

護床工下流部の局所洗掘

Local Scour Downstream of bed protection works

神田佳一*・村本嘉雄**・藤田裕一郎***・金川 靖****・中村元郎****

Keiichi KANDA, Yoshio. MURAMOTO, Yuichiro FUJITA, Yasushi KANAGAWA and Motoo NAKAMURA

This paper describes experimental results of local scour downstream of a bed protection work with hollow squared blocks under a dynamical equilibrium condition of bed load. Variations of profiles and the maximum depths of scour holes with time were discussed, and compared with those under a static equilibrium condition and experimental results of a bed protection work with smooth bed. Flow characteristics, such as, velocity distributions, bed shear stress and pressure on the scoured bed were also measured at several stages of scour. Non-equilibrium calculations of bed load using the bed shear stress measured could simulate well the variations of scour hole in the early stage of the scour.

Keywords : bed protection works, hollow squared blocks, local scour

1. はじめに

床固め及びそれに付随する護床工下流部の局所洗掘は、掃流力が局所的に河床の移動限界を越え護床工直下流付近の砂だけが移動する静的洗掘と掃流力が大きく全体的な流砂を伴う動的洗掘に分けられ、いずれも底面粗度の急変の影響を強く受ける。洪水時においては、後者の動的洗掘が問題となり、その洗掘特性を解明することは床固め及び護床工等の河川構造物の安全性を検討する上で重要な課題である。鈴木ら¹⁾は、床固め下流部の動的な局所洗掘過程について詳細な実験的検討を行っているが、上流部からの流砂は考慮されておらず、動的平衡状態を取り扱ったものではないと考えられる。また、イボ型の粗面による護床工下流部では、イボ要素間の速い流れが下流移動床上で拡散され3次元噴流に似た特性を示し、河床形状も横断方向に凹凸のある複雑なものとなるため、最大洗掘深及びその発生位置を理論的に予測することは非常に困難である。

本研究では、このような護床工周辺の動的局所洗掘過程に関して、イボ型の護床ブロック（ホロースケア模型）による粗面から均一砂の移動床への粗度急変部を対象とした実験を行い、河床の変動特性について静的洗掘の参照実験及び鈴木らの実験結果と比較・検討するとともに、洗掘の進行に伴う流速分布、底面せん断応力と圧力の分布及び流砂の運動特性を詳細に計測し、洗掘機構について考察する。

* 正会員 工修 明石工業高等専門学校助手 土木工学科 (〒674 兵庫県明石市魚住町西岡)

** 正会員 工博 京都大学防災研究所教授 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

*** 正会員 工博 京都大学防災研究所助教授 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

**** 明石工業高等専門学校 土木工学科 (〒674 兵庫県明石市魚住町西岡)

2. 実験の概要

実験には幅23cm、深さ30cm及び長さ4mの
アクリル製長方形断面水路を用い、その上
流部1.5mの区間に図-1に示すイボ型ブロッ
ク（ホロースケア模型）を設置し、下流部
には平均粒径 $d_m=1.5\text{mm}$ の様な砂（移動限
界速度 $U_{*c}=3.08\text{cm/s}$ ）をイボ要素の底面高
さまで敷き詰めた移動床とした。ブロック
及び砂面の粗度係数は、それぞれ $n_B=0.025$
及び $n_s=0.018$ である。実験は、表-1に示すように、
 U_{*0} が砂の移動限界 U_{*c} を越える動的洗掘（Run1）及
び $U_{*0} < U_{*c}$ の静的洗掘（Run2）の2ケースであり、
通水後の砂粒子の移動および河床の変形過程を側面お
よび上方からビデオカメラによって追跡した。Run1で
は、全体的な河床低下を防ぎ、動的平衡状態を得るた
めに水路下流端で回収した砂をブロック上流端より給
砂し、ブロック上で砂が堆積しないのを確認した上で
実験を行っている。さらに、Run1と同じ条件で通水後
 $t=5、10、30、60$ 及び180分
の各時間において水を止め、
砂表面をニスで固めた後、洗
掘穴内の流速分布、底面圧力
及び底面せん断力の流下方向
変化を、それぞれプロペラ流
速計（篠塚製作所、Model-
SV3）、圧力計（S T 研究所、
Model-PM6）及びせん断力計（東京計測、Model-
S10W）を用いて測定した。水路の座標は、粗度変
化点より流下方向にX軸、左岸側壁より幅方向に
Y軸、イボ要素底面より鉛直上方にZ軸をとった。

3. 護床工下流部の洗掘特性

3.1 洗掘形状

図-3は、Run1の初期状態（ $t=0$ ）において、
 $X=-2.7\text{cm}$ （図-2のA-A断面）での水位、流速の鉛
直分布及びそれから評価した摩擦速度の横断方向
の変化を示したものである。本実験で用いたホロ
ースケアは、イボ型の粗度要素が直角格子上に並
んでいるため、ブロック底面付近の流れはイボ要
素の前方で遅く、要素間では速い流れとなる。こ
のため、ブロック直下の洗掘形状は、図-2の鳥かん
図（ $t=5\text{分}$ ）に示すようにイボ要素間の延長上で

表-1 実験条件

No.	i	Q(l/s)	$h_c(\text{cm})$	$h_o(\text{cm})$	$U_{*0}(\text{cm/s})$
Run1	1/100	1.78	1.83	2.30	4.18
Run2	1/100	0.48	0.76	0.95	2.89

i：河床勾配、Q：流量、 h_c ：限界水深、
 h_o 、 U_{*0} ：下流砂面上の等流水深及び摩擦速度

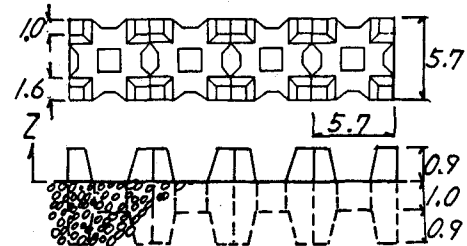


図-1 護床ブロックの形状 (単位: cm)

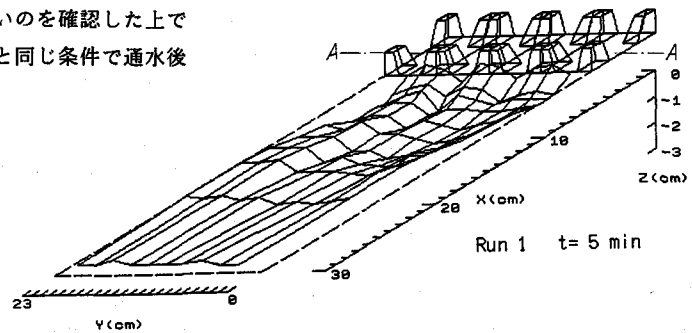


図-2 護床工下流の洗掘形状

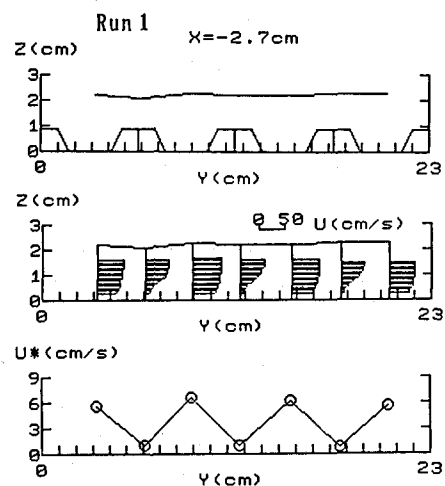


図-3 護床工上の水面形、流速鉛直分布
及び底面摩擦速度の横断変化

深掘れが生じ、洗掘された砂の一部が流れの拡散とともに横方向へ運ばれて、洗掘穴の前方に堆積した横断方向にも凹凸のある3次元的な形状を示す。このような特徴は、洗掘の進行過程において常に保たれており、最終の平衡状態における河床形状を示した図-4の等高線図からもわかるように、Run 2の静的洗掘過程では顕著であり、粗度変化直下流での河床の横方向の凹凸がRun 1の場合に比較して大きい。これは、Run 2では粗度変化点での水深がブロックの粗度高さにほぼ等しく、流れがイボ要素の間に集中するためである。図-4では、さらに以下の点が指摘できる。①Run 2では洗掘された砂がその前方に堆積しマウンドを形成しているのに対して、Run 1では、右岸よりの一部の領域を除いて河床位が初期状態とほぼ等しく、顕著な砂の堆積は見られない。②最大洗掘深と洗掘長さは、ともにRun 1の方が大きく、動的平衡状態の方がより危険側にある。

図-5は、Run 1において最大洗掘深が生じた縦断面($Y=10.5\text{cm}$)での水面形及び河床形状の時間変化を示したものである。また、河床形状について、最大洗掘深 Z_m で無次元表示したものを図-6に示す。水面形は、初期状態($t=0$)において、粗度変化点直下流で限界流状態から射流に遷移し、その後弱い跳水を伴って砂面上の等流状態へと遷移している。洗掘の進行に伴って、粗度変化点直下流の水面勾配が増大し、跳水による水位の変化も大きくなるが、粗度変化点上流及び跳水後の水面形はほとんど変化していない。また、跳水が完了する位置は、洗掘深が最大となる地点とほぼ対応している。洗掘

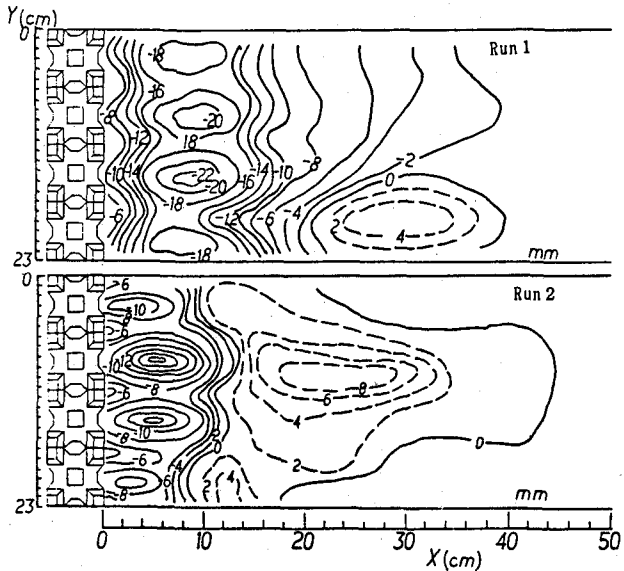


図-4 最終河床形状の等高線図

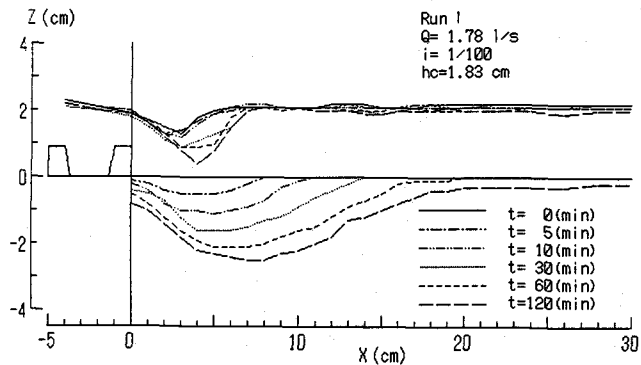


図-5 水面形及び河床形状の時間的変化

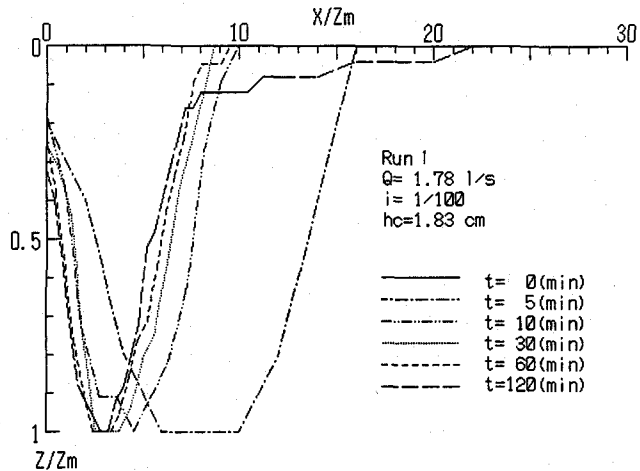


図-6 河床洗掘過程の無次元表示

形状は、図-6に見られるように、 Z_m の小さい $t=10$ 分までは対称な形状であるが、 $t=30$ 分以降は非対称のほぼ相似な形状を示しており、最大洗掘深 Z_m は、粗度変化点から Z_m の約3倍の距離にあって、洗掘の長さは Z_m の約10倍である。

図-7は、図-6の平衡状態の最終河床形状をRun 2及び鈴木ら¹⁾による床固め下流の局所洗掘の実験結果と比較したものである。Run 2では、洗掘穴下流で堆積が生じている他は、Run 1と相似な洗掘穴形状を示している。一方、上流からの給砂がなく、洗掘と本実験では認められなかった埋め戻し過程を交互に繰り返しながら全体的な河床低下を生じた鈴木の結果とは、とくに最大洗掘深の下流での洗掘形状及び洗掘長さに大きな違いが認められる。また、鈴木の実験結果では、粗度変化点直下流の河床がほとんど低下していないのに対して、本実験ではいずれの場合も、最大洗掘深の3～5割程度の河床低下が見られる。これは、ブロックの粗度要素近傍で発生する渦によって砂粒子がpick upされたためと思われる。

3. 2 最大洗掘深の時間的変化

図-8は、最大洗掘深 Z_m の時間変化を、鈴木の方法にならって限界水深 h_c で無次元表示し、鈴木の実験式(破線)と比較したものである。Run 1の場合、 Z_m/h_c は同式と同じく $\sqrt{(g/h_c)} t$ の1/3乗に比例して増加するが、比例定数は0.45よりも小さい。これは、上流部の粗度条件、砂の粒径及び上流からの給砂の有無の違いによるものである。また、平衡状態での最大洗掘深は、Run 1、Run 2ともに限界水深の1.5倍程度であるが、動的洗掘過程(Run 1)では、静的洗掘過程(Run 2)に比較して洗掘の進行が速く、平衡状態に達するまでの時間も短くなっている。

4. 洗掘穴上の流れ特性

図-9は、最大洗掘深が生じた縦断面において、 $t=0, 10$ 及び180分における水面形(破線)、河床形状(一点鎖線)、底面圧力水頭 h_c (○印)及び流速分布をRun 1について示したものである。 $t=0$ では、ブロック下流端におけるイボ要素間の速い様な流速分布が、砂面上を流下するに従って底面より次第に減少し、砂面上の対数分布に遷移している。これは、すでに著者ら³⁾によって明らかにされている滑面から粗面への底面粗度急変流の特性と同じであり、ホロスケアのような並列型の粗度要素を持ったブロックでは、粗度要素間の流れは滑面乱流に似た特性を有する可能性が指摘できる。洗掘が進行しても、最大流速は水面近く

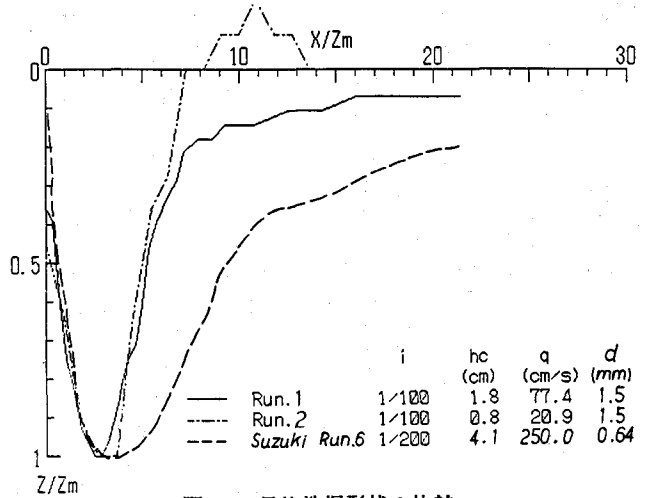


図-7 最終洗掘形状の比較

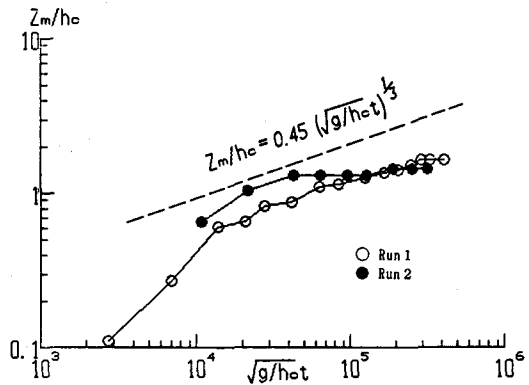


図-8 最大洗掘深の時間的変化

にあって、洗掘穴内の流速は底面付近で減少するが、逆流域は見られない。また、流速分布の曲率 d^2u/dZ^2 は洗掘穴の上流斜面では正であり、下流斜面上では負となる。

底面の圧力水頭は、 $t=0$ 及び 10 分ではほぼ水深に等しく、圧力分布は静水圧分布であるとみなせるが、平衡状態 ($t=180$ 分) では、勾配の急な洗掘穴上流側の斜面において、圧力水頭は水深より明らかに大きくなっており、流線の曲がりの影響を受けていると考えられる。

同様に、せん断力計を用いて測定した各洗掘過程における摩擦速度 U_* の流下方向分布を示せば、図-10 のようである。また、図-11 は、 $X=3$ 、10 及び 40 cm での U_* の時間的変化を示したものである。 U_* は、下流等流部の摩擦速度 U_{*0} で無次元化されており、図中の一点鎖線は、無次元化された砂粒子の限界摩擦速度 U_{*c}/U_{*0} を示している。

初期状態における粗度変化点直下流の摩擦速度は下流等流部の約 2 倍であって、 X の増加とともに徐々に減少している。洗掘の進行過程 ($t=10$ 分) では、 U_* の最大値は $X=5$ cm の地点に現れており、最大洗掘深の生じる位置よりもわずかに上流側にある。最終状態 ($t=180$ 分) では、初期とは逆に U_* は粗度変化点直下流で最小となり、流下方向に増加している。また、 U_* の時間変化は、 $X=3$ cm で最も大きく、通水開始から 30 分で約 1/2 に減少し、1 時間を越えると U_{*c} よりも小さくなる。一方、 X が 30 cm を越えるところでは、 U_* はほとんど時間的に変化していない。

動的平衡状態であれば、摩擦速度は流下方向に一律で全ての点で等しく、 U_{*0} と同じ値になるはずであるが、粗度要素間の大きな掃流力によって上流より供給された砂の多くが、斜面上を転がりながらそのまま停止することなく、 U_{*0} にほぼ等しい値を持つ洗掘穴の下流側斜面まで運ばれるために、洗掘穴の中央付近の掃流力が移動限界以下であっても連続的な移動状態を保ちうるものと思われる。

5. 河床変動の計算と実験結果との比較

洗掘過程における底面せん断力の測定結果を用いて、河床変動の連続式 (1) 式及び実験で得られた各時間の底面せん断力を時間ステップ $\Delta t=1$ 分で線形内挿した値を用いて河床形状を算定し、実験結果 (○印) と比

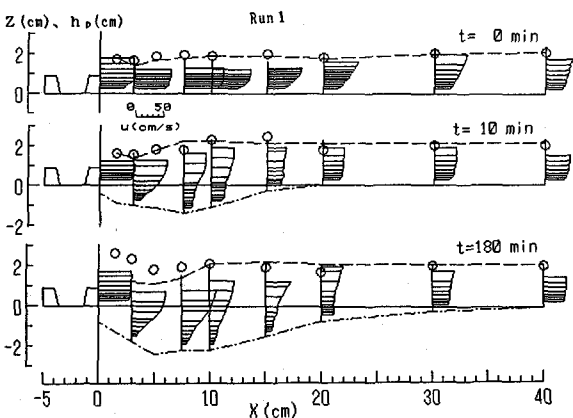


図-9 洗掘の進行過程における底面圧力と流速分布の縦断方向変化

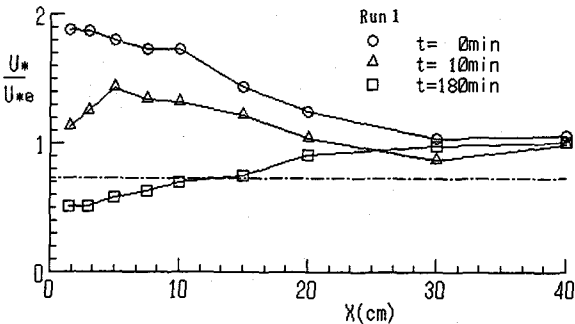


図-10 洗掘の進行過程における底面摩擦速度の縦断方向変化

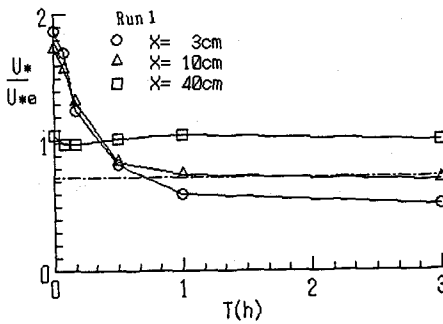


図-11 底面摩擦速度の時間的变化

較したものが図-12である。図中の実線は、流砂量 q_B として芦田・道上³⁾の平衡流砂量 q_{Bo} ((2)式)を用いた場合の、一方、一点鎖線は、椿・斉藤⁴⁾と同様の非平衡流砂量式(3)式を用いた場合の計算結果である。また、上流からの流入流砂量は、いずれの場合も、図-3から $U_* = 6 \text{ cm/s}$ として、(2)式で算定した平衡流砂量を与えている。

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_B}{\partial x} \right) \quad (1)$$

$$\frac{q_{Bo}}{\sqrt{(s g d_n^3)}} = 1.7 \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_*}{\tau_{*c}} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_*}{\tau_{*c}}} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_B}{\partial x} = \frac{1}{L} (q_B - q_{Bo}) \quad (3)$$

ここで、 q_{Bo} は平衡流砂量、 λ は間隙率、 s は砂の水中比重($=\sigma/\rho-1$)、 L はstep lengthであって、ここでは $L=100 d_n$ としている。その他の記号は慣例に従っている。

洗掘初期において、平衡流砂量を用いた場合の計算結果は、ブロック直下流の洗掘量を過大に評価しており、その下流側で実験ではみられない堆積が生じ

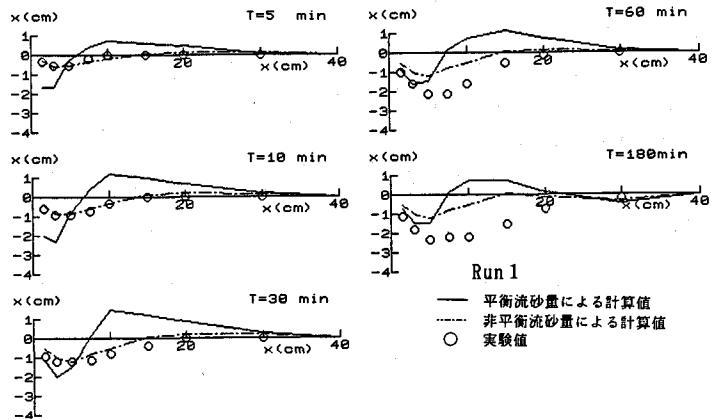


図-12 洗掘形状の計算値と実験値との比較

ているが、(4)式から得られる非平衡流砂量を用いた計算では、河床の変動特性をうまく再現できており、実験結果とも一致している。しかし、時間が経過するとともに洗掘深は減少し、実験結果とは逆の傾向を示すようになる。これは、上述したように、実験では洗掘穴内でせん断力が限界掃流力よりも小さくなるにもかかわらず洗掘が進行するが、計算では実験値をそのまま使い、洗掘形状にかかわらずせん断力が限界掃流力以下まで減少したためであって、砂粒子の運動に対して、底面せん断力の影響だけでなく、洗掘穴内へ流入する粒子の速度及び移動距離、洗掘穴上流斜面の河床勾配、動圧の発生による揚力の効果、及び流れの拡散に伴う粒子の横断方向の運動等を考慮する必要がある。

6. おわりに

護床工下流部の局所洗掘に関して、静的及び動的洗掘の進行過程と洗掘穴内の流れ特性を実験的に明らかにした。今後、さらに、流量・河床勾配・下流水深などの水理条件に対して、系統的に底面せん断力を定式化するとともに、実河川におけるデータとの比較から、護床ブロックの効果及びその安定性に関して検討していきたい。

【参考文献】

- 1) 鈴木幸一・道上正規・川津幸治：床固め直下流部の流れと局所洗掘について：第26回水理講演会論文集 1982, pp. 75-80.
- 2) 神田佳一・村本嘉雄・藤田裕一郎・矢田哲朗：開水路底面粗度急変部における乱れ特性と浮遊砂濃度の遷移過程、京都大学防災研究所年報第32号、1989, pp. 619-639.
- 3) 芦田和男・道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究、土木学会論文報告集、第206号 1972, pp. 59-69.
- 4) 椿東一郎・斉藤隆：流れによるSand waveの発生限界、九大工学集報、第40巻、第5号、1967, pp. 741-748.