

疑似粘性を有する堆積砂層の局所洗掘

LOCAL EROSION APPEARED ON PSEUDO-VISCOUS SEDIMENT LAYER IN ALLUVIAL FAN

三品 智和¹・矢内 栄二²・瀧 和夫²・Gary PARKER³

Tomokazu MISHINA, Eiji YAUCHI, Kazuo TAKI, Gary PARKER

1 学生員 工修 千葉工業大学大学院 土木工学専攻 (現在:中央技術(株) 〒310-0902 水戸市渡里町 3082)

2 正会員 工博 千葉工業大学 工学部土木工学科 (〒275-8588 習志野市津田沼 2-17-1)

3 Member of ASCE, Ph.D., St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota (Minneapolis, MN, 55414, USA)

It is important to prevent the local erosion in fertile farmlands, rivers etc. The local erosion occurred by the muddy flow involving the debris flow, is repeatedly appeared in an alluvial fan.

In this study, characteristics of the cyclic erosion are considered by experimental observations with narrow open channel in which the muddy water is naturally flowed toward the downstream. Results are as follows: The muddy water always flows along the surface of eroded steep slope which is made in a geological homogeneous sediment layer, regardless of the supercritical flow. The shapes of the eroded slope are classified into two groups with Horton number: Steep shape as a step flow, and gradual slope shape as a shoot flow. The migration velocity of the eroded slope toward upstream is in proportion to the $-7/2$ nd power of bed slope.

Key Words: cyclic erosion, pseudo-viscous sediment, alluvial fan, erosion shape, migration velocity

1. はじめに

長雨時の扇状地河川など、砂泥濃度の高い泥水が継続的に流下する所では、河床に局所的な洗掘が生じ易い。この局所洗掘は河床の安定化を阻害するもので、河川構造物の破壊、護岸の崩壊、さらには洪水流等による農耕地肥沃土の流亡などの原因となる。

局所洗掘の研究では、堆積層毎に密度を異にする河床に発生する局所洗掘の機構(Stein & Julien¹⁾、急勾配粘着性流路に形成される局所洗掘の形状(芦田・沢井²⁾、平面形状の差異による局所洗掘面の遡上速度(辻本ら³⁾等、流れの機構そのものに内在する一種の不安定性および堆積砂に含まれる巨礫の存在や土質の不均一性が堆積面に生じる局所洗掘の原因として考えられてきた。

そこで本研究では、洗掘現象の基本的知見を得る

ことを目的とし、多くの既往の研究成果と新たに行なう単一密度を持つ河床堆積層における実験を通して、砂泥混相流の泥水濃度および流水速度の差異による局所洗掘面の遡上速度変化について検討を行なう。

2. 局所洗掘現象

河床等に生じた局所洗掘は必ずしも珍しいものではない。写真-1¹⁾は、1995年にミシシッピ川流域で起きた農耕地表土の洗掘・流出を示したものである。農地に滞留した洪水が写真手前の道路の決壊を機に、農耕地の大規模な洗掘が進行したことを表している。また、写真-2は、ミネソタ州 Hibbing にある鉱山の選鉱工場の敷地内を流れる泥水河川の河床に生じた局所洗掘を示した写真である。浮遊選鉱によって捨

てられた細かいシルト、粘土粒子を多量に含む泥水が流下する過程で、沈殿・堆積層を形成し、突如、その堆積層に局所的な洗掘を生じさせ、今まさにその洗掘が上流側に遡上している様子を示したものである。このように、局所洗掘は耕地や河川では大きな問題とされている。



写真-1 ミシシッピ川流域の耕地の洗掘¹⁾



写真-2 浮遊選鉱からのずり泥水河川の局所洗掘

3. 局所洗掘に関する理論的解析

堆積層における局所洗掘現象は堆積粒子相互の噛み合わせや付着の状態と堆積面のごく近傍の流れの状態とによって作りだされ、粒子の沈降堆積と掃流・洗掘現象及び堆積層と泥水層との二層間の境界面の不安定現象とが混在していると考えられる。いま、堆積砂層に形成される局所洗掘現象を泥流がもたらす慣性力と堆積砂面による抵抗力の比 H_o で整理すると、

$$H_o = \frac{F_i}{F_e} \quad (1)$$

となる。ここで、 F_i は慣性力($=V(\sigma - \rho)h_e b V_r$)、 F_e は洗掘に対する抵抗力($=\rho g h I \cdot h_e b$)、 H_o はホルトン数、 ρ は水の密度、 σ は砂粒子の密度、 h は水深、 I は堆積層の勾配、 h_e は洗掘面の高さ、 b は水路

表-1 既往の研究の成果

Run	Q_w (cm^3/s)	B (cm)	I	h (cm)	V (cm/s)	F_r	V_r (cm/s)	H_b
Stein&Julien	1	12.7	10.40	0.06	0.19	66.1	4.82	2.06
	2	14.2	10.40	0.02	0.30	46.7	2.71	33.63
	3	26.6	10.40	0.03	0.38	69.5	3.58	8.13
	4	41.7	10.40	0.03	0.50	83.7	3.79	17.29
	5	41.5	10.40	0.04	0.44	95.2	4.60	1.97
芦田・沢井	1	5.0	1.33	0.23	0.32	11.7	0.66	1.41E-04
	2	9.0	1.20	0.23	0.23	32.6	2.17	1.72E-03
	3	20.0	2.20	0.23	0.63	144	0.58	1.25E-04
	4	2.0	0.90	0.49	0.27	8.2	0.51	1.72E-04
	5	5.0	1.26	0.49	0.34	11.7	0.64	2.81E-04
	6	10.0	1.68	0.49	0.36	16.5	0.88	6.56E-04
	7	2.0	0.83	1.00	0.21	11.5	0.80	4.38E-04
	8	5.0	1.20	1.00	0.35	11.9	0.64	5.47E-04
	9	10.0	0.39	0.65	0.39	20.5	1.05	7.50E-04
辻本	1	10000	50.00	0.01	2	100	2.26	0.83

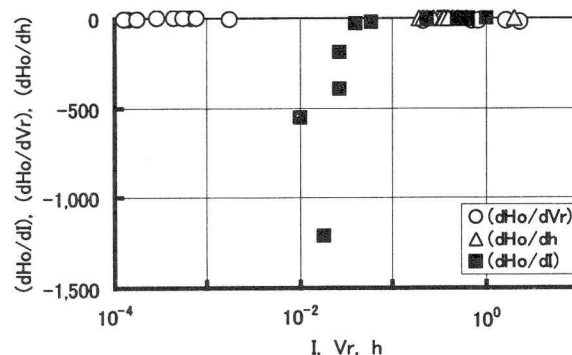


図-1 各因子によるホルトン数の物理的感度

幅、 g は重力加速度、 V は断面平均流速、 V_r は洗掘面移動速度（遡上速度）である。ここでいま、流水の速度 V をManningの断面平均流速で表現すると(1)式は

$$H_o = \frac{V_r}{n} \frac{(s-1)}{gh^{1/3}} I^{-1/2} \quad (2)$$

と書き表すことが出来る。ここに、 n はマンニングの粗度係数、 s は砂粒子の比重($=\sigma/\rho$)である。

いま、表-1に示すStein & Julien²⁾、芦田・沢井³⁾、辻本⁴⁾の実験結果に対し、(2)式の各構成因子 I 、 h 、 V_r によるホルトン数の変化率を物理的感度で表すと、図-1のようになる。ここで、各因子の変動範囲はホルトン数で $1.82 \times 10^{-5} \sim 33.6$ 、フルード数で $0.51 \sim 4.82$ である。この範囲はフルード数が 0.5 程度の大河川、あるいは、射流を伴う小河川の流れに相当す

と考えられる。図-1より、各構成因子の内、遡上速度と水深の変動はホルトン数の変動因子となっていないこと、一方、堆積層勾配が最も大きな影響因子であることがわかる。このことから、ホルトン数を堆積層勾配の変数として、表-1の実験データより、

$$Ho = 5 \times 10^{-6} I^{-4} \quad (3)$$

を得る。ここで、係数の 5×10^{-6} は無次元数である。また、(3)式より、堆積層勾配が大なほどホルトン数は小さくなり、堆積層勾配の-4乗に比例する変化を示すことがわかる。

局所洗掘現象は堆積面付近の流れの状態と堆積層の状態、すなわち、沈殿粒子同士の粘着性、粒子形状に関わる噛み合わせ等の状態によって堆積層表面の状態は異なると考えられる。このことは(2)式右辺の Manning の粗度係数に代表される堆積層の特性や流れの強さによる堆積層の抗力のレオロジー学的変化量(非ニュートン流動性)を偏に(3)式の数値係数 5×10^{-6} に含めたと見ることが出来る。このことから洗掘面の遡上速度 V_r は(2)、(3)式より、

$$\frac{V_r}{n} = 5 \times 10^{-6} \frac{gh^{1/3}}{(s-1)} I^{-7/2} \quad (4)$$

となる。ここで、(4)式の左辺は遡上速度と Manning の粗度係数との比で表される洗掘面の見掛け遡上速度(V_r/n)で、堆積勾配の-7/2乗に比例することが認められる。さらに、この見掛け遡上速度は泥粒子などの堆積層の非ニュートン流動性を包括した、所謂、補正された遡上速度を意味する量で、水深 h の 1/3 乗に比例するのが特徴的である。すなわち、1cm の水深がもたらす遡上速度と 10m の水深を持つ大河川でのそれとはただか 10 倍の遡上速度差に過ぎないことが読み取れる。

さらに、砂の比重 $s=2.67$ を用いて、洗掘面の見掛け遡上速度は次式のようになる。

$$\frac{V_r}{n} = 2.93 \times 10^{-5} \cdot h^{1/3} I^{-7/2} \quad (5)$$

ここで、式中の 2.93×10^{-5} は次元を持つ係数で、(m/s^2)の単位で表される。また一方、(4)式の粗度係数 n を流れの平均流速で表すと、

$$\frac{V_r}{V} = 3.0 \times 10^{-6} \cdot Fr^{-2} I^{-3} \quad (6)$$

となる。すなわち、相対遡上速度(V_r/V)はフルード数と堆積層勾配とによって支配される変数であることがわかる。さらに、(6)式を再整理すると、遡上速度(V_r)は

$$V_r = 2.93 \times 10^{-5} \cdot \frac{h}{V} I^{-3} \quad (6')$$

と書くことが出来る。ここで、局所洗掘の洗掘面の遡上は流れの平均流速、水深および堆積層勾配に強く関係する量で、特に、その遡上速度は堆積層勾配の3乗に反比例することがわかる。このことは、遡上速度は水深が増すほど速く、流速が大きなほど遅くなり、さらに、堆積層勾配の増加がそれらにも益して、遡上速度を急激に遅いものにするようになる。

以上、既往の研究成果を基に局所洗掘の形状および遡上速度について考察を行なった。しかしながら、これらの研究成果には様々な条件が科せられており、必ずしも洗掘の基本的現象を明らかにするに十分とは言えない。そこで、最も単純な条件の下で作られる洗掘現象を基本的な局所洗掘現象と考え、そのときの局所洗掘面の遡上速度について、水路実験を通して次に検討を行なう。

表-2 局所洗掘水路実験条件

Run	Material	d_{50}	s	Qw	Qs	C_s
1-5	Silica	45	2.67	35.2	6.11	0.061
1-7	Silica	45	2.67	41.9	3.03	0.026
1-11	Silica	45	2.67	10.2	2.91	0.097
1-13	Silica	45	2.67	20.6	6.18	0.101
1-15	Silica	45	2.67	53.6	3.11	0.021
1-16	Silica	45	2.67	72.2	2.98	0.015
2-4	Silica	25	2.66	37.5	2.22	0.022
2-5	Silica	25	2.66	32.3	2.64	0.030
2-11	Silica	25	2.66	74	1.81	0.009
2-12	Silica	25	2.66	70.6	2.33	0.012
2-25	Silica	25	2.66	35.7	5.08	0.051
3-1	Silica	25	2.66	15.0	4.50	0.101
3-2	Silica	25	2.66	18.0	4.50	0.086

4. 局所洗掘に関する水路実験^{5,6,7)}

本実験には長さ 4m の矩形断面開水路を用いることとした。ここで、水路幅は蛇行流の発生を防ぐために 2cm とした。また、水路上流端には給水・給砂装置を設置し、混合装置により一定濃度の泥水が水路に供給されるようにした。水路は透明なアクリル製とし、壁面には目盛シート(目盛間隔 1cm)を貼り付け、洗掘形状および遡上速度の測定を容易にした。

砂材料には、粒径の均一なシリカ粒子($d_{50}=25$, 45

μm 、比重は 2.67)を用いた。ここで、本実験のシリカ粒子はその粒径の細かさから、水路床の堆積層は見かけの粘性を持つようになり、非ニュートン性流動の特徴を示す。流れが速く、ひずみ速度の大きな場合には見かけの粘性が高く、また、流れの遅い場合には見かけ粘性の低い性質を示す粒子層である。

実験条件は表-2に示すように、給水量を 10.2～74.0 cm^3/s 、給砂量を 1.81～6.18 g/s の範囲の 13 通りとした。また、そのときの無次元泥水濃度 C_* は次式で求められ、0.009～0.101 である。

$$C_* = \frac{Q_s / \rho_s}{Q_w / \rho_w + Q_s / \rho_s} \quad (7)$$

ここで、 Q_s と Q_w はそれぞれ給砂・給水量、 ρ_s と ρ_w は砂粒子および水の密度である。

実験は、まず、水平に設置された水路の上流端より、所定の濃度の混合泥水を連続的に流下させ、水路床全区間に単一密度の堆積平衡層を形成させる。この後も、混合泥水の流下を続けると、水路下流端に近い区間から局所洗掘が生じ、その洗掘高さを増加させながら上流へと遡上をはじめる。その後、洗掘高さと遡上速度が安定(平衡)状態となり、水路上流端へとその状態(平衡状態)を保ちつつ遡上を続ける。この時の堆積層平衡勾配 I 、洗掘面の高さ h_e 、洗掘面遡上速度(洗掘面後退速度) V_r の3項目を計測し、これらを解析用データとした。なお、水深 h は局所洗掘地点より上流の水深が一定である区間の水深を、洗掘高 h_e は洗掘地点上流側の砂堆積層面から滝壺までの垂線の長さを、洗掘面移動速度 V_r は単位時間当たりの上流側への洗掘面移動速度とした。

5. 実験結果

本実験で観察された代表的な局所洗掘の状態を写真-3に示す。水路内の堆積層上部の黒色部分が流水層で、水路下流部で発生した洗掘が上流側へと遡上し、その後、新たな洗掘が発生し、4個の局所洗掘

(矢印点)が水路内の堆積層面上を一定の間隔で繰り返し発生・遡上する様子が認められる。ここで、初期の局所洗掘が水路下流区間で発生すると、その洗掘は洗掘高さを徐々に増しながら、流れに逆らうように上流へと移動し、洗掘高さの一定な安定状態へと遷移するのが観察された。

安定状態を保持した洗掘の形状は、写真-4に示される急峻なステップ状と写真-5の緩慢なスロープ

表-3 繰り返し局所洗掘実験結果

Run	Q_w (cm^3/s)	I	h (cm)	V (cm/s)	Fr	h_e (cm)	V_r (cm/s)	Hb
1-5	35.2	0.05	0.14	52.2	4.65	1.15	0.18	1.90
1-7	41.9	0.05	0.16	51.3	4.06	0.95	0.14	1.42
1-11	10.2	0.12	0.12	17.4	1.62	0.60	0.02	0.04
1-13	20.6	0.08	0.12	34.7	3.22	1.02	0.17	0.77
1-15	53.6	0.03	0.21	52.2	3.69	1.54	0.15	2.03
1-16	72.2	0.03	0.25	81.0	6.16	1.06	0.18	3.78
2-4	37.5	0.04	0.14	55.5	4.83	1.49	0.06	0.95
2-5	32.3	0.06	0.15	43.9	3.65	1.31	0.05	0.38
2-11	74	0.06	0.15	97.6	8.24	1.87	0.06	1.05
2-12	70.6	0.07	0.33	45.4	2.55	1.39	0.06	0.20
2-25	35.7	0.07	0.13	58.6	5.44	1.78	0.06	0.59
3-1	15.0	0.09	0.26	29.0	1.82	0.08	3.30	0.18
3-2	18.0	0.04	0.26	34.8	2.19	0.29	3.92	1.50

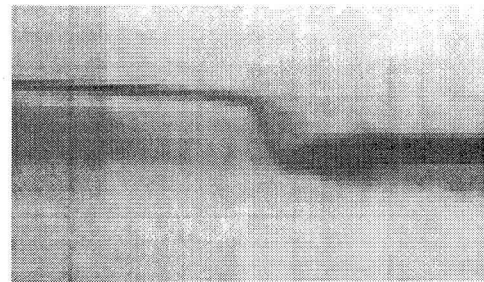


写真-4 ステップ状の洗掘

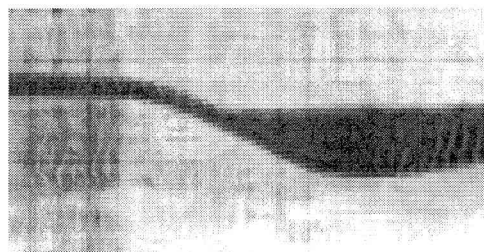


写真-5 スロープ状の洗掘



写真-3 開水路における繰り返し局所洗掘

状の2種類の洗掘形状が観察された。急峻なステップ状の洗掘では、流水は洗掘面から剥離することなく常に斜面に沿った流れとなっており、洗掘斜面では堆積粒子の急激な巻き込みを生じさせているのが認められた。一方、緩慢なスロープ状の洗掘では、堆積層表面上の流速は速く、洗掘斜面の堆積粒子が削ぎ取られるような掃流現象が観察された。

いずれの洗掘現象も洗掘面の遡上速度は表-3に示す通りで、泥水の流下速度 (17.4~97.6 cm/s) に比して小さく、本実験条件下では 1/10~1/500 の 0.06~3.92 cm/s の範囲にあることが明らかとなった。また、洗掘現象は局所洗掘発生直前の堆積層表面の勾配 (平衡河床勾配) が 1/40~1/83、水深 0.1~0.3 cm、洗掘高さ 0.1~1.9 cm、および流水の流速 17.3~97.6 cm/s、フルード数で 1.6~8.2 の範囲で形成された。

1) 局所洗掘面の形状

ホルトン数 Ho と堆積層勾配 I の関係を図-2に示す。ここで、図中の実線は(3)式の実験式を、また、○、●印は本実験値を表す。図より、実験結果と(3)

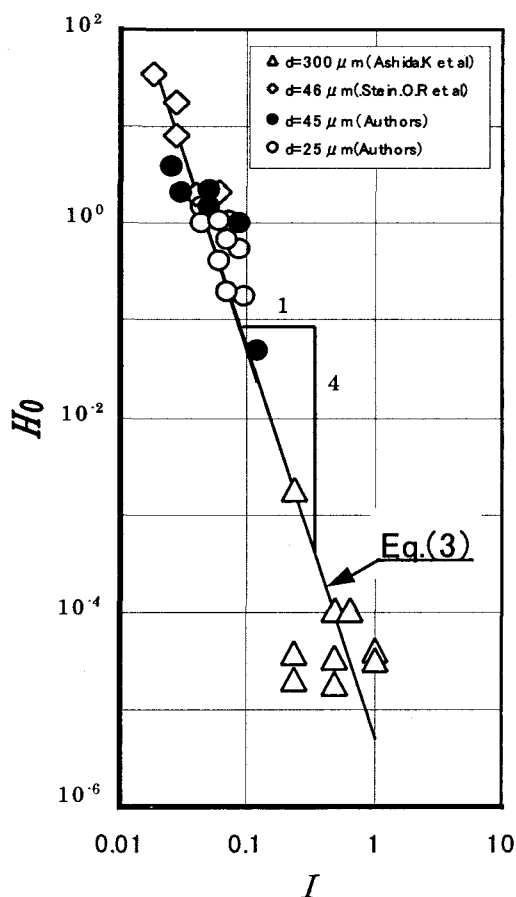


図-2 ホルトン数と堆積勾配との関係

式との良い一致を、さらに、堆積砂層の平衡勾配の大きな領域では、ホルトン数の小さな洗掘の発生がわかる。このことは堆積砂面抵抗力の卓越した状態 ($F_f/F_b < 1$ または $Ho < 1$) での洗掘を意味するもので、写真-4に見られるような急峻でステップ状の洗掘形状が観察された。一方、堆積層勾配の小さな状態での局所洗掘、すなわち、泥流による慣性力が卓越した状態 ($F_f/F_b > 1$ または $Ho > 1$) では、緩慢なスロープ状洗掘形状の形成が観察された。

2) 洗掘面移動速度

洗掘面の見掛け遡上速度 (V_r/n) は水深をパラメータとして堆積層勾配で整理すると、図-3のように表すことができる。

ここで、図の縦軸は遡上速度と Manning の粗度係数との比で、見掛け遡上速度 (V_r/n) を表す。また、この見掛け遡上速度は粗度係数の取るべき数値範囲が狭いことから、洗掘面の遡上速度を表していると見ることもできる。また、図中の○、●印は本実験の値を、さらに、黒印はホルトン数 (Ho) が 1 以上であることを表している。図中の実線は水深をパラメータとして(5)式を表したものである。ここで、水深の変化(大小)が見掛け遡上速度に対し、1/3 乗でしか影響を与えないことから、その変動範囲は限られ

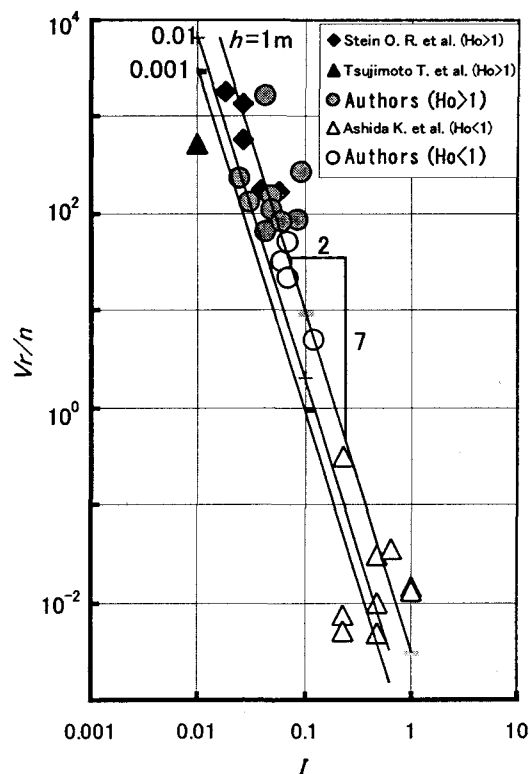


図-3 見掛け遡上速度 (V_r/n) と堆積層勾配の関係

たものになることがわかる。

図-3より、全ての実験結果は見掛け遡上速度が堆積層勾配の $7/2$ 乗に反比例する実験式と良い一致が認められる。そして、河床勾配が緩くなるほど洗掘面の移動速度の速くなることが認められる。さらに、見掛け遡上速度値のほぼ 100 を境にして、ホルトン数もまた堆積砂面の抵抗力と泥流による慣性力との比率が反転することが認められる。すなわち、見掛け遡上速度が 100 より大な領域ではホルトン数も 1 より大きくなっていることがわかる。

さらに、相対遡上速度 (V_r/V) との関係を示したのが図-4である。ここで、図中の実線は(6)式のフルード数をパラメータとして示したものである。図より、実験結果と実線との良い一致が認められる一方、ホルトン数による現象の分類に図-3 に示されるような明確さが認められなくなっていることがわかる。

6. 結 論

本研究では、洗掘現象の基本的知見を得ることを目的とし、多くの既往の研究成果と単一密度を持つ河床堆積層において、高濃度の砂泥混相流が作り出

す局所洗掘の実験を通して、砂泥混相流の泥水濃度および流速の差異による局所洗掘面の遡上速度変化について検討を行なった。

本研究で得られた結果は次のようである。

- 1) 圧密の小さな単一密度の砂泥堆積層においても局所洗掘の形成されることが明らかとなった。
- 2) 洗掘形状は急峻なステップ状と緩慢なスロープ状の洗掘形状の2形状に分類できることを明らかにした。ステップ状洗掘ではホルトン数は1以下の値が、また、1以上の値を持つ洗掘形状はスロープ状洗掘形状であることを明らかにした。
- 3) 堆積層での洗掘面の相対遡上速度は $V_r/V = 3.0 \times 10^{-6} \cdot Fr^{-2} I^{-3}$ で求められることを示した。
- 4) 堆積層の非ニュートン流動性を加味した見掛け遡上速度 (V_r/n) を用いることにより、より簡素な関係式、すなわち、河床勾配の $7/2$ 乗に反比例する算定式 $V_r/n = 0.003 \cdot h^{1/3} I^{-7/2}$ を得た。また、見掛け遡上速度が 100 より大な領域ではホルトン数も 1 より大となっていることがわかる。

謝辞：本研究を行なうに当たり、北海道開発土木研究所環境研究室長の渡邊康玄氏より貴重な討議を戴いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Denning J. : When the Levee Breaks, In Coping with Natural Disasters, Civil Engineering, Vol.64, No.1, ASCE, On the Cover page and pp38-41, 1994.
- 2) Stein O.R., Julien P.Y. : Criterion delineating the mode of headcut migration, Journal of Hydraulic engineering, Vol.119, No.1, ASCE, pp.37-50, 1993.
- 3) 芦田和男, 沢井健二: 裸地斜面における流路の形成過程に関する研究(3), 京都大学防災研究所年報第 18 号B別刷, pp.371-385, 1975.
- 4) Ashis K.D., Kitamura T., Tsujimoto T.: 2-D Simulation of Overland Flow Around Gully Headcut, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.44, pp.635-640, 2000.
- 5) 三品智和, 瀧和夫, 村上和仁: 水路実験による堆積砂層表面における洗掘特性, 第27回関東支部技術研究発表会講演概要集, 土木学会, pp.232-233, 2000.
- 6) 三品智和, 瀧和夫, 村上和仁: 水路実験による堆積砂層表面の繰り返し局所洗掘特性, 第 55 回年次学術講演概要集(CD-ROM), 土木学会, No. II-276, 2000.
- 7) Mishina T., Taki K., Murakami K.: Cyclic Local Erosion Formed by Multiphase Flow of Fine Sand and Water, Proceedings of the Fourth International Conference on Multiphase Flow, No. 752, 2001.

(2001. 4. 16 受付)

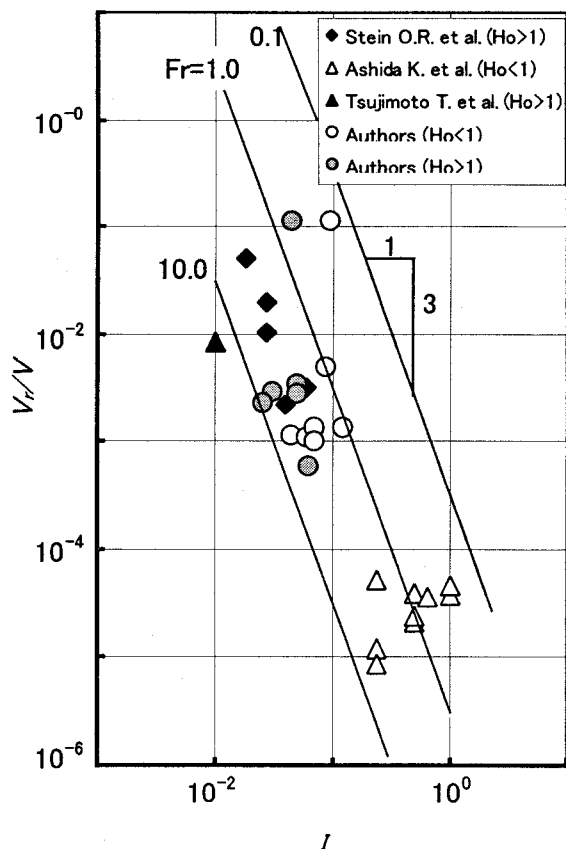


図-4 相対遡上速度 (V_r/V) と堆積層勾配の関係