

渡良瀬川における粒径別岩種構成比の縦断的変化 ——沖積礫床河川における 礫の破碎・摩耗効果の重要性——

Rapid Downstream Change in the Composition
of River-bed Sediment in the WATARASE ;
An Importance of Gravel Abrasion

小玉 芳敬*・池田 宏**・伊勢屋ふじこ**

Yoshinori KODAMA, Hiroshi IKEDA and Fujiko ISEYA

I はじめに

沖積河川において河床砂礫の粒径が上下流に変化する原因を知ることは、河床縦断形の成立し、すなわち河川周辺の地形を理解する上で極めて重要な問題である。また工学的にも流送砂礫量の見積りや、河川動態の将来予測等を考える際に一つの鍵となる。
1) 河床砂礫の粒径分布に及ぼす選択運搬作用と破碎・摩耗作用

河床砂礫の縦断的な粒径分布を支配する要因として、従来の説明は大きく2つに分類できる(Pettijohn, 1957, pp. 525-573)。①流水による砂礫の選択運搬作用が重要とする考え方と、②流送砂礫の破碎・摩耗作用が重要とする考え方である。

選択運搬作用による河床砂礫の縦断的分布の説明は、掃流力が下流方向へ減少するために、より運ばれにくい大きい礫が順に上流から取り残され、逆に小さな礫が選択的により下流まで運ばれていくというものである(Blissenbach, 1952; 中山・三浦, 1964; Bradley et al., 1972; Knighton, 1980, 1982; Brierley and Hickin, 1985など)。この考え方

では、河床は上昇傾向になくてはならない(Mackin, 1948; Shaw and Kellerhals, 1982; Dawson, 1988など)。

破碎・摩耗作用による説明は、砂礫が出水時に運ばれる時、お互いに激しく衝突したり、擦れ合ったり、さらに砂粒子などによって研磨されたりするために、流下に伴い下流方向にその大きさを減少させるというものである(Sternberg, 1875; Wadell, 1932; Sneed and Folk, 1958; 池田, 1970; Schumm and Stevens, 1973; 小玉, 1988など)。この作用には、乾湿風化や、凍結破碎など流送時以外に風化作用によって礫がその場で小さくなることも含まれる(Shaw and Kellerhals, 1982など)。

最近では、選択運搬作用を重視している研究者が圧倒的に多い。しかし選択運搬作用と破碎・摩耗作用のそれぞれの重みを評価している実証的な研究は意外と少ない。

Dawson (1988) は、カナダのSunwapta川における石灰岩礫の粒径分布の縦断的な変化から、区間にその粒径減少率を求めた。そしてこの値をShaw and Kellerhals (1982) が示した河床低下傾向にある

*筑波大学・院・地球科学研究所 **筑波大学地球科学系

カナダの数河川における石灰岩礫の粒径減少率のデータの平均値と比較して考察した。その結果、破碎・摩耗作用は最高に見積っても約8%であると述べている。しかしこの研究は、粒径の変化率についてだけの、しかも異なった河川間での比較研究であり、この手法で破碎・摩耗作用をどこまで評価することができるか疑問が残る。

またPlumly (1948) は、段丘礫の岩種構成 (-4.0ϕ から -5.0ϕ の粒径階級についてのみ) の縦断変化から、2つの作用の重みを考察している。その結果、Rapid Creekにおける粒径減少に占める破碎・摩耗作用の割合は約25%，選択運搬作用は約75%であると述べている。この結果については、V章2節において再検討する。

以上2つの研究が両作用の比率を考察したものであるが、どちらも選択運搬作用がより有効に働くと結論している。

2) 本研究の立場と目的

従来の研究では、破碎・摩耗作用のうち主に摩耗作用のみが対象とされてきた。例えば、Kuenen (1956) やBradley (1970) の回流水槽用いた礫の摩耗実験では、水路床に小砂利を埋め込み、その上を転動するPebble～cobble大の礫の重量が、転動距離が増すにしたがって、どの様に減少するかを測定している。しかし彼らの実験では、一度に投入される試料礫の数が少なかったために、礫同士の衝突はほとんど生じなかった。従って礫は、せいぜい角がかけて丸くなる程度で、衝突に伴い割れるという現象は起らなかった。これらの実験から、実際河川での急激な粒径変化は摩耗作用ではほとんど説明できないとの見解が得られ、これが、現在多くの研究者の支持を得ている。

ところが日本における多くの扇状地河川での河床砂礫の観察からすると、礫同士の激しい衝突に伴う礫の破碎作用が、粒径の減少に果たす役割が大きいと考えられる。即ち筆者らは、礫同士の激しい衝突を物語るpercussion mark (Oya, 1981) が礫表面に無数に刻まれていることや、形状からみて明らかに割れたと思われる礫 (broken round) が河床に多く存在することなどを目にしてきた。例えば山形盆地

を流れる寒河江川と松本盆地の梓川において、河床にある安山岩の礫の形状を調べた。その結果、現河床にあるpebble～cobble大の安山岩礫の内、その15～20%は明らかに割れていることがわかった。

ところで岩種毎に礫の形状が違うことは、容易に想像される。しかし、河川を問わず岩種毎に礫の形状には共通する特徴があることを観察した。礫の形状はその礫の持つ破碎・摩耗様式により決まっているものと考えられる。例えば、チャートの礫には角張った形状のものが多い。これは、チャートは層理面に沿って割れ易く、しかし摩耗されにくいためと思われる。一方、安山岩の礫には、一般的に球形のものが多い。これは、安山岩はハンマーでたたいてもなかなか割れないほどの強度を持つが、礫の表面は風化して脆くなっている。そのため摩耗作用がより支配的に働くためと思われる。このように礫の形状が岩種毎に大きく異なることは、岩種毎に破碎・摩耗様式が大きく異なることを示していると考えられる。

礫の粒径減少に及ぼす破碎・摩耗作用の効果を正当に評価することが、筆者らの研究の立場である(例えば、池田, 1985)。その際、破碎・摩耗特性の違う岩種に注目して河床砂礫の縦断的な分布を調べることは、河床砂礫の粒径の下流方向への減少に占める、破碎・摩耗作用の役割を評価する有効な手段であると考える。そこで本研究では、河床砂礫を単に粒度組成でみるだけでなく、各大きさ毎の構成岩種の比率の上下流変化まで調べることにより、河床砂礫が縦断方向に一体どの様に変化しているか？ その実態をまず明らかにすることを目的とした。

そのためには、河床に数種類の全く異なった破碎・摩耗特性を持った岩種の礫があり、しかも途中で河床や河岸、また支川からの礫の混入が問題となるないところを調査河川に選ぶことが必要である。また、河床が平衡状態あるいは、むしろ低下傾向にある、日本の多くの扇状地河川の傾向を示す河川区間を対象とした。これらの条件に加え、毎年中規模程度の出水があり砂礫が移動する活発な河川ということで、本研究では渡良瀬川を調査河川に選んだ。

II 渡良瀬川の概況と調査区間の設定

1) 渡良瀬川の概要と流域上流の地質

渡良瀬川は、栃木県上都賀郡足尾町を源として、赤城山地と足尾山地の間を南西方向に流下し、群馬県山田郡大間々町で流路を南東方向に変え、同県桐生市・栃木県足利市等を経て茨城県古河市付近で利根川に合流する。その全長約108km、流域面積2,600 km²である。

群馬県大間々町まで渓谷を流下してきた渡良瀬川は、平野部に出てから足尾山地沿いに流れ、渡良瀬川扇状地を形成している。扇頂部付近では、大間々扇状地面を刻んだ比高30~40mの谷の中を流れ、河床にはところどころに岩盤が露出している。

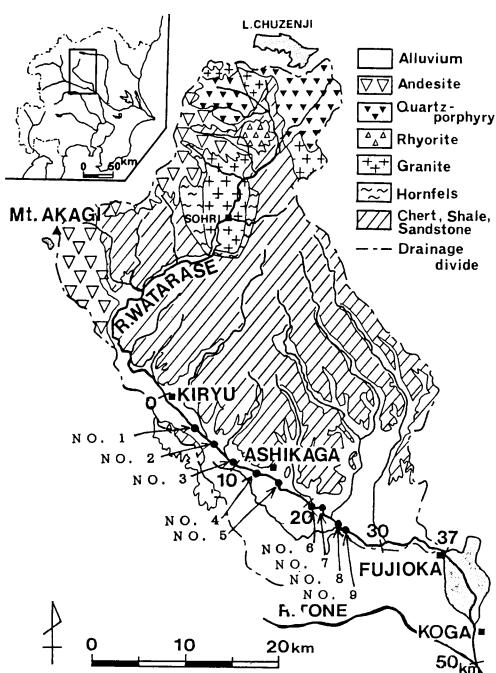
上流山地の地質の概要を第1図に示す。足尾山地は中・古生界の堆積岩から成り、主にチャートと砂

岩・頁岩で構成されている。沢入付近には、花崗岩の岩体が貫入して、その周辺の砂岩・頁岩類は、接觸熱変成作用を受けホルンフェルス化している。流域西方には安山岩が、北方には石英斑岩・流紋岩が分布する。

従って渡良瀬川の河床には、これらの岩種の礫が存在することになる。しかし花崗岩や頁岩の礫は、急激にその大きさを下流方向に減じるために、桐生市より下流の河床礫中にはほとんど見られない。また流紋岩（熔結凝灰岩）は、分布域が狭いために供給量も少なく、下流の河床礫の中にはほとんど見られない。

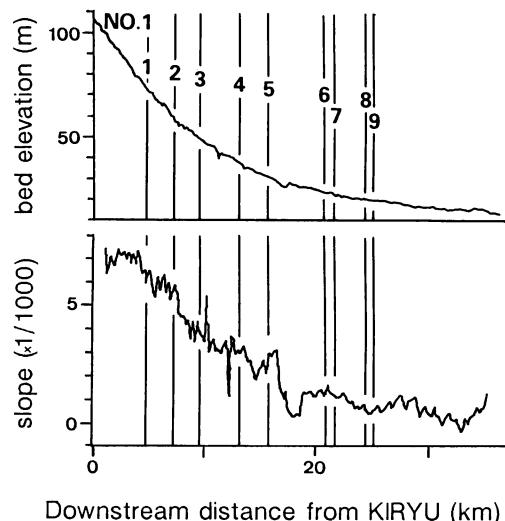
2) 調査区間の設定

第1図には、渡良瀬川の沖積河川区間沿いに、群馬県桐生市の桐生大橋下流約100mを起点とした流下距離を示した。これは、建設省渡良瀬川工事事務所が設定している流下距離と同一である。この流下距離を採用すると、利根川への合流点は50.0kmとなる。以後本研究で使用する「流下距離」や「地点距離」は、全てこの流下距離であらわす。



第1図 渡良瀬川流域の地質図

河道沿いの距離は、桐生を起点とした時の流下距離を、No. 1 ~ No. 9 は、河床砂礫の採取地点をそれぞれ示す。



第2図 渡良瀬川下流部の河床縦断形および河床縦断勾配の上下流変化（建設省渡良瀬川工事事務所の資料から1983年測量のデータをまとめた）と調査地点の位置

第2図に示す河床縦断勾配の上下流変化から明らかなように渡良瀬川下流部の河床勾配は、足利市付近（約17km）で急に緩くなり、平野の地形は沖積低地へと漸移していく。しかし約25km地点までは砂礫床河川であり、それよりも下流で砂床河川となっている（小玉・井口、1986）。

本研究では、沖積砂礫床河川である桐生より下流約25kmの区間を調査対象とした。この区間は、河床礫の破碎・摩耗特性が岩種毎にどの様に違うかを、河床礫の岩種構成比の上下流変化から調べるのに適切であると考える。その理由はこの区間が、①上流端で供給された砂礫が、長年の歳月をかけて下流端から流出していく砂礫の流送システムを見なすことができるためである。つまり一つの樋と見なせる区間である。また、②渡良瀬川扇状地の地形からみて、ここ数千年の間渡良瀬川の河床高度は、ほぼ安定していることが推定できる。従って、砂礫の流送もほぼ平衡状態にあると見なすことができるためである。

これらの選定理由の根拠は次のようにある。確かに調査区間内には、足尾山地側から数本の支川が合流する、つまり、6.0kmで桐生川が、9.0kmで松田川が、20.4kmで袋川が、23.4kmで旗川がそれぞれ合流する。しかし、これらの支川からの礫の流入量は、渡良瀬川本川の流送砂礫量と比べ、問題にならないほど少ないものと考えられる。

というのは、建設省渡良瀬川工事事務所の資料によると計画洪水流量は、最大の支川である桐生川ですら350m³/secで、その合流点よりも上流の渡良瀬川本川が3,500m³/secであり、ほんの1割でしかない。また桐生川は砂礫堆をつくるほどの礫を送流しているものの、合流点は調査区間の比較的上流側にある。

また渡良瀬川合流点付近における他の支川の河床堆積物を観察してみると、ほとんどが砂・シルト・粘土から成っており、中に礫が点在する程度である。つまり、調査区間内における礫の新たな混入は問題とならないほど小さい。

一方現在の渡良瀬川扇状地は、数段に段丘化した大間々扇状地面（約5～2万年前）を開析して形成されていることから、万年単位で渡良瀬川の河床高度変化を考えると、扇状地区間における河床は大局

的には低下傾向にあることがわかる。桐生市付近から下流では、右岸側にある丘陵地の北東面沿いに、比高数mの完新世の段丘面が発達するものの、他は氾濫原の高さにはほぼ等しい扇状地面を形成している。渡良瀬川の現河床は、氾濫原よりも1～2m低下しているが、これは明らかに1950年代後半から60年代にかけての河床砂礫の採掘の結果である。これらのこととは、ここ数千年の間、渡良瀬川はほぼ安定した河床高度を保っていることを示す。

III 調査方法

1) サンプリング地点の選定

河床砂礫のサンプリングを1988年10月8日、10日および、1989年1月11日、14日、15日の5日間にわたって実施した。調査は、平水時に砂礫堆の一部分が水面上に現れ、州となった部分で行った。

調査区間にあるいくつかの州の中から約1～5kmおきに9個の州を選定した（第1表、第1図、第2図）。以後、上流からそれぞれNo.1, No.2, … No.9と呼ぶ。これらの地点は、①人工的な攪乱がないこと、②植生がほとんど侵入していないこと、すなわち最近数年間の内に、砂礫が移動していること、③上下流の礫径変化を捉えるのに適当な距離離れていること、④州へのアプローチが比較的容易であること、などの理由から選定した。

本研究においては、河床砂礫が上下流でどの様に変化するかを調べる。つまり一つの砂礫堆内における砂礫の分級といった細かな議論はしない。そこで一つの州では、河床表面に最大の礫が観察される州の上流側を試料採取場所に選んだ。そして、どこの地点においても、砂礫堆の中のほとんど同じ様な平面的位置から試料採取をするように心掛けた。実際に、州の上流部という単位でみれば、河床表面の砂礫はほぼ均等に広がっている。

2) 粒度分析方法

試料の採取法は、従来の多くの研究に従った。つまり、それぞれの地点で河床表面の礫を1～2層、約1m²の面積内からはぎ取り、その下の砂礫を数10cmの深さでシートの上に掘り上げ、これをすべて粒度分析用の試料とした。試料を掘り上げる深さは、

第1表 渡良瀬川下流部の河床砂礫の粒度分析結果（重量百分率で表示）

試料採取地点、 流下距離	No.1 4.9km			No.2 7.1km			No.3 9.7km			No.4 13.2km			No.5 15.6km			No.6 20.9km			No.7 21.7km			No.8 24.5km			No.9 25.2km				
	粒径階級			% 積算%			% 積算%			% 積算%			% 積算%			% 積算%			% 積算%			% 積算%			% 積算%				
ϕ	-8.0 < -8.5	12.45	12.45	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	-7.5 < -8.0	9.06	21.51	1.79	1.79	12.12	12.12	3.46	3.46	4.58	4.58	4.58	4.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	-7.0 < -7.5	12.92	34.44	4.60	6.39	12.20	24.32	7.82	11.28	4.39	8.97	8.97	8.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	-6.5 < -7.0	7.72	42.16	6.66	13.05	12.08	36.40	10.94	22.22	11.40	20.38	3.74	3.74	1.43	1.43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	-6.0 < -6.5	8.03	50.20	14.40	27.44	9.77	46.17	6.59	28.81	13.58	33.96	9.07	12.81	9.06	10.49	0.42	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
	-5.5 < -6.0	5.66	55.85	12.17	39.61	7.79	53.96	9.44	38.24	10.77	44.73	15.67	28.48	13.68	24.17	6.64	7.06	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77		
	-5.0 < -5.5	6.52	62.37	13.13	52.74	7.15	61.11	8.32	46.56	9.53	54.25	10.94	39.42	13.68	37.86	12.54	19.60	7.58	7.58	9.34	9.34	9.34	9.34	9.34	9.34	9.34	9.34	9.34	
	-4.5 < -5.0	5.59	67.96	9.83	62.57	5.96	67.07	6.11	52.68	6.74	60.99	7.97	47.39	9.10	46.96	8.79	28.39	19.93	29.28	29.28	29.28	29.28	29.28	29.28	29.28	29.28	29.28		
	-4.0 < -4.5	3.98	71.94	5.15	67.71	4.27	71.34	3.57	56.25	4.69	65.68	4.92	52.31	6.60	53.56	6.45	34.85	11.63	40.91	40.91	40.91	40.91	40.91	40.91	40.91	40.91	40.91		
	-3.5 < -4.0	4.38	76.32	6.91	74.62	4.18	75.52	4.63	60.88	4.36	70.04	6.24	58.55	6.24	59.79	7.02	41.86	7.99	48.90	48.90	48.90	48.90	48.90	48.90	48.90	48.90	48.90		
	-3.0 < -3.5	2.75	79.07	4.62	79.25	2.81	78.33	4.75	65.63	3.18	73.22	5.14	63.69	5.17	64.97	5.99	47.85	6.67	55.56	55.56	55.56	55.56	55.56	55.56	55.56	55.56	55.56		
	-2.5 < -3.0	3.46	82.53	3.99	83.24	3.52	81.85	1.56	67.19	2.87	76.09	6.13	69.82	4.26	69.22	5.75	53.60	6.64	62.21	62.21	62.21	62.21	62.21	62.21	62.21	62.21	62.21		
	-2.0 < -2.5	2.64	85.17	3.85	87.09	2.70	84.56	2.88	70.07	2.65	78.74	1.62	71.44	3.82	73.04	5.19	58.79	4.80	67.01	67.01	67.01	67.01	67.01	67.01	67.01	67.01	67.01		
	-1.5 < -2.0	1.09	86.26	1.06	88.15	1.54	86.10	2.52	72.59	1.09	79.83	2.56	74.00	1.48	74.51	3.53	62.32	3.41	70.43	70.43	70.43	70.43	70.43	70.43	70.43	70.43	70.43		
	-1.0 < -1.5	1.69	87.96	2.36	90.51	2.37	88.47	2.63	75.22	2.27	82.10	3.25	77.25	2.99	77.50	3.72	66.04	2.17	72.59	72.59	72.59	72.59	72.59	72.59	72.59	72.59	72.59		
	-0.5 < -1.0	2.10	90.06	2.22	92.73	2.20	90.67	3.17	78.39	2.64	84.75	4.87	82.12	3.82	81.32	3.97	70.01	1.95	74.54	74.54	74.54	74.54	74.54	74.54	74.54	74.54	74.54		
	0.0 < -0.5	2.05	92.11	1.48	94.21	1.68	92.35	3.28	81.66	2.44	87.19	5.39	87.51	4.50	85.82	4.67	74.68	2.46	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00	77.00		
	+0.5 < 0.0	2.47	94.58	0.94	95.15	1.77	94.12	2.87	84.54	2.87	90.06	3.57	91.08	5.04	90.86	6.42	81.10	5.31	82.31	82.31	82.31	82.31	82.31	82.31	82.31	82.31	82.31		
	+1.0 < +0.5	1.92	96.49	1.30	96.45	1.65	95.77	3.60	88.13	2.60	92.66	2.94	94.02	3.28	94.14	8.51	89.62	7.12	89.43	89.43	89.43	89.43	89.43	89.43	89.43	89.43	89.43		
	+1.5 < +1.0	1.86	98.36	1.23	97.68	1.93	97.70	3.09	91.22	3.20	95.86	1.78	95.80	2.93	97.07	5.48	95.10	5.93	95.36	95.36	95.36	95.36	95.36	95.36	95.36	95.36	95.36		
	+2.0 < +1.5	0.91	99.27	1.19	98.88	1.16	98.86	3.90	95.12	2.01	97.87	2.29	98.09	1.70	98.77	3.33	98.42	2.64	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00		
	+2.5 < +2.0	0.42	99.69	0.56	99.44	0.68	99.54	2.37	97.49	1.20	99.07	1.07	99.16	0.84	99.61	1.05	99.47	1.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31	99.31		
	+3.0 < +2.5	0.13	99.82	0.22	99.65	0.23	99.77	1.03	98.52	0.35	99.42	0.39	99.55	0.22	99.83	0.33	99.80	0.33	99.64	0.33	99.64	0.33	99.64	0.33	99.64	0.33	99.64	0.33	99.64
	+3.5 < +3.0	0.09	99.91	0.17	99.83	0.13	99.89	0.80	99.32	0.27	99.69	0.24	99.79	0.09	99.92	0.14	99.94	0.18	99.82	0.18	99.82	0.18	99.82	0.18	99.82	0.18	99.82	0.18	99.82
	+4.0 < +3.5	0.05	99.96	0.11	99.94	0.05	99.94	0.29	99.62	0.14	99.83	0.09	99.88	0.03	99.95	0.03	99.98	0.07	99.89	0.07	99.89	0.07	99.89	0.07	99.89	0.07	99.89	0.07	99.89
	< +4.0	0.04	100.00	0.06	100.00	0.06	100.00	0.38	100.00	0.17	100.00	0.12	100.00	0.05	100.00	0.02	100.00	0.02	100.00	0.02	100.00	0.02	100.00	0.02	100.00	0.02	100.00	0.02	100.00
試料採取重量	613.6kg	363.3kg	562.1kg	358.2kg	362.2kg	355.0mm	26.5mm	38.0mm	19.0mm	363.8kg	362.2kg	358.0mm	19.0mm	19.0mm	272.6kg	213.8kg	48.16kg												
中央粒径	66.0mm	35.0mm														6.8mm	6.8mm	10.5mm											
試料採取年月日	1989/01/15	1988/10/10	1989/01/14	1988/10/08	1989/01/14	1988/10/08	田中橋の下流 約600m	田中橋の下流 約400m	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	1989/01/15	1988/10/10	1989/01/11												
試料採取地点の備考							鹿島橋の上流 約700m	鹿島橋の上流 約600m	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	蛇行区間 約100m	蛇行区間 約100m	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側	左岸側

表面に存在した最大礫 2 層分以上を目安とした。各試料の採取重量を第 1 表に示した。

粒度分析は $1/2\phi$ 間隔で行なった。 -7.0ϕ よりも大きな礫は、中径を直接測定して分類し、 -7.0ϕ より小さな砂礫の分析には、格子型の篩を使用した。また -2.0ϕ より大きな礫は現場で分析した。 -2.0ϕ よりも小さな砂礫は、現場で一括して重量を計り、さらに 4 分割法により一部を実験室に持ち帰り乾燥させた後、分析した。なお、 4.0ϕ より小さなシルト・粘土は一括した。

3) 粒径別岩種構成比の測定方法

-3.5ϕ より大きな礫について、肉眼判定で岩種分けを行った。礫は次の 4 種類に分類した。つまり、①安山岩類、②石英斑岩およびその他の火成岩類、③砂岩およびホルンフェルス類、④チャート類である。

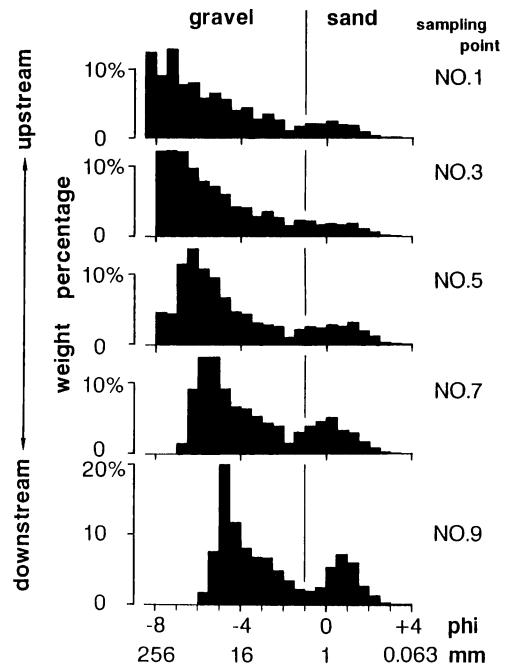
それぞれ粒度分析した試料のうち、 -4.0ϕ より大きな礫は全て上述の 4 種類に分類し、それぞれバネばかりを用いて重量を測り、粒径別岩種構成比を求めた。 -3.5ϕ ~ -4.0ϕ の礫は 1000 粒以上を岩種分けし、重量を測定して岩種構成比を求めた。

IV 調査結果

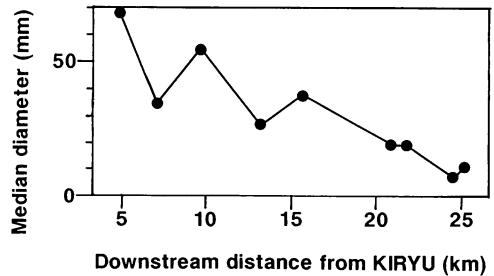
1) 粒度組成の上下流変化

粒度分析の結果を第 1 表に示した。上下流での変化傾向を見易くするために、一つおきに 5 地点を抜き出して、第 3 図にヒストグラムを示す。まず礫の部分についてみると、上流から下流に急激に礫が小さくなっていることがわかる。つまり、調査区間の上流側では、礫のピークが -7.0ϕ ~ -7.5ϕ (約 13~18cm) 近傍にあるのが、調査区間の下流側では、 -4.5ϕ ~ -5.0ϕ (約 2~3 cm) にピークが移ってくる。次に砂の部分に注目すると下流に向かうにつれて、次第にピークが明瞭になる。つまり、上流では粒径分布が単峰性を示すのに対して、下流に向かうに連れて双峰性が顕著になる様子がわかる。

なお、No. 1 ~ No. 8 で、 -1.5ϕ ~ -2.0ϕ の部分が少なくなっているが、これは、野外で使った -2.0ϕ のふるいの目開きが、4 mm よりもわずかに小さかったためである。つまり、 -1.5ϕ ~ -2.0ϕ のヒストグラ



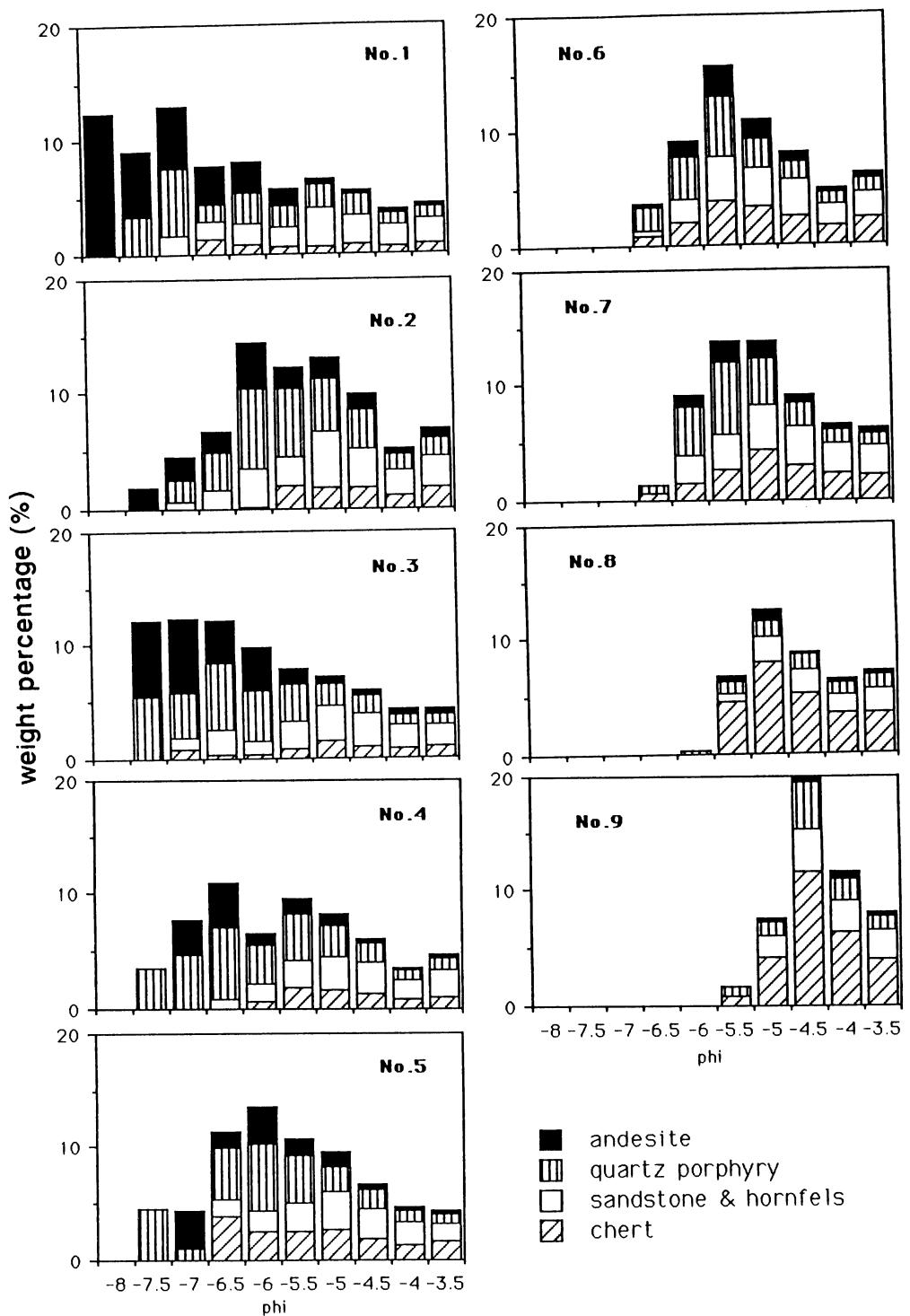
第 3 図 渡良瀬川下流部の河床砂礫の粒度組成を示すヒストグラム



第 4 図 渡良瀬川下流部の河床砂礫の中央粒径の縦断変化

ムに含まれるべき部分が、 -2.0ϕ ~ -2.5ϕ のヒストグラムの一部に含まれている。No. 9 では、試料をすべて持ち帰り、正常なふるいで分析したために前述のような歪は現れていない。

各地点の粒度組成を対数確率紙にプロットして中央粒径を求め(第 1 表)、その縦断変化を第 4 図に示した。No. 2 と No. 4 のデータを除けば、かなり直線的



第5図 -3.5ϕ より大きな礫の粒度組成を示すヒストグラムとその岩種構成比

第2表 渡良瀬川下流部における粒径別岩種構成比の分析結果

試料採取地点 : №1 流下距離 : 4.9km										試料採取地点 : №4 流下距離 : 13.2km											
粒径階級		重量 百 分 率 (%)					粒径階級					重量 百 分 率 (%)					粒径階級				
An	QP	S & H	Ch	Ch	An	QP	S & H	Ch	Ch	An	QP	S & H	Ch	Ch	An	QP	S & H	Ch	Ch		
-8.0 < ϕ	< -8.5	12.5	0.0	0.0	-8.0 < ϕ	< -8.5	0.0	0.0	0.0	-8.0 < ϕ	< -8.5	0.0	0.0	0.0	-8.0 < ϕ	< -8.5	0.0	0.0	0.0		
-7.5 < ϕ	< -8.0	5.7	3.3	0.0	-7.5 < ϕ	< -8.0	0.0	0.0	0.0	-7.5 < ϕ	< -8.0	0.0	0.0	0.0	-7.5 < ϕ	< -8.0	0.0	0.0	0.0		
-7.0 < ϕ	< -7.5	5.3	1.7	0.0	-7.0 < ϕ	< -7.5	0.0	0.0	0.0	-7.0 < ϕ	< -7.5	0.0	0.0	0.0	-7.0 < ϕ	< -7.5	0.0	0.0	0.0		
-6.5 < ϕ	< -7.0	3.3	1.5	1.6	-6.5 < ϕ	< -7.0	3.8	6.3	0.8	-6.5 < ϕ	< -7.0	3.8	6.3	0.8	-6.5 < ϕ	< -7.0	0.0	0.0	0.0		
-6.0 < ϕ	< -6.5	2.7	2.6	1.9	-6.0 < ϕ	< -6.5	1.1	3.3	1.6	-6.0 < ϕ	< -6.5	1.1	3.3	1.6	-6.0 < ϕ	< -6.5	0.9	4.3	0.6		
-5.5 < ϕ	< -6.0	1.5	1.9	0.7	-5.5 < ϕ	< -6.0	1.3	4.0	2.3	-5.5 < ϕ	< -5.5	1.1	2.7	1.9	-5.5 < ϕ	< -6.0	1.7	6.3	2.3		
-5.0 < ϕ	< -5.5	0.5	2.0	3.3	-5.0 < ϕ	< -5.5	0.4	1.3	2.7	-5.0 < ϕ	< -5.5	0.4	1.3	2.7	-5.0 < ϕ	< -5.5	1.5	3.9	4.0		
-4.5 < ϕ	< -5.0	0.3	1.9	2.5	-4.5 < ϕ	< -4.5	0.2	0.9	1.7	-4.5 < ϕ	< -4.5	0.2	0.9	1.7	-4.5 < ϕ	< -4.5	0.6	2.0	4.3		
-4.0 < ϕ	< -4.5	0.3	1.0	2.0	-4.0 < ϕ	< -4.0	0.4	1.0	2.3	-4.0 < ϕ	< -4.0	0.4	1.0	2.3	-4.0 < ϕ	< -4.0	0.6	1.2	2.3		
-3.5 < ϕ	< -4.0	0.4	0.9	2.2	-3.5 < ϕ	< -4.0	0.4	1.0	2.3	-3.5 < ϕ	< -4.0	0.4	1.0	2.3	-3.5 < ϕ	< -4.0	0.6	1.2	2.3		
total (%)	32.5	21.0	16.9	5.7	total (%)	11.4	28.1	14.2	7.3	total (%)	6.0	19.5	17.6	16.7	total (%)	6.0	19.5	17.6	16.7		
試料採取地点 : №2 流下距離 : 7.1km										試料採取地点 : №5 流下距離 : 15.6km											
粒径階級		重量 百 分 率 (%)					粒径階級					粒径階級					粒径階級				
An	QP	S & H	Ch	Ch	An	QP	S & H	Ch	Ch	An	QP	S & H	Ch	Ch	An	QP	S & H	Ch	Ch		
-8.0 < ϕ	< -8.5	0.0	0.0	0.0	-8.0 < ϕ	< -8.5	0.0	0.0	0.0	-8.0 < ϕ	< -8.5	0.0	0.0	0.0	-8.0 < ϕ	< -8.5	0.0	0.0	0.0		
-7.5 < ϕ	< -8.0	1.8	0.0	0.0	-7.5 < ϕ	< -8.0	0.0	0.0	0.0	-7.5 < ϕ	< -8.0	0.0	0.0	0.0	-7.5 < ϕ	< -8.0	0.0	0.0	0.0		
-7.0 < ϕ	< -7.5	1.9	0.7	0.0	-7.0 < ϕ	< -7.5	3.4	1.0	0.0	-7.0 < ϕ	< -7.5	3.4	1.0	0.0	-7.0 < ϕ	< -7.5	0.0	0.0	0.0		
-6.5 < ϕ	< -7.0	1.9	3.1	1.7	-6.5 < ϕ	< -7.0	1.5	4.6	1.5	-6.5 < ϕ	< -6.5	3.4	5.8	1.9	-6.5 < ϕ	< -6.5	0.0	0.0	0.0		
-6.0 < ϕ	< -6.5	3.9	6.9	3.5	-6.0 < ϕ	< -6.5	3.4	6.0	4.3	-6.0 < ϕ	< -6.0	1.5	4.3	2.4	-6.0 < ϕ	< -6.0	0.4	0.4	0.0		
-5.5 < ϕ	< -6.0	1.7	5.9	2.6	-5.5 < ϕ	< -6.0	1.5	5.5	1.3	-5.5 < ϕ	< -5.5	1.3	2.2	3.4	-5.5 < ϕ	< -5.5	1.0	1.5	4.5		
-5.0 < ϕ	< -5.5	1.8	4.5	5.0	-4.5 < ϕ	< -5.0	1.4	3.3	3.4	-4.0 < ϕ	< -4.5	0.5	1.4	2.1	-4.0 < ϕ	< -4.5	0.2	1.2	2.1		
-4.5 < ϕ	< -4.5	0.5	1.4	2.1	-3.5 < ϕ	< -4.0	1.5	2.8	1.8	-3.5 < ϕ	< -4.0	0.4	0.9	2.1	-3.5 < ϕ	< -4.0	0.4	0.9	1.6		
total (%)	15.8	28.5	21.8	8.7	total (%)	12.5	25.8	15.7	16.3	total (%)	2.3	6.3	8.5	24.6	total (%)	2.3	6.3	8.5	24.6		
試料採取地点 : №3 流下距離 : 9.7km										試料採取地点 : №6 流下距離 : 20.9km											
粒径階級		重量 百 分 率 (%)					粒径階級					粒径階級					粒径階級				
An	QP	S & H	Ch	Ch	An	QP	S & H	Ch	Ch	An	QP	S & H	Ch	Ch	An	QP	S & H	Ch	Ch		
-8.0 < ϕ	< -8.5	0.0	0.0	0.0	-8.0 < ϕ	< -8.5	0.0	0.0	0.0	-8.0 < ϕ	< -8.5	0.0	0.0	0.0	-8.0 < ϕ	< -8.5	0.0	0.0	0.0		
-7.5 < ϕ	< -8.0	6.6	5.5	0.0	-7.5 < ϕ	< -8.0	0.0	0.0	0.0	-7.5 < ϕ	< -8.0	0.0	0.0	0.0	-7.5 < ϕ	< -8.0	0.0	0.0	0.0		
-7.0 < ϕ	< -7.5	6.5	3.9	0.9	-7.0 < ϕ	< -7.5	0.0	0.0	0.0	-7.0 < ϕ	< -7.5	0.0	0.0	0.0	-7.0 < ϕ	< -7.5	0.0	0.0	0.0		
-6.5 < ϕ	< -7.0	3.8	5.8	2.2	-6.5 < ϕ	< -7.0	0.3	2.1	0.5	-6.5 < ϕ	< -6.5	1.3	3.7	2.0	-6.5 < ϕ	< -6.5	0.0	0.0	0.0		
-6.0 < ϕ	< -6.5	3.8	4.4	1.1	-6.0 < ϕ	< -6.5	1.4	2.5	0.8	-6.0 < ϕ	< -6.0	1.6	5.2	3.8	-6.0 < ϕ	< -6.0	0.0	0.0	0.0		
-5.5 < ϕ	< -6.0	1.4	3.1	2.5	-5.5 < ϕ	< -6.0	1.6	1.6	1.7	-5.5 < ϕ	< -5.5	0.8	2.5	3.4	-5.5 < ϕ	< -5.5	0.3	1.2	4.2		
-5.0 < ϕ	< -5.5	0.7	2.0	2.9	-4.5 < ϕ	< -5.0	1.1	2.8	1.5	-4.5 < ϕ	< -4.5	0.3	1.1	1.9	-4.5 < ϕ	< -4.5	0.4	4.2	3.7		
-4.5 < ϕ	< -4.5	0.6	1.5	2.8	-4.0 < ϕ	< -4.5	0.9	2.0	0.9	-4.0 < ϕ	< -4.5	0.8	1.1	1.6	-4.0 < ϕ	< -4.5	0.6	1.9	2.7		
-3.5 < ϕ	< -4.0	0.5	0.8	1.8	-3.5 < ϕ	< -4.0	0.5	1.1	1.1	-3.5 < ϕ	< -4.0	0.5	1.1	2.3	-3.5 < ϕ	< -4.0	0.3	1.1	2.6		
total (%)	24.3	27.9	16.2	7.1	total (%)	7.7	17.2	17.0	16.6	total (%)	1.6	9.3	10.9	27.0	total (%)	1.6	9.3	10.9	27.0		

An: 安山岩類
QP: 石英斑岩類
S & H: 砂岩およびカルンフェルス類
Ch: チャート類
* 各地点における4種類の岩種の重量百分率(第7図参照)の合計が、第1表に示した-3.5φ~ -4.0φの範囲の重量百分率に等しくなる。

に中央粒径が下流に減少していることがわかる。

No.2とNo.4は、上流側にしては小さな中央粒径を示している。No.2で粒径が小さい(第4図、第5図)原因としては、採取した試料の性質が考えられる。つまりこの試料を採取した砂礫堆は、現地での観察からすると1988年9月9日の中規模出水(建設省渡良瀬川工事事務所によれば、1988年で最大の出水で、足利市での最大流量は、 $450\text{m}^3/\text{sec}$)で移動した砂礫がつくったものと考えられる。No.4の原因是不明であるが、同様に試料採取地点の選択から生じる差であろう。

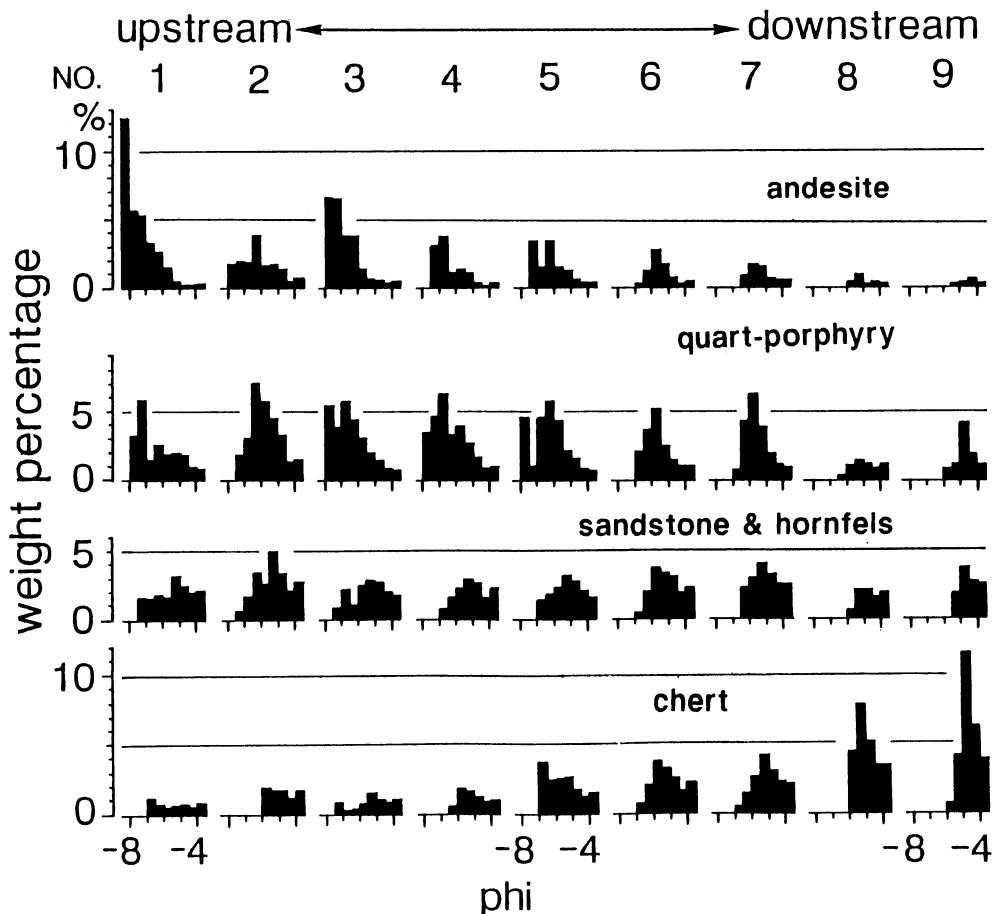
2) 粒径別岩種構成比の上下流変化

第5図には、 -3.5ϕ (約1cm)より大きな礫の部分の粒度組

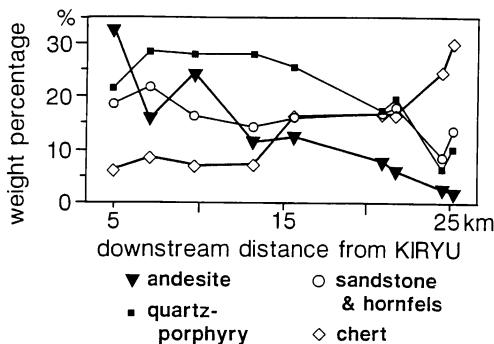
成を示すヒストグラムを取り出し、各ヒストグラム中にそれぞれ岩種構成を書き込んだ。さらに粒径別岩種構成比率の上下流変化を見やすくするために、第6図には岩種毎にこのヒストグラムを分けて上下流に並べた。なお第2表には、粒径別岩種構成比の結果をまとめてある。

No.1とNo.9は、約20km離れている。第6図からこの20kmの間に、急激に岩種構成比が変化している様子がわかる。つまり、河床砂礫中の安山岩礫の比率は下流方向に急激に減少し、代わりにチャート礫の比率が急激に増えている様子がわかる。

そこで -3.5ϕ (約1cm)より大きな礫を一括して、河床砂礫中に占める各岩種毎の比率(第2表)



第6図 河床砂礫中における粒径別の礫種頻度を示すヒストグラムの縦断変化



第7図 -3.5ϕ よりも大きな各岩種の礫が河床砂礫中に占める割合の縦断変化

の縦断変化を第7図に示した。この図から安山岩礫の占める割合は、調査区間の上流では、約33%あるのが、下流ではわずか2%へと減少していることがわかる。代わってチャート礫の比率は、6%から30%へと増加している。石英斑岩礫や砂岩およびホルンフェルス礫の比率は、わずかながら、下流方向に減少している。

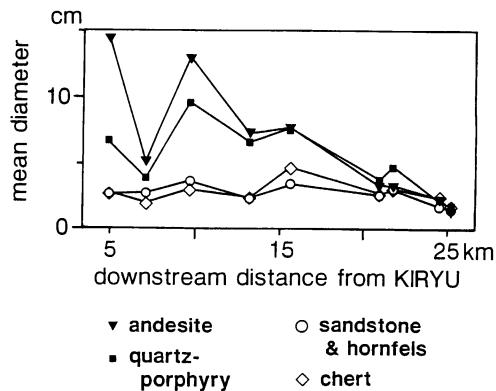
また第6図には、小出(1952, p.64)や小峯(1954)などが指摘しているような、 -5.0ϕ よりも小さな安山岩礫はきわめて少ないという、安山岩礫固有の特性がよく現れている。このことは河床砂礫中の安山岩礫の占める比率が下流方向に急激に小さくなるための重要な要因であると考えられる。

V 考 察

1) 破碎・摩耗作用の重要性

第5図～第7図に示された、調査区間ににおける岩種構成比の下流方向への急激な変化は、どの様に解釈されるであろうか。まず河床砂礫の上下流の粒径分布が選択運搬作用によって決定されるという立場をとるとすれば、渡良瀬川の粒径別岩種構成比の下流方向への変化は、次のように説明されるであろう。

つまり、安山岩はその特性として、すでに供給源で巨礫が多く細礫が少ない。河床勾配が急で掃流力が大きい調査区間の上流側では中径20～30cmほどの礫も運ぶことができるが、勾配が緩くなるにつれて



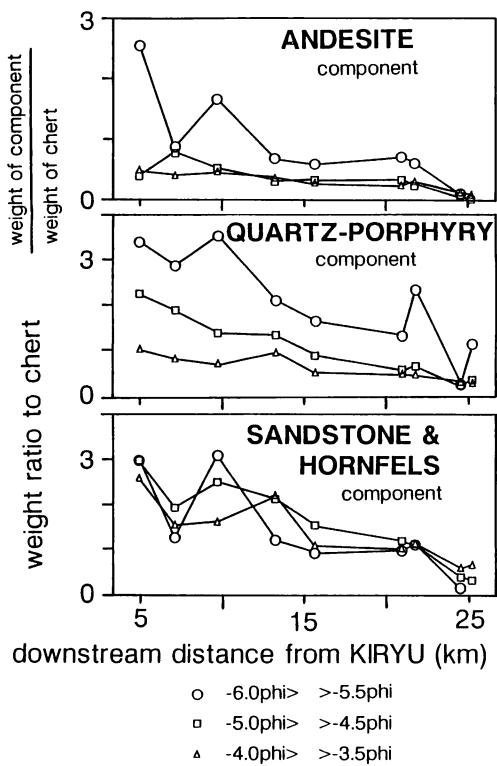
第8図 -3.5ϕ よりも大きな礫だけに注目して求めた岩種毎の平均的な粒径の縦断変化

それらは次第に上流側に取り残されていく。下流まで運ばれる細礫ははじめから少ないために、安山岩はその比率を急激に減少させる。それに対して、供給源から細かな礫の多いチャートは、上流側をどんどん通過してきて、下流にきて移動速度がおそくなるために、見かけ上その比率が増加している。

ところが次の事実は、どのようにして解釈できるであろうか。まず -3.5ϕ よりも大きな礫につき、岩種毎に平均的な粒径が、下流に向かってどの様に変化するかを次の方法で求めた。つまり、第6図の各ヒストグラムを、それぞれ100%になるように換算し、その結果を対数確率紙にプロットして岩種毎に50%粒径を求め、これを平均的な粒径とした。その結果を第8図に示した。

安山岩類や石英斑岩類をみると、確かに下流方向にこの平均的な粒径は減少している。ところが砂岩およびホルンフェルス類やチャート類は、上下流にほぼ一定値を示し、しかもこれら2種類の岩種はほぼ同じ様な大きさである。ところが第6図、第7図では、チャートのみが下流方向に増えており、砂岩およびホルンフェルス類は、むしろ下流方向に減少傾向にある。つまり、チャート礫と砂岩およびホルンフェルス礫は、同じ様な粒径を示すにもかかわらず、選択的にチャート礫だけが、下流に運ばれていることになる。

この事実は、選択運搬作用では説明できない。と



第9図 チャートで標準化した粒径別岩種構成比の縦断変化

すると、第7図に示すようなチャート類の下流方向への増加と、砂岩およびホルンフェルス類の下流方向への減少という相違は、破碎・摩耗作用によって矛盾なく説明できるのではないだろうか。

ところで礫の形や比重は、岩種により確かに違う。しかし、一次近似的に見れば礫の動き易さは、まずは礫の粒径に比例すると見なせる。そこで同じ動き易さ、つまり同じ粒径階級に属する礫について岩種毎の存在比率を比べた。これをチャートの重量を基準とした時の、各岩種の重量比で示した（第9図）。

第9図では、見やすくするためにこのうち3つの階級のみ抜き出して、岩種毎にその縦断変化を示した。どの岩種どの粒径階級でみてもチャートに対する存在比率は、下流方向に減少している。例えば、石英斑岩類で -5.5ϕ ～ -6.0ϕ の礫は、上流側ではチャート類の礫の約3倍以上の比率で河床に存在す

る。ところが約20km下流側では、チャート礫とほぼ同じ割合でしか存在しなくなる。この事実は、砂礫の流送時における破碎・摩耗作用を支持する一つの根拠ではなかろうか。

またここに示した粒径範囲内では、大きな礫ほど減少率が大きいことがわかる。つまり、 -6.0ϕ から -3.5ϕ の礫については、粒径の大きな礫ほど破碎・摩耗され易く、また岩種による破碎・摩耗の違いも大きく現われると解釈できる。

2) 粒径変化に占める 破碎・摩耗作用の比率の概算

このように河床砂礫の粒径の縦断変化に対して、砂礫の破碎・摩耗作用による粒径の減少が、重要な要因であると考えられた。それでは、礫径変化を破碎・摩耗だけでどの程度まで説明できるであろうか。次に述べるような仮定を設け、概略を試算してみた。

調査区間における中央粒径の平均値は、約35～39mm（第4図、第1表）で、 -5.0ϕ ～ -5.5ϕ に含まれる。そこでまずこの粒径階級の結果を使って次の方法で試算した。

この粒径階級の礫について岩種構成をみると、No.1においてはチャート礫が10.50%，他の岩種が残り89.50%を占めている。一方No.9では、チャート礫が54.79%，他の岩種が45.21%を占めている。このように見かけ上、チャート礫の構成比率は下流方向に増加する。ところが、前述のように一次近似でみれば、ひとつの粒径階級内では岩種による選択運搬は生じない。つまり、破碎・摩耗作用が全く働かないと言えば、No.1での岩種構成比は、下流方向に一定値として維持されることになる。

そこでNo.1のチャート礫の比率が、下流方向に一定値として維持されると仮定して、最下流地点でのチャート礫の比率をNo.1と同じ10.50%にする。すると、他の岩種は8.66%（45.21/54.79×10.50）を占めることになる。即ち89.50%を占めるはずの、チャート以外の岩種礫の構成比率は、8.66%へと減少していることになる。このことは、仮にチャート礫が全く破碎・摩耗しないとしても、他の岩種の礫は破碎・摩耗作用により、より小さい礫や砂・シルト・粘土などに変化するために、この階級では約90%

($1 - 8.66/89.50$) の重量損失があったものと解釈できる。重量は半径の 3 乗に比例するから、この重量損失率は、約 54% の粒径減少率で説明される。

一方調査した最上流地点と最下流地点での中央粒径の減少率は、約 84% ($1 - 10.5\text{mm}/66\text{mm}$) である。従ってこの 84% のうち 54% までが、破碎・摩耗作用のみで説明される。つまり中央粒径の減少のうち約 6 割が破碎・摩耗作用で説明され、残りの約 4 割が選択運搬作用によるものと解釈できる。

他の粒径階級についても同様の仮定を設けて試算してみた。その結果、 $-3.5\phi \sim -4.0\phi$ のデータから試算した場合、破碎・摩耗作用の比率は最も小さくなつた。しかしそれでも粒径減少率の内、約 4 割が破碎・摩耗作用によるものと解釈できた。また、 $-5.5\phi \sim -6.0\phi$ のデータから試算した場合は、約 7 割が破碎・摩耗作用によるものと解釈できた。これらの値は、粒径減少に占める破碎・摩耗作用の割合を多く見積もつても約 1 割以下と報告した Dawson (1988) の研究結果と大きく異なる。

ところで Plumly (1948) は、本研究と同様に岩種構成の縦断変化から、Rapid Creek における粒径減少に占める破碎・摩耗作用の割合を求めた。その結果、粒径減少のうち約 25% が破碎・摩耗作用で説明されると考えた。しかしこの考察には、岩種構成比の上下流変化から、重量減少率を 50% とする段階 (Plumly, 1948, p. 570) に誤りがあると思われる。

そこで筆者らが上述の方法でこのデータを再検討した。すると hard rock が破碎・摩耗しないと仮定しても、Rapid Creek での soft rock は、約 48km 流下する間に破碎・摩耗により約 93% ($1 - (10 \times 40/90)/60$) の重量減少を起こすものと見積られた。これは約 59% の粒径減少率で説明できる。一方、この区間における平均粒径は約 24mm から 5mm へと減少している。つまり約 79% の粒径減少率となる。従って、粒径減少に占める破碎・摩耗作用の割合は約 75% (59/79)，選択運搬作用が 25% であると解釈される。このように Plumly (1948) のデータからも、粒径減少に占める破碎・摩耗作用の重要性が結論される。

VI おわりに

渡良瀬川の扇状地河川区間において河床砂礫の粒径別岩種構成比の縦断的な変化を調べた。この区間は、上流から供給された礫 (安山岩類・石英斑岩類・砂岩およびホルンフェルス類・チャート類の 4 種類) が、長年の歳月をかけて区間の下流から流出していく砂礫流送システムとみなすことができ、ほぼ平衡状態にある。

この調査区間で約 1 ~ 5 km おきに計 9ヶ所の州を選んで、従来の方法に従って河床砂礫のサンプリングを実施し、それぞれについて $1/2\phi$ 間隔で粒度分析を行つた。そのうち -3.5ϕ よりも大きな礫について、肉眼で 4 種類の岩種に分けた。

調査の結果、約 20km の間で河床砂礫の岩種構成比が急激に変化していることが明らかになった。つまり、上流では河床砂礫中の 33% を占める安山岩礫は、下流ではわずか 2% に減少する。それに代わってチャート礫の比率は 6% から 30% へと増加する。

さらに同一の粒径階級に属する礫毎に、岩種構成の縦断変化を調べたところ、やはり岩種構成は下流方向に変化していることが明らかになった。同一の粒径階級に属する礫は、岩種によらず一次近似的には、同じ動き易さを備えたものとみなすことができる。つまり、粒径別岩種構成比の下流への変化は、流水による砂礫の選択運搬作用では説明できない。すなわちこの事実は、沖積河川における礫径の縦断変化には、流送砂礫の破碎・摩耗作用が重要な役割を果たすことを示唆している。

渡良瀬川下流部の調査区間での粒径減少に占める破碎・摩耗作用の割合は、最小に見積もつても約 4 割で、場合によっては 6 ~ 7 割占める可能性もあることが、概算結果から推定された。このように粒径変化に占める破碎・摩耗作用の割合は、従来考えられてきたよりも、ずっと大きいことが明らかになった。そこで現在、岩種毎の破碎・摩耗特性を定量化するために、回転ドラムによる室内実験を実施している。

謝 辞

本研究には、文部省科学研究費補助金（課題番号

62460235, 代表者, 筑波大学地球科学系・高山茂美教授) の一部を使用した。建設省渡良瀬川工事事務所調査課の方々には、資料の閲覧や河川調査の許可等で便宜を計って頂いた。野外調査においては、筑波大学自然学類の学生諸氏、地球科学研究科の大学院生諸氏、および地球科学系の水野恵司博士にご助力を頂いた。

ここに期して感謝致します。

文 献

- 池田 宏 (1970) : 三重県、朝明川・三滝川・内部川の河床縦断形について。地理評, **43**, 148—159.
- 池田 宏 (1985) : 河床材料と河道の縦断形。水工学シリーズ85—A—3, 土木学会水理委員会, 1—13.
- 小出 博 (1952) : 『応用地質——岩石の風化と森林の立地——』古今書院, 177p.
- 小玉芳敬・井口正男 (1986) : 渡良瀬川下流部の河床勾配急変点付近における河床砂礫堆積状況。筑波大学水理実験センター報告, **10**, 67—79.
- 小玉芳敬 (1988) : 沖積礫床河川における岩種別最大礫径の縦断的分布。地理予, **33**, 70—71.
- 小峯 勇 (1954) : 渡良瀬川の中礫について。地理評, **27**, 218—221.
- 中山正民・三浦敏彦 (1964) : 日本の河川平野部における礫の円形度について。地理評, **37**, 115—130.
- Blissenbach, E. (1952): Relation of surface angle distribution to particle size distribution on alluvial fans. *Journal of Sedimentary Petrology*, **22**, 25—28.
- 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 Rowenkamp (1972): Coarse sediment transport by flood flows on the 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.
- 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. (1980): Longitudinal changes in size and sorting of stream bed material in four English rivers. *Geological Society of America, Bulletin*, **91**, 55—62.
- Knighton, A.D. (1982): Longitudinal changes in the size and shape of stream bed material: evidence of variable transport conditions. *Catena*, **9**, 25—34.
- Kuenen, Ph. H. (1956): Experimental abrasion of pebbles 2. Rolling by current. *Journal of Geology*, **64**, 336—368.
- Mackin, J.H. (1948): The concept of the graded river. *Geological Society of America, Bulletin*, **59**, 463—512.
- Oya, Yoshihiko (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.
- Plumley, W.J. (1948): Black Hills terrace gravels: a study in sediment transport. *Journal of Geology*, **56**, 526—577.
- Schumm, S.A. and Stevens, M.A. (1973): Abrasion in place: a mechanism for rounding and size reduction of coarse sediment in rivers. *Geology*, **1**, 37—40.
- Shaw, J. and Kellerhals, R. (1982): The composition of recent alluvial gravels in Alberta river beds. *Alberta Research Council, Bulletin*, **41**, 151p.
- Sneed, E.D. and Folk, R.L. (1958): Pebbles in the lower Colorado River, Texas: a study in particle morphogenesis. *Journal of Geology*, **66**, 114—150.
- Sternberg, H. (1875): Untersuchungen über Längen- und Querprofil geschiebeführender Flüsse. *Zeitschrift für Bauwesen*, **25**, 483—506.
- Wadell, H. (1932): Volume, shape and roundness of rock particles. *Journal of Geology*, **40**, 443—451.