の生成: 東河内沢の礫を用いた回転ドラム実験. 高山茂美編, 『河川における混合砂礫の流送機構の研究』—昭和62・63・平成元年度文部省科学研究費補助金 (一般研究 B) 研究成果報告書, 研究課題番号 (62, 460, 235) —, 125~134.
- 小玉芳敬 (1990b) : 梓川と寒河江川における“割れ円礫”的存在比率について, 筑波大学水理実験センター報告, 14, 109~114.
- 土屋義人・渡戸健介・青山俊樹 (1969) : 水流による砂れきの saltation の機構(1). 京大防災研究所年報, 第 12 号 B, 475~490.
- 土屋義人・青山俊樹 (1970) : 水流による砂れきの saltation の機構(2). 京大防災研究所年報, 第 13 号 B, 199~216.
- 水山高久 (1990) : 河床砂礫の粒径減少に関する試験. 土木研究所資料, 第 2834 号, 113p.
- 森脇 広・野上道男・初見祐一・井上芳郎 (1985) : 回転

- ドラムによる碎屑物の破碎・摩耗実験—特に粒度組成の時間変化について—. 地理学評論, 58 (Ser. A), 385~390.
- 矢野勝正・土屋義人・青山俊樹 (1969) : 掃流砂れきの saltation に関する実験. 京大防災研究所年報, 第 12 号 B, 491~502.
- 渡部景隆 (1973) : 『かわらの石の科学』岩崎書店, 56p.
- Ashworth, P. J. and Ferguson, R. I. (1989) : Size-selective entrainment of bed load in gravel bed streams. *Water Resources Research*, 25, 627~635.
- Bagnold, R. A. (1973) : The nature of saltation and of bed-load transport in water. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A.*, 332, 473~504.
- Bradley, W. C. (1970) : Effect of weathering on abrasion of granitic gravel, Colorado River, Texas. *Geological Society of America Bulletin*, 81, 61~80.
- Bradley, W. C., Fahnestock, R. K. and Rowekamp, E. T. (1972) : Coarse sediment transport by flood flows on Knik River, Alaska. *Geological Society of America Bulletin*, 83, 1261~1284.
- Brierley, G. J. and Hickin, E. J. (1985) : The downstream gradation of particle sizes in the Squamish River, British Columbia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, 597~606.
- Daubrée, A. (1879) : *Études synthétiques de géologie expérimentale*. 2 volumes., Dunod, Paris.
- Dawson, M. (1988) : Sediment size variation in a braided reach of the Sunwapta River, Alberta, Canada. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13, 599~618.
- Knighton, A. D. (1982) : Longitudinal changes in the size and shape of stream bed material: evidence of variable transport conditions. *Catena*, 9, 25~34.
- Krumbein, W. C. (1941) : The effects of abrasion on the size, shape and roundness of rock fragments. *Journal of Geology*, 49, 482~520.
- Kuenen, Ph. H. (1955) : Experimental abrasion of pebbles. I. wet sandblasting. *Leidsche Geologische Mededeelingen*, 20, 142~150.
- Kuenen, Ph. H. (1956) : Experimental abrasion of pebbles 2. Rolling by current. *Journal of Geology*, 64, 336~368.
- Marshall, P. (1927) : The wearing of beach gravels.

- Transactions and Proceedings of the New Zealand Institute*, **58**, 507—532.
- Marshall, P. (1929) : Beach gravels and sands. *Transactions and Proceedings of the New Zealand Institute*, **60**, 324—365.
- Oya, Y. (1981) : Percussion marks on pebbles of recent fluvial sediments, Central Japan. *The Journal of Earth Sciences, Nagoya Univ.*, **29**, 13—28.
- Pettijohn, F. J. (1957) : *Sedimentary Rocks, Second Edition*, Harper & Brothers, New York, 718p.
- Potter, P. E. (1955) : The petrology and origin of the Lafayette gravel. *Journal of Geology*, **63**, 1—38.
- Rayleigh, Lord (1942) : The ultimate shapes of pebbles, natural and artificial. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A.*, **181**, 107—118.
- Rayleigh, Lord (1944) : Pebbles, natural and artificial. Their shape under various conditions of abrasion. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A.*, **182**, 321—335.
- Rubey, W. W. (1933) : Settling velocities of gravel, sand and silt particles, *American Journal of Science*, **25**, 325—338.
- Sarmiento, A. (1945) : Experimental study of pebble abrasion. *Unpublished Master's dissertation, Dept. of Geology, Univ. of Chicago*, 1—52.
- Shaw, J. and Kellerhals, R. (1982) : The composition of recent alluvial gravels in Alberta river beds. *Alberta Research Council. Bulletin*, **41**, 151p.
- Sternberg, H. (1875) : Untersuchungen über Längen und Querprofil geschiebeführender Flüsse. *Zeitschrift für Bauwesen*, **25**, 483—506.
- Wentworth, C. K. (1919) : A laboratory and field study of cobble abrasion. *Journal of Geology*, **27**, 507—522.
- Wiberg, P. L. and Smith, J. D. (1985) : A theoretical model for saltating grains in water. *Journal of Geophysical Research*, **90**, No. C4, 7341—7354.