

### 3. 土砂分級の不連続性

洪水により運搬された土砂は粒径に応じて、大粒径ほど上流で堆積し、小粒径ほど下流へ運搬される、いわゆる土砂の分級作用（運搬又は堆積）を受ける。上流から下流へ流下するに従って、摩耗により細くなるものもあるが、大部分はこの分級作用によって、次いで凍結融解作用（礫の破碎など）の影響により各河道区間の構成粒径が決定されている。河床材料の粒径分布は通常代表粒径前後の粒径を中心に構成され、下流へ行くに従って徐々に粒径が細かい粒径加積曲線にシフトしていくが、岩質により物理的風化の過程は異なる（表－3.1）<sup>1)</sup>。例えば、木曾川流域のように、地質が火山岩類（安山岩、玄武岩、流紋岩など）の場合、摩耗しにくいので、2～10mmの粒径土砂が少なく、縦断的に見た粒径加積曲線の連続性が弱くなる（図－3.1）\*<sup>2)</sup>。崩壊過程の不連続性があると2～4mmの粒度を持つ縦断区間が欠如することも指摘されており<sup>3)</sup>、そのような意味では河川によっては粒度分布の不連続性も見られる。

\*水系位置が近い木曾川、揖斐川、矢作川を対象に調査した結果では、木曾川は火山岩類が50%以上、揖斐川は堆積岩類が70%以上、矢作川は花崗岩類が70%を占めた。摩耗試験では流紋岩（火山岩類）の摩耗がもっとも少なく、花崗岩（深成岩類）の摩耗がもっとも多かった

土砂の分級作用は土砂を流下させようとする洪水の掃流力（又は摩擦速度）と（粒径に概ね比例する）土砂の重量及び沈降速度との関係により決まる。河川研究室が流砂量観測を実施している那珂川水系涸沼川における両者の関係を表にして示すと、表－3.2の通りである。表中の青い太枠の左側、青い太枠の中、青い太枠の右側の範囲が各々掃流砂、浮遊砂、ウォッシュロード的運動形態を表しており、さらに左側の範囲では土砂は移動せずに堆積する。

このような分級作用の不連続性を明らかにするには、先ず掃流力を規定する一要因である河道セグメントと河床材料の大きさから見た土砂動態の時間スケール（移動のしやすさ）について考えてみるのがよい。表－3.3に示すように礫はセグメント2-1、1の区間に堆積するが、細かい砂は更に下流のセグメント3に堆積する。

表から分かるように、礫は掃流力の大きな領域（洪水）でしか流送されないため、移動は顕著ではない。ある条件に基づく計算結果\*によれば、1/30確率洪水による移動距離は $d \leq 5\text{cm}$ で長くて2～5km、 $d \geq 13\text{cm}$ では長くて1kmに満たないという結果であった（図－3.2）<sup>4)</sup>。富士川1.5kでは昭和43年に河道掘削に伴うポケット（図－3.3、3.4）ができたことにより、上流から流送されてきた土砂がここに堆積し、下流や海岸へ土砂が流出しなくなった<sup>5)</sup>。従って、黒部川や姫川のような扇状地河川の河口で河道掘削すると、時間をかけて流送されてきた土砂も掘削箇所にも貯まるだけで、下流へ流下せず、海岸侵食を引き起こす危険性が高くなるので、河口における河道掘削には注意が必要である。

\*河床材料の移動距離＝不等流計算より求めた摩擦速度に対する単位幅流砂量（土研式による）／移動層厚（河床材料の平均粒径～砂州の平均波高の範囲）

河床材料は洪水により変質する。例えば、砂利河川では砂利と砂で運動形態や流水に対する応答が異なるため、表層の河床材料は流量変動による掃流力の変化により時空間的に変動するが、表層下の河床材料の大きさは経年的に大きく変動しない<sup>6)</sup>。しかし、洪水時全面的に移動する掃流砂の粒度分布は表層下の河床材料の粒度分布とほぼ同程度である。このことは、洪水時における河床材料の移動に伴って、元来あった河床材料と移動材料との間で交換が起きる場合があることを意味している。この交換層厚は通常最大粒径か $d_{90}$ 。

程度であるが、小規模河床形態が発生する場合は平均水深の4割以下の厚さとなる<sup>7)</sup>。河床が低下すると、交換層から細粒の土砂が多く抜け出すので、交換層内の土砂は粗粒化するという粒度変化も生じる。

急流河川における河床材料は砂州部はみお筋よりも粒度がばらつく(図-3.5、3.6)。特に表層(0～30cm)は表層下よりも粒度がばらつく(「6. 流砂特性」に示した洪水による河床材料の変質と関係する)。また、砂州先端の傾斜面は河床材料が細かい。従って、急流河川の河床材料調査にあたっては、特性を代表するみお筋及び適切な砂州箇所を対象として、表層を取り除いて表層下の材料を調査する必要がある<sup>8)</sup>。

分級作用はこうした物理的な関係に加えて、横断工作物、河道平面形状、河床形態の影響を受けながら、展開される。粒径が多少小さくても堆積空間では土砂堆積が生じる。例えば、横断工作物(ダム・砂防堰堤・堰・床止めなど)上流、縦断的に見て河積が広がっている区間(狭窄部の上流区間など)、湾曲部内岸側、河床勾配変化点(セグメント変化点でもある)、支川合流点などでは土砂堆積が生じやすい。また前述のとおり、溪岸や高水敷には浮遊砂やウォッシュロードが堆積する。

そのため、河床勾配変化点では洪水時に土砂堆積が生じるが、小流量の流水で土砂は侵食・運搬されるし、支川合流点では大粒径の砂礫が堆積する(土砂堆積に伴って、本川の水位が上昇する場合がある)<sup>9)</sup>。盆地内の下流(狭窄部の上流)域では堆積作用により土砂の粒度分布は細粒となっており、かつそれぞれの盆地内での粒度分布は類似している。

一方、河道区間によっては侵食空間も見られる。堆積空間とは逆に横断工作物下流、縦断的に見て河積が狭くなっている区間、湾曲部外岸側は侵食傾向にあり、樹林化区間の低水路、橋脚周辺、発達した砂州の対岸側などでは侵食が生じやすい。

以上のことより、土砂分級については、以下の点に着目しながら、検討する必要がある。

- 1) どのセグメントに属しているか
- 2) 土砂の時間的な挙動を考慮しているか
- 3) 着目している粒径はどれくらいか
- 4) 土砂分級に影響をおよぼす施設はないか
- 5) 着目している空間は堆積空間か、侵食空間か

#### 参考文献

- 1) 小出博：日本の国土(上)、pp.59～64、東京大学出版会、1973.8より虫明功臣作成による
- 2) 今井正直：河道特性としての河床材料の質について、平成12年度部外研究員報告書概要版、pp.31～34、土木研究センター、2001.7
- 3) 谷津栄寿：平衡河川の縦断面形について(2)、資源研彙報(34)14-21、1954
- 4) 山本晃一・藤田光一・赤堀安宏・太田知章：沖積河道縦断面形の形成機構に関する研究、p.30、土木研究所資料、第3164号、1993.3
- 5) 建設省河川局治水課他：水系一貫土砂管理に向けた河川における土砂観測、土砂動態マップの作成及びモニター体制構築に関する研究 pp.175～177、第54回建設省技術研究会指定課題 2002.3
- 6) 山本晃一：沖積河川学、p.83、山海堂、1994

- 7) 山本晃一：河道特性論、土木研究所資料、第 2662 号、p121、1988.8
- 8) 国土交通省北陸地方整備局：河床材料調査方針の検討、2004
- 9) 芦田和男：特別講演 河川における流砂問題－発展と展望、pp.14 ～ 15、建設省土木研究所、1986.12

表-3.1 地質による岩石の物理的風化作用の相違  
(日本の国土(上)、参考文献<sup>1)</sup>より)

岩塊：人身大～以上  
礫：人頭大～半身大  
砂利：玉砂利～拳大

地 質		物理的風化過程						備 考
		基岩	岩塊	礫	砂利	砂	粘土	
火 成 岩 類	深 成 岩	花崗岩 (内緑岩) (斑輝岩)	○	→	○			斑輝岩は砂になりにくい。
	半 深 成 岩	石英斑岩 (玢岩)	○	→	○	→	○	基岩の節理の状態により異なる。
	火 山 岩	安山岩 玄武岩	○	→	○			礫程度にはなるが砂利以下にはなりにくい。
水 成 岩 類	古 生 層	頁岩 粘板岩 砂岩	○	→	○	→	○	平板状か厚めの基石状にこわれる傾向があり、大きな岩片になりにくい。
	中 生 層	頁岩 (白亜紀)	○	→	○			三疊紀の頁岩は古生層の頁岩に類似、時代が新しいほど砂になりやすい。
		砂岩 (白亜紀)	○	→	○	→	○	砂利の期間は短い、若い砂岩ほどその傾向が強い。
	第 三 紀 層	頁岩	○	→	○			古第三紀の岩石は短期間、砂利程度の大きさになる。
		砂岩	○	→	○			
		縞状構造 の荒い珪岩	○	→	○	→	○	珪岩はチャートともよばれ、主として古生層に分布する。古生層のなかでは粗大な風化産物をつくりやすい。
		縞状構造の 細かい珪砂	○	→	○	→	○	
	石灰岩	○	→	○				
	緑色岩と 緑色凝灰岩	○	→	○				

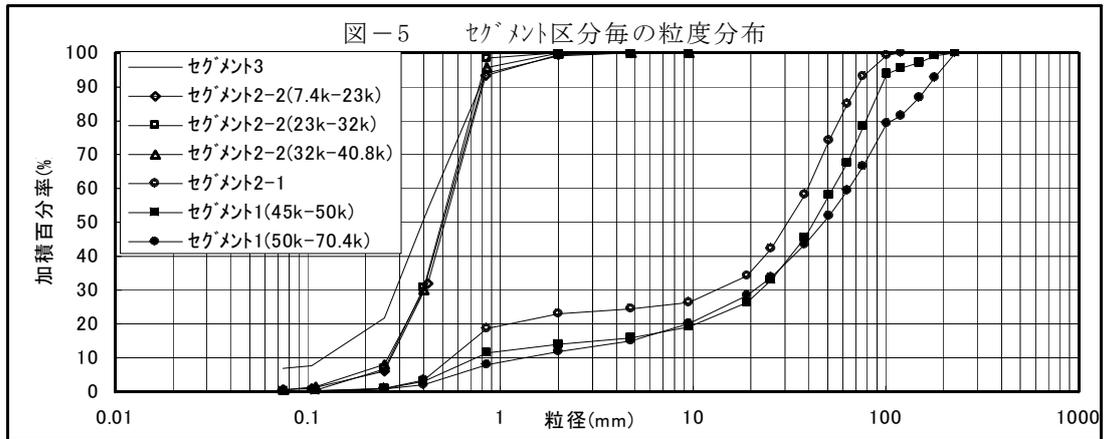


図- 3.1 不連続性を持つ粒径加積曲線 (木曾川) (参考文献<sup>2)</sup>より)

表－ 3.2 粒径別運動形態

水位	水深	d(mm)	粒径集団 1								粒径集団 2								粒径集団 3								粒径集団 4	
			54		38.3		24.2		19.1		9.52		3.38		1.6		0.84		0.42		0.21		0.105		0.075			
			$w_0$ (cm/s)		170.10		143.26		113.87		101.16		71.42		39.53		24.01		15.62		7.20		3.60		1.32		0.67	
		$u_s/w_0$	$\tau_*$	$u_s/w_0$	$\tau_*$	$u_s/w_0$	$\tau_*$	$u_s/w_0$	$\tau_*$	$u_s/w_0$	$\tau_*$	$u_s/w_0$	$\tau_*$	$u_s/w_0$	$\tau_*$	$u_s/w_0$	$\tau_*$	$u_s/w_0$	$\tau_*$	$u_s/w_0$	$\tau_*$	$u_s/w_0$	$\tau_*$	$u_s/w_0$	$\tau_*$			
12.0	22.07		0.13	0.06	0.15	0.08	0.19	0.12	0.22	0.16	0.31	0.32	0.56	0.89	0.92	1.88	1.41	3.59	3.06	7.17	6.13	14.34	16.77	28.69	32.86	40.16		
11.5	21.12		0.12	0.05	0.15	0.07	0.19	0.11	0.21	0.14	0.30	0.29	0.53	0.82	0.88	1.72	1.35	3.29	2.93	6.57	5.87	13.14	16.05	26.28	31.45	36.79		
10.5	19.09		0.11	0.04	0.13	0.06	0.17	0.09	0.19	0.12	0.27	0.24	0.48	0.67	0.80	1.41	1.22	2.68	2.65	5.37	5.30	10.74	14.50	21.47	28.43	30.06		
10.0	17.99		0.11	0.04	0.13	0.05	0.16	0.08	0.18	0.10	0.25	0.21	0.46	0.59	0.75	1.25	1.15	2.38	2.50	4.77	5.00	9.53	13.67	19.07	26.79	26.69		
9.5	16.82		0.10	0.03	0.12	0.05	0.15	0.07	0.17	0.09	0.24	0.18	0.43	0.52	0.70	1.09	1.08	2.08	2.34	4.17	4.67	8.33	12.78	16.66	25.04	23.33		
9.0	15.56		0.09	0.03	0.11	0.04	0.14	0.06	0.15	0.08	0.22	0.16	0.39	0.44	0.65	0.94	1.00	1.78	2.16	3.56	4.32	7.13	11.82	14.26	23.17	19.96		
8.5	14.19		0.08	0.02	0.10	0.03	0.12	0.05	0.14	0.07	0.20	0.13	0.36	0.37	0.59	0.78	0.91	1.46	1.97	2.96	3.94	5.93	10.78	11.85	21.12	16.59		
8.0	12.66		0.07	0.02	0.09	0.03	0.11	0.04	0.13	0.05	0.18	0.10	0.32	0.29	0.53	0.62	0.81	1.18	1.76	2.36	3.52	4.72	9.62	9.45	18.86	13.23		
7.5	10.93		0.06	0.01	0.08	0.02	0.10	0.03	0.11	0.04	0.15	0.08	0.28	0.22	0.46	0.46	0.70	0.88	1.52	1.76	3.04	3.52	8.31	7.04	16.28	9.86		
7.0	8.87		0.05	0.01	0.06	0.01	0.08	0.02	0.09	0.03	0.12	0.05	0.22	0.14	0.37	0.30	0.57	0.58	1.23	1.16	2.46	2.32	6.74	4.64	13.21	6.49		
6.5	6.16		0.04	0.00	0.04	0.01	0.05	0.01	0.06	0.01	0.09	0.02	0.16	0.07	0.26	0.15	0.39	0.28	0.85	0.56	1.71	1.12	4.68	2.23	9.17	3.12		
	$\tau_{*c}$			0.02			0.03		0.03		0.05		0.09		0.20		0.37		0.74		1.49		2.97		4.16			

- : 移動しない
  - : 掃流形態 ( $\tau_{*c} < \tau_*$  かつ  $U_s/w_0 < 0.625$ )
  - : 跳躍を伴った掃流形態 ( $0.625 < U_s/w_0 < 1.25$ )
  - : 上層にほとんど巻き上がらない浮遊砂的運動形態 ( $1.25 < U_s/w_0 < 2.5$ )
  - : 鉛直方向に濃度差のある浮遊砂的運動形態 ( $2.5 < U_s/w_0 < 5.0$ )
  - : 上層下層に多少の濃度分布を有する浮遊砂的運動形態 ( $5.0 < U_s/w_0 < 10.0$ )
  - : ウォッシュロード的運動形態 ( $10.0 < U_s/w_0$ )
- } 掃流形態  
 } 浮遊砂的運動形態

表- 3.3 土砂動態の時間スケール (到達時間: 年)

セグメント 粒径	1	2-1	2-2	3	海岸
礫	0 ~ 20	10 ~ 20	—	—	—
粗い砂	0 ~ 3	0 ~ 3	1 ~ 10	100 ~	—
細かい砂	0	0	0	0 ~ 2	10 ~ 100
シルト	0	0	0	0	0

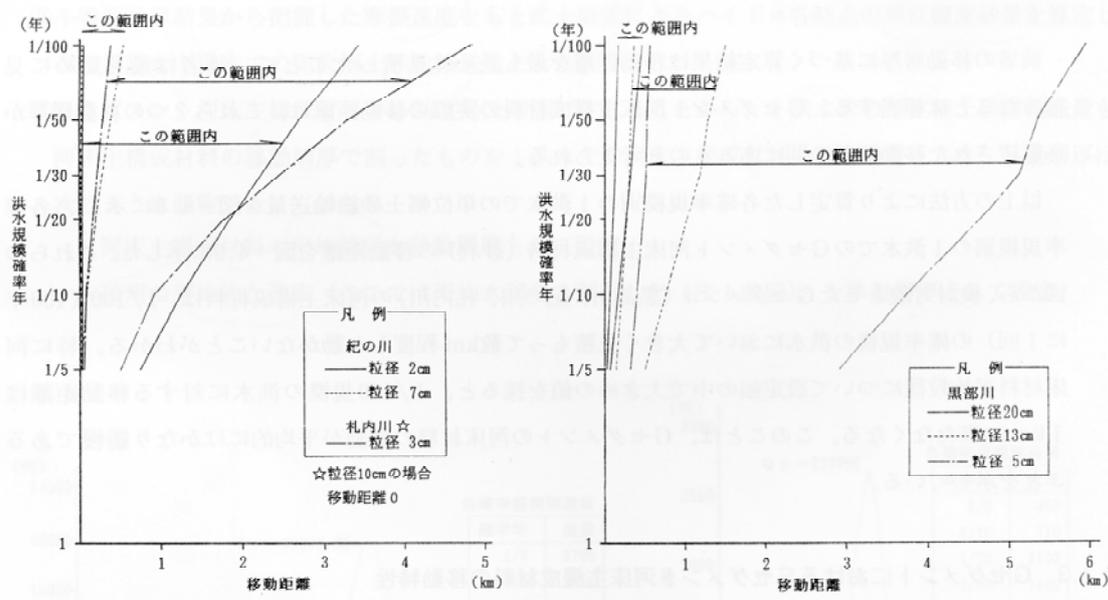


図- 3.2 洪水による砂利移動速度 (土木研究所資料、参考文献<sup>4)</sup>より)

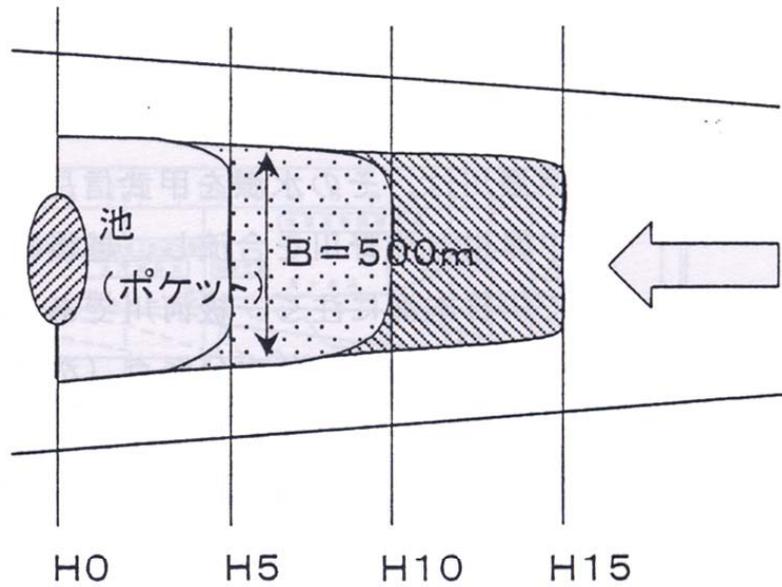


図-3.3 砂利掘削で生じたポケットへの土砂の堆積状況平面図（富士川河口）  
（参考文献<sup>9</sup>より）

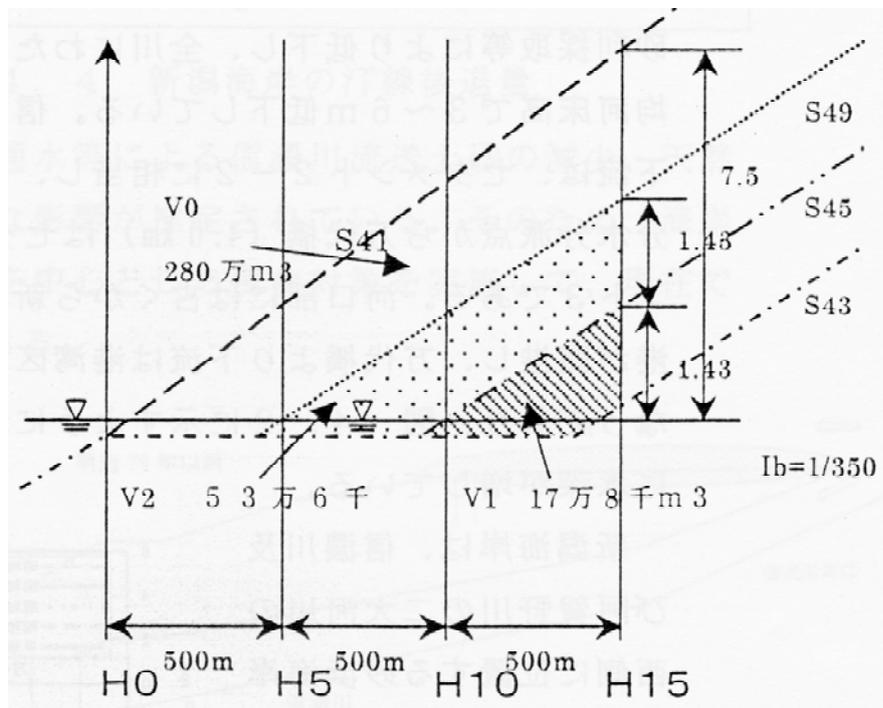


図-3.4 砂利掘削で生じたポケットへの土砂の堆積状況縦断面図（富士川河口）  
（参考文献<sup>9</sup>より）

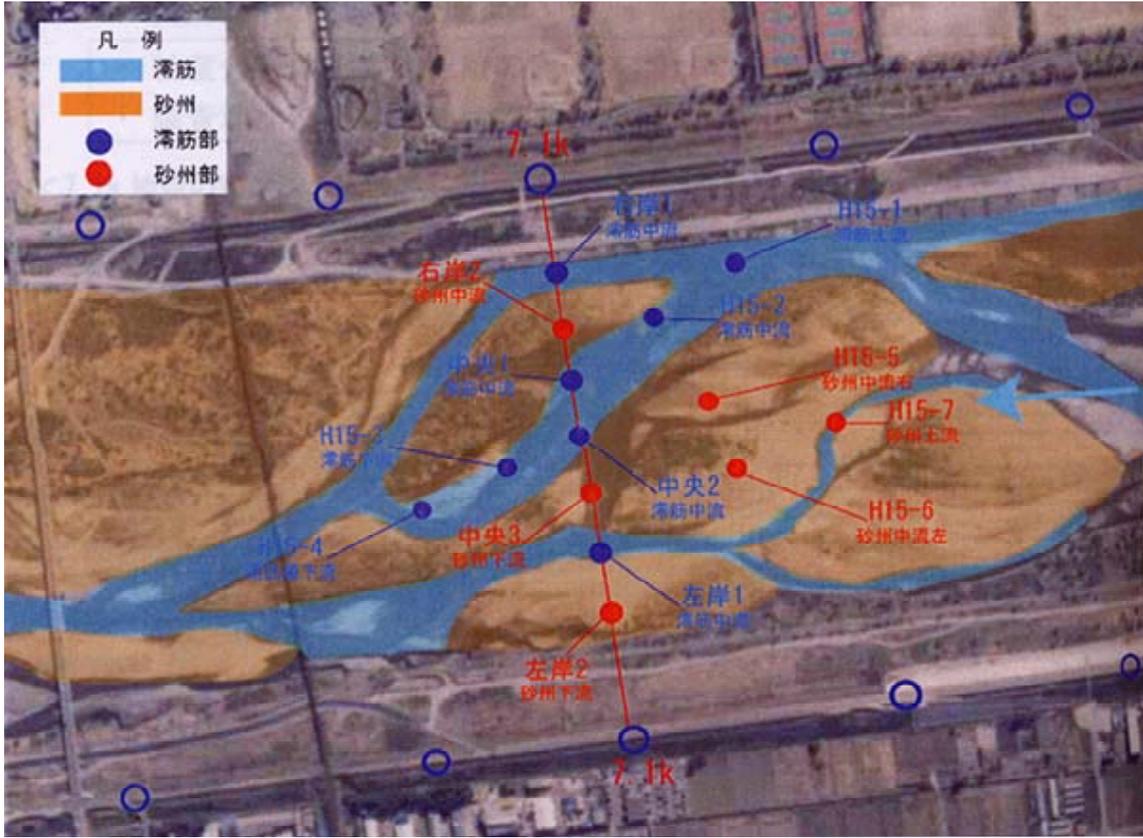


図-3.5 常願寺川7.1k地点サンプリング地点平面図  
(参考文献<sup>8)</sup>より)

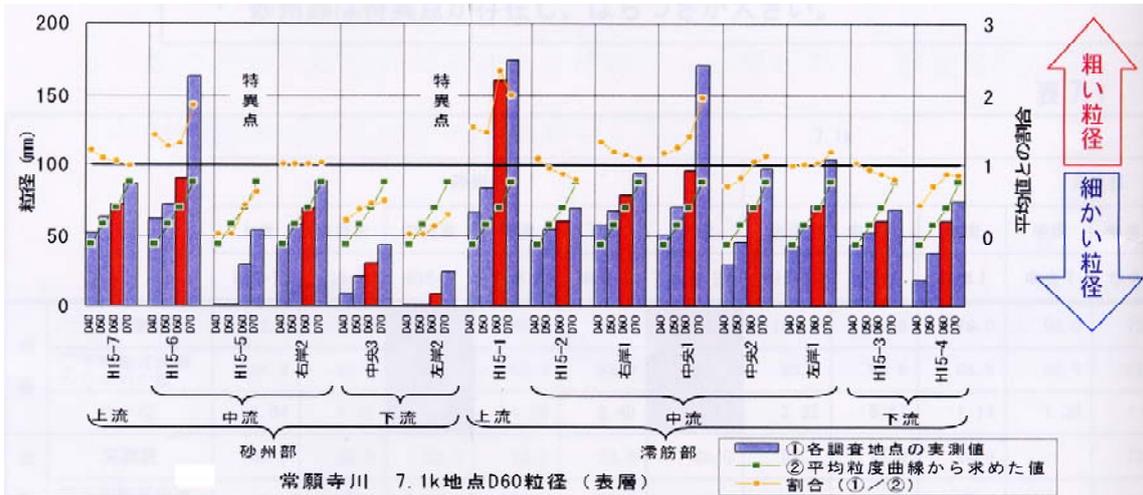


図-3.6 砂州および滞筋部における粒径分布特性 (常願寺川: 7.1k 地点、表層)  
(参考文献<sup>8)</sup>より)