

報 文

水路幅と掃流砂量との関係について

池 田 宏

I はじめに

ある大きさの岩屑で構成された、ある大きさの勾配をもった地表を、ある量の水が流れる時、その流水によって運搬される掃流砂量は、流れの幅の大きさによってどのように異なるであろうか。この報告は、この問題を水路実験によって検討した結果である。

この問題に関しては、従来ふたつの相反する見解が示されているようである。そのひとつは、流れの幅/深さ比が小さいほど掃流砂量が増すという考えである。たとえば野上・浅野 (1975) の実験は、間接的にはあるがこの問題に対し実験的に答えを出そうと試みたものといえよう。野上・浅野は扇状地の縦断勾配と上流河谷の沖積地の勾配を比較した場合、前者が急な例がいくつかあるという事実 (村田, 1933) から、上流河谷が扇状地に比較して河幅が狭いために、同じ流量と流砂量を流すのにより小さい勾配になっていると考えた。この考えからすれば、もし勾配が同じならば、幅の小さいほど掃流砂量は大きくなるということになる。

野上・浅野の実験は、残念なことに、実験数も少なく、しかも、水路内に陸地が現われないような水路幅の狭い水流は沖積地を流れる堤防河川に対応するとの認識をしたため、水路内に陸地がみられる水路幅の大きい条件下で、いいかえれば水路幅の影響がほとんど現われない条件下で行なわ

れた。そのため流量と流砂量が等しい時、水路幅の狭いほど勾配が小さくなるかどうか、いいかえれば勾配が等しい場合には水路幅が小さいほど流砂量が増すかどうか明らかになっているとはみられないが、流れの幅/深さ比が小さいほど掃流砂量が増すという考え方の例とみることはできよう。

もうひとつの見解は、上述の考えとは逆に、流れの幅/深さ比が大きいほど掃流砂量は増大すると考えるものである。このような考え方は Regime Theory の研究の過程で得られたようであり、たとえば Griffith (1927) は、土砂輸送量の大きい水路は幅/深さ比が大きいとの観察結果から、幅/深さ比の大きい水路は掃流砂の運搬に適しているとした。Lane (1937) は掃流砂量の多い水路ほど幅/深さ比がなぜ大きくなるかを、水路断面内での流速分布から説明している。

Bagnold (1977) も、流れの幅/深さ比が大きくなるほど掃流砂量が増大すると考えている¹⁾。すなわち、Bagnold (1966, 1973) は、水路床単位面積あたりのストリーム・パワー $\omega = \tau_0 u_m$ (ここで τ_0 : 水流と底面との間のせん断応力, u_m : 平均流速) と単位幅掃流砂量 i_b との関係を追究し、Williams (1970) による実験結果を用い、ストリーム・パワー ω が一定の水流では粒径が一定なら水深 D の小さいほど掃流砂量 i_b が増加することを明らかにし、理論的に説明した。

Bagnold (1977) は、この結論を実際河川のデー

タで検証するとともに、水路全幅について上の考えを拡張した。すなわち、水路全幅についてのストリーム・パワー Ω と掃流砂量 I_b とは、それぞれ ω 、 i_b に水路幅 W を乗じたものであるから、 ω と i_b の間に認められた関係は Ω と I_b の間にも成立するとし、この考えから、流水量 Q と勾配 S とが与えられた時、粒径が一定なら、水深が小さいほど、つまり、幅が大きいほど掃流砂量 I_b は大きくなるとしたのである。

一方、ここでとりあげた問題、すなわち、水路幅によって掃流砂量がどのように変わるかという問題は、動的平衡理論によって安定河道の設計をする場合には基本的に明らかになっていなければならないことと考えられるので、その分野ではそれ相当の検討がなされているものと予想されるところであるが、実際にはほとんど検討されていないようである（吉川ら、1958、土屋、1966）。

II 実験方法

実験に使用した水路は長さ5.5mの直線水路で、水路下流端から流出した砂を水とともに水路上流端へ返送しうるようにした循環式水路である。水路は側壁を合板・油性ペンキ塗りとし、観察のため片側中間部2mの範囲を透明アクリル板とし²⁾、水路幅は1、2、3、5、10、20、40cmの7種類とした。

実験には中径0.5~2mm（中央粒径1.1mm）の粗砂を用いた³⁾。これにより、実験条件内で流砂の様式は常に転動ないし躍動という様式すなわち掃流砂として運搬され、また砂連などの微地形が生じて現象が複雑にならないようにした。

給水量 Q は、給水管の途中に取付けた電磁流量計の指針によってバルブの開度を調節し、給水量の時間的変動のないことを確認し、各 Run の終りに容積法によって測定した。

水面勾配 S は、全実験を通じ1/50と一定に保った。すなわち、水路側壁下部に水路長1m毎に小孔をあけ、そこから水路内の水流の静水頭を取出してその縦断変化から水面勾配を求め、これが1/50になるように水路勾配をジャッキによって変

化させた。

水深 D は、水路側壁が透明アクリル板の部分に物差を直接あてて0.5mm単位で読みとった。なお水路幅が40cmの場合には水深を十分正確に読みとれなかった。

掃流砂量 I_b は水路下流端で水路から流出してくる砂を水とともに容器に受けるか、あるいは、給水量が多いときには流出する砂のみを十分細かい目開きの篩いによって捕え、その中に含まれている砂の重量を秤量し、これを砂の単位重量2.65g/cm³として水中重量に換算し、水路全幅についての単位時間あたり掃流砂量 I_b とした。流砂の粒度には各 Run 毎には大差がなかったので粒度分析は行なわなかった。

実験は、はじめ水路幅を設定し、水路床の勾配を1/50に設定した後、水路床に砂を厚さ3cmに一樣に敷きつめ、通水して給水量を次第に増加させ、底質の移動限界時の給水量とその時の水深を測定し、ついで水面勾配を制御しつつ給水量を段階的に変え、各流量について十分な通水時間後に水深と掃流砂量を測定した。このようにして96 Run の実験を行なった（表1）。

III 実験結果

実験結果を図1および図2に示す。図1は、掃流砂量 I_b とストリーム・パワー Ω の関係が水路幅 W によってどのように異なるかを示しており、図2は各水路幅毎に、給水量 Q と水深 D の関係を示している。図1・図2ともに幅2cmの場合のデータをプロットした。他の幅についてもほぼ同程度かそれ以上のばらつきがある（表1）。

図3に、ストリーム・パワー Ω と水路幅 W との組合せで掃流砂量 I_b がどのようになるかを、図1の座標軸を変換して示した。これによると次の3つの領域に区分できそうである。

- I ストリーム・パワー Ω が一定なら、水路幅が小さいほど掃流砂量 I_b が減少する領域
- II ストリーム・パワー Ω が一定なら、水路幅が大きいほど掃流砂量が減少する領域
- III 流砂の生じない領域

表1 実験結果

勾配：1/50、実験用砂の中央粒径：1.1mm

Run No.	Q ℓ/sec	D cm	I _b g/sec	Bed form	Run No.	Q ℓ/sec	D cm	I _b g/sec	Bed form	Run No.	Q ℓ/sec	D cm	I _b g/sec	Bed form
Flume width : 1cm					Flume width : 5cm					Flume width : 20cm				
1-1	0.105	2.55	0.098	P	5-1	0.037	0.583	0.000	P	20-1	0.180	—	0.000	P
2	0.154	3.70	0.161	P	2	0.071	0.683	0.027	P	2	0.240	(0.87)	0.413	B
3	0.264	5.34	0.264	P	3	0.081	0.783	0.105	P	3	0.302	(1.00)	0.215	B
Flume width : 2cm					Flume width : 10cm					Flume width : 40cm				
2-1	0.018	0.45	0.000	P	10-1	0.062	0.550	0.000	P	40-1	0.341	—	0.349	B
2	0.030	0.65	0.000	P	2	0.072	0.650	0.000	P	2	0.527	—	0.922	B
3	0.058	1.05	0.157	P	3	0.117	0.750	0.026	B	3	0.529	—	1.49	B
4	0.126	1.97	0.360	P	4	0.148	0.830	0.182	B	4	0.624	—	1.57	B
5	0.195	2.50	0.456	P	5	0.191	—	0.386	B	5	0.732	—	2.51	B
6	0.315	3.46	0.507	P	6	0.230	1.05	0.853	P	6	0.790	—	1.59	B
7	0.422	4.18	0.574	P	7	0.264	1.30	1.30	P	7	0.979	—	2.54	B
8	0.645	5.92	0.685	A	8	0.313	1.00	1.24	P	8	1.28	—	5.16	B
9	0.867	7.07	0.753	A	9	0.324	1.01	0.816	P	9	1.49	—	8.72	B
10	1.06	7.66	0.803	A	10	0.417	1.10	1.96	P	10	1.65	—	5.12	B
11	1.34	11.2	0.828	A	11	0.437	1.40	1.64	P	11	1.76	—	4.81	B
12	1.70	12.0	0.934	A	12	0.472	1.43	2.55	P	12	1.88	—	12.0	B
Flume width : 3cm					Flume width : 20cm					Flume width : 40cm				
3-1	0.100	1.18	0.182	P	20-1	0.180	—	0.000	P	40-1	0.341	—	0.349	B
2	0.147	1.45	0.592	P	2	0.240	(0.87)	0.413	B	2	0.527	—	0.922	B
3	0.224	1.93	1.09	P	3	0.302	(1.00)	0.215	B	3	0.529	—	1.49	B
4	0.313	2.25	1.10	A	4	0.345	(1.33)	0.196	B	4	0.624	—	1.57	B
5	0.419	2.51	1.54	A	5	0.417	(1.48)	0.884	B	5	0.732	—	2.51	B
6	0.570	3.36	1.41	A	6	0.426	—	0.660	B	6	0.790	—	1.59	B
7	0.593	3.50	1.38	A	7	0.480	(1.40)	1.58	B	7	0.979	—	2.54	B
8	0.692	3.73	1.51	A	8	0.558	(1.38)	2.37	B	8	1.28	—	5.16	B
9	0.954	4.88	2.38	A	9	0.733	(1.54)	2.48	B	9	1.49	—	8.72	B
10	1.21	5.21	2.80	A	10	0.820	—	2.68	B	10	1.65	—	5.12	B
11	1.53	6.60	3.29	A	11	1.10	(1.55)	5.61	B	11	1.76	—	4.81	B
12	1.77	7.44	3.56	A	12	1.33	(1.61)	5.57	B	12	1.88	—	12.0	B
13	2.12	8.88	4.13	A	13	1.57	(1.83)	6.85	B	13	1.89	—	6.08	B
					Flume width : 10cm					Flume width : 40cm				
					10-1					40-1				
					2					2				
					3					3				
					4					4				
					5					5				
					6					6				
					7					7				
					8					8				
					9					9				
					10					10				
					11					11				
					12					12				
					13					13				
					14					14				
					15					15				
					16					16				
					17					17				
					18					18				
					19					19				
					20					20				
					21					21				
					22					22				
					23					23				

P : plane bed

B : bars

A : antidunes

Q : Discharge of flow (ℓ/sec)

D : Depth of flow (cm)

I_b : Transport rate of solids by immersed weight per whole width of flow (g/sec)

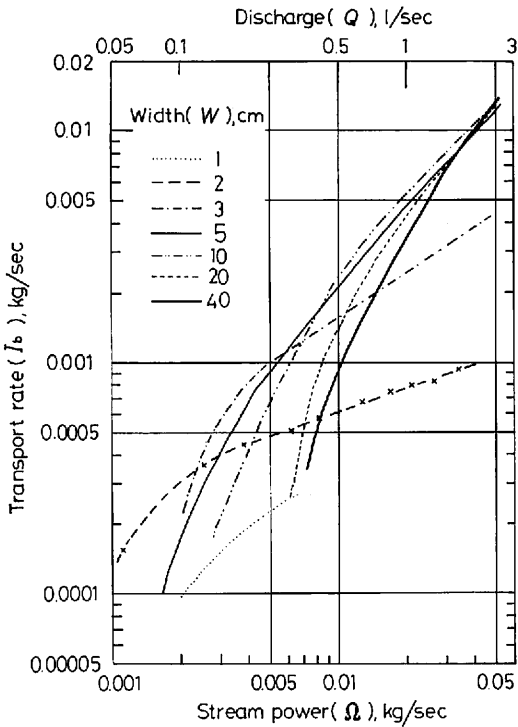


図1 水路全幅あたりの掃流砂量 (I_b) (水中重量) とストリーム・パワー ($\Omega = \rho g QS$) の関係

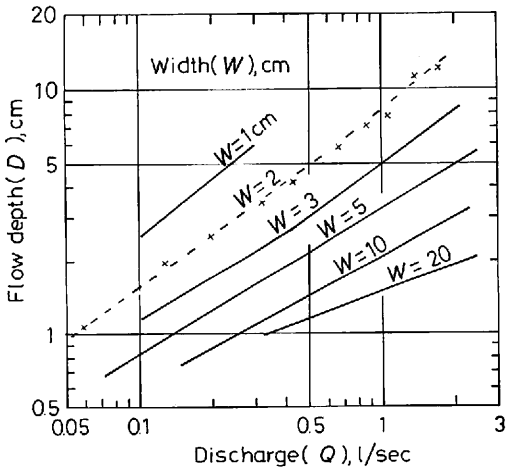


図2 給水量 (Q) と水深 (D) の関係

I と II の領域の間には、あるストリーム・パワーに対して、掃流砂量が最大となる水路幅がある

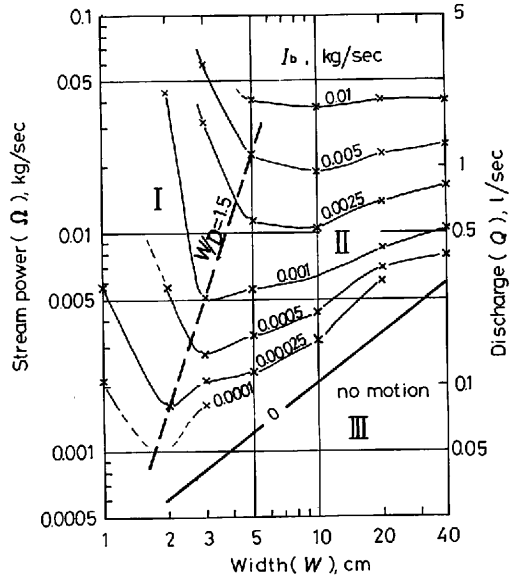


図3 水路幅 (W) がストリーム・パワー (Ω) と掃流砂量 (I_b) との関係に及ぼす影響

(図3中の破線)。とくにそれは水路幅が5 cm 以下の場合に明瞭に認められる。この時の給水量に対応する水深を図2から求め、水路幅 W との関係調べると、最も簡単なものとして、幅/深さ比 W/D は、 $W/D=1.5$ で近似できる⁴⁾。

$W/D < 1.5$ の I の領域では、ストリーム・パワー Ω が一定の時、水路幅の小くなるほど流砂量が急激に減少するのはなぜであろうか。この理由は、図1と図2とから水深 D が一定、すなわち掃流力 $\tau_0 = \rho g DS$ が一定の水流が流送する単位幅掃流砂量 $i_b = I_b/W$ が、水路幅 W によってどのように変化するかをみることによって明らかになる(図4) すなわち、勾配と水深が一定の水流では、水路幅が狭いほど水路側壁との摩擦によって水流のもつストリーム・パワーは散逸され、単位幅掃流砂量 i_b は減少する(Williams, 1970)が、この水路側壁面の摩擦の影響が著しく現われている範囲が、まさに $W/D < 1.5$ の I の領域と一致している。

一方、II の領域は、水路の幅/深さ比が1.5以上の範囲にあたり、水路全幅あたりのストリーム

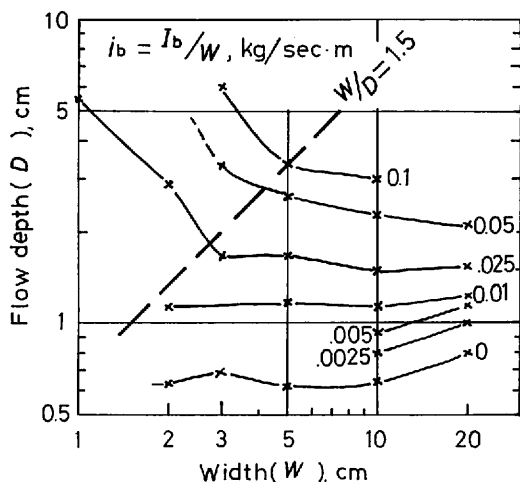


図4 水路幅 (W) が水深 (D) と単位幅あたりの掃流砂量 ($i_b = I_b/W$) との関係に及ぼす影響

・パワー Ω の同じ水流では、水路幅の大きくなるほど掃流砂量 I_b が減少する。この範囲では、Iの領域とは異なり、ストリーム・パワー Ω のうち水路側壁との摩擦によって散逸されるストリーム・パワーの比率は水路幅が大きくなるほど減少する。それゆえ幅の大きくなるほど掃流砂量が減少する理由として、側壁面以外の影響が現われているとみななければならない。

図3によれば、流砂開始に必要なストリーム・パワーすなわちIIとIIIの領域の境界のストリーム・パワーは、水路幅によって異なり、ほぼ水路幅に比例して増加していることが判る。Bagnold (1977) は、水路床の単位面積について流砂開始に必要なストリーム・パワーを ω_0 (threshold stream power) としたが、ここでは水路幅全体についての値として Ω_0 を採用する。いうまでもなく $\Omega_0 = \omega_0 \times W$ である。

$W/D > 1.5$ のある幅の水路においては、ストリーム・パワー Ω が Ω_0 よりも大きい時には流砂を生ずるが、それ以下では底質は移動しない。すなわち Ω_0 は砂床表面との摩擦によって水流のストリーム・パワーが散逸する限界値を示しているといえよう。 Ω_0 の大きさが砂床の幅とほぼ比例し

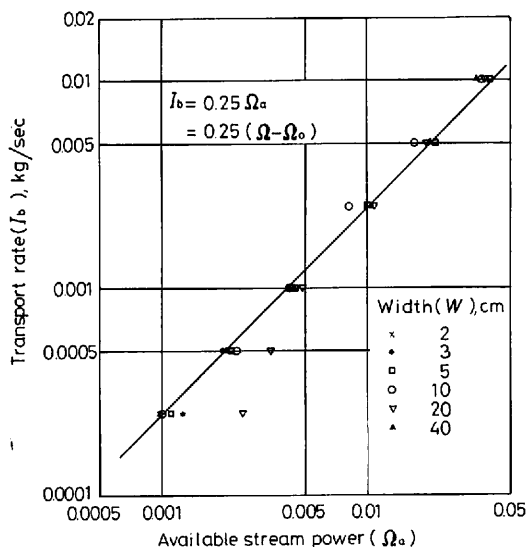


図5 水路全幅あたりの掃流砂量 (I_b) (水中重量) と有効ストリーム・パワー ($\Omega_a = \Omega - \Omega_0$) との関係 (図3のIIの領域について)

て増大していることも、このことと矛盾しない (図3)。

$\Omega > \Omega_0$ になってはじめて底質の移動が生ずるのは、 $\Omega - \Omega_0$ の分だけストリーム・パワーに余剰が生じ、そのストリーム・パワーによって流砂を生ぜしめうるのであると理解される。そこで、 $\Omega - \Omega_0$ を有効ストリーム・パワー (available stream power) と仮に呼び、 Ω_a と表わす。掃流砂の運搬は有効ストリーム・パワー Ω_a の一部によってなされるわけであるから、両者の間には当然密接な関係があると予想される。

図5に、 I_b と $\Omega_a = \Omega - \Omega_0$ の関係を示す。 I_b と Ω の間にみられた水路幅の影響 (図1) は図5ではほとんどなくなり、 $W/D > 1.5$ の領域では水路幅の大きさにかかわりなく、両者の関係は次式で近似される。

$$I_b = 0.25 \Omega_a = 0.25 (\Omega - \Omega_0)$$

上式は、 Ω の等しい流水によって運搬される掃流砂量 I_b が水路幅の大きくなるほど減少する理由は、 Ω_0 が幅に比例して増大するために、結果的に流砂のために配分されうる有効ストリーム・

パワー $\Omega_a = \Omega - \Omega_0$ が減少するからにはかならないことを示している。なおⅡの領域でも、 Ω がとくに大きい範囲では水路幅によって掃流砂量がほとんど変化しない(図3)。これは Ω が Ω_0 に比してはるかに大きい結果、 $\Omega_a \approx \Omega$ となるためであるとみえる。

Ⅳ む す び

以上、勾配および流水量が一定の流水によって運搬される掃流砂量が、水流の幅によってどのように変化するかを調べた結果、次の2点が明らかとなった。

1. 幅/深さ比がきわめて小さい流れ(この実験条件下では $W/D < 1.5$) では、水路側壁面との摩擦によってストリーム・パワーが散逸されてしまうため、水路幅が小さいほど、すなわち水深が大きく水路側壁面と流水との接触面積が大きいほど、掃流砂量は減少する。

2. 幅/深さ比が大きい流れ(この実験条件下では $W/D > 1.5$) では、水路幅が大きくなるほど掃流砂量は減少する。その原因は、砂床表面との摩擦によって失なわれる流砂開始ストリーム・パワー Ω_0 が水路幅 W にほぼ比例して増大し、結果的に流砂に使用されうる有効ストリーム・パワー $\Omega_a = \Omega - \Omega_0$ が小さくなるためである。

後者の結論はしかし、Bagnold (1977) の結論と全く対立する。この点については、次のことを指摘しておきたい。Bagnold は、単位面積あたりのストリーム・パワー ω が等しい水流は、水深が小さいほど流砂効率がよくなり、単位幅流砂量 q が大きくなる(Bagnold, 1966, 1973) ことを水路全幅に拡大して考えた時に、勾配 S を一定のまま、水路幅 W を大きくすることによって水深 D を小さくしても、流砂効率がよくなるとしてしまった。

水深が小さいほど流砂効率がよくなるというのは、実は、勾配が大きいほどということなのであって、勾配を一定のままに拡幅して水深を小さくしても流砂効率はよくなるわけではないのである。

本研究を行なうにあたり、御指導をいただき、また草稿を読んでいただいた井口教授に心より感謝いたします。また谷津教授をはじめとする皆さん、とくに実験水路を製作していただき、実験を手伝っていただいた小島豊盛技官と伊勢屋ふじこさん、園田洋一君(いずれも筑波大自然学類)に厚く御礼を申し上げます。

(本稿は1977年日本地理学会秋季大会で発表したものの一部を修正加筆したものである)。

注

- 1) この Bagnold (1977) の結論が、今回の実験を行なったいくつかの動機の中のひとつとなった。
- 2) アクリル板とペンキ塗り合板とでは、粗度が異なるものの、この実験の範囲内では実験結果に影響するほどの差異は認められなかった。
- 3) 使用した砂の粒度組成は次の通り。2.0mm 以上 0%、 ~ 1.68 mm 8.0%、 ~ 1.41 mm 15.2%、 ~ 1.19 mm 14.3%、 ~ 1.00 mm 36.5%、 ~ 0.84 mm 17.6%、 ~ 0.71 mm 5.2%、 ~ 0.59 mm 1.8%、 ~ 0.50 mm 0.4%、0.5mm 以下 0.5%。
- 4) 幅 $W = 2$ cm のとき $Q = 0.077$ l/sec, $D = 1.3$ cm $W/D = 1.54$, $W = 3$ cm のとき $Q = 0.265$ l/sec, $D = 2.0$ cm, $W/D = 1.50$, $W = 5$ cm のとき, $Q = 1.1$ l/sec, $D = 3.4$ cm, $W/D = 1.47$

文 献

- 池田 宏 (1973): 実験水路における砂礫堆とその形成条件, 地理評, **46**, 435—451.
- 池田 宏 (1975): 砂礫堆からみた河床形態のタイプと形成条件, 地理評, **48**, 712—720.
- 吉川秀夫・赤井浩一・速水頌一郎 (1958): 河道設計, 石原藤次郎編『応用水理学Ⅱ』, 丸善, 275—283.
- 土屋昭彦 (1966): 河道設計法, 1966年度水工学に関する夏期研修会講義集, A. ダム・河川コース, 土木学会水理委員会, 66—06, 1—24.
- 野上道男・浅野俊雄 (1975): 強制的に固定された水路幅が平衡勾配に与える影響についての水路実験, 地理評, **48**, 876—880.
- 村田貞蔵 (1933): 扇状地とその上流河谷との勾配関係に就て, 地理評, **9**, 857—869.
- Bagnold, R. A (1966): An approach to sediment transport problem from general physics. U.S. Geol. Survey Prof. Pap. 422-I, 1—37.

- Bagnold, R. A. (1973) : The nature of saltation and of bed-load transport in water. *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A.*, **332**, 473-504.
- Bagnold, R. A. (1977) : Bed load transport by natural rivers. *Water Resources Research*, **13**, 303-312.
- Griffith, W. M. (1927) : A theory of silt and scour. *Inst. Civil Eng., Proc.*, **223**, 243-314.
- Lane, E. W. (1637) : Stable channels in erodible material. *Am. Soc. Civil Eng., Trans.* **102**, 123-142.
- Williams, G. P. (1970) : Flume width and water depth effects in sediment transport experiments. *U. S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 562-H, 1-37.