

# 水平噴流による洗掘に関する研究

STUDIES ON THE SCOUR FROM SUBMERGED PLANE JET

斎藤 隆\*  
By Takashi SAITOU

## 1. 緒 言

局所洗掘は各断面を通過する移動砂量の場所的変化に起因するものであるが、一般に洗掘の進行に伴って洗掘面に沿う流れが大きく変化し、その変化した流れによって洗掘されていくように、洗掘の進行とそれに伴う流れの変化とが密接に関連するきわめて複雑な現象である。

水平噴流による洗掘は局所洗掘に関する基礎的なもの一つとして古くから研究されているが、理論的なものは意外に少なく、河床砂の連続の式を用いてかなりおおまかに考察を行った Lavrsen の研究<sup>1)</sup>、壁面噴流における境界層の発達を河床変動の式に導入した岩垣<sup>2)</sup>らの研究、および壁面噴流の特性に加えて非平衡状態の流砂関数を用いて考察した土屋の研究<sup>3)</sup>が代表的なものとしてあげられる。これらの理論は平面に沿う噴出流の流れによって洗掘機構を考察した初期洗掘に関するもので、洗掘の進行に伴う流れの変化を考慮した研究はみあたらぬ。

本研究においては、河床変動および砂移動を 16 mm カメラとモータードライブカメラで追跡した洗掘実験ならびに洗掘穴内における流況、流速について詳細な測定を行ったが、水平噴流による洗掘過程特性を記すと以下のようである。ごく初期においては噴出流はほぼ砂面に沿って直進するが、ほぼ瞬間に噴出孔直下流に発生する渦によって洗掘穴の方へ弯曲する。そのため、深さ方向の洗掘が卓越し、洗掘穴の下流側斜面の傾斜は漸次増大していき、弯曲噴流の上下方向の動搖が顕著になる。洗掘穴下流側斜面の傾斜がほぼ水中安息角程度になると弯曲噴流の動搖に対応して洗掘穴下流側斜面の不安定部分が間欠的に崩落し、斜面はほぼ一定勾配を保ちながら洗掘穴下流の砂堆頂を越えて出ていく砂量によって洗掘が進行していくようになる。このように、水平噴流によ

る洗掘は、その洗掘機構から、河床変動量が小さく噴出流がほぼ直進している初期洗掘、弯曲噴流の再接触流によって深さ方向の洗掘が卓越する中期洗掘および洗掘がほぼ相似な形状を保ちながら進行していく後期洗掘に大別することができる。

初期洗掘は前述した研究でかなり明らかにされているので、本文は中期および後期洗掘における現象ならびにその機構の究明を目的とする。そのためには、砂移動に大きく関与する洗掘砂面近傍の流れの性質、すなわち洗掘砂面にそむく壁面せん断力の場所的変化を明らかにすることが必要である。中期および後期洗掘における洗掘面上の流れを単純化すると、床面より最大洗掘深さに比例した高さの位置から噴出する弯曲噴流が床面に衝突した後形成される壁面噴流の流れとみなすことができる。このようにモデル化すると、洗掘砂面に沿う流れの特性が結局最大洗掘深さで与えられるので<sup>5), 6)</sup>、流れの時間的变化は最大洗掘深さの時間的变化によって表現される。

本文においては、洗掘の実験結果とその特性を記述した後、まず非平衡状態の砂移動を取り入れた河床変動の基礎式を導き、噴流特性をくりこんだ流れのモデルおよび中・後期洗掘における流れのはく離と洗掘穴下流側斜面の間欠的崩落のモデルを用い、洗掘過程の解析を行ったものである。また、下流水深の小さい場合には洗掘の途中において、洗掘深、形状および水深との関連で周期的に噴出流の弯曲方向が上向き・下向きに変化する特徴的な現象がみられるので、この現象の発生条件および最大洗掘深さなどに与える影響を実験的に調べ、弯曲噴流の変流条件によって現象の定性的説明を試みた。なお、噴流特性やせん断力については、壁面噴流<sup>4)</sup>、弯曲噴流<sup>5)</sup>および弯曲噴流が壁面に再接触後形成される壁面噴流<sup>6)</sup>に関する著者の研究の結果を用いる。本文では便宜上、報文 I, II, III とよぶこととする。

\* 正会員 山口大学助教授 工学部土木工学科

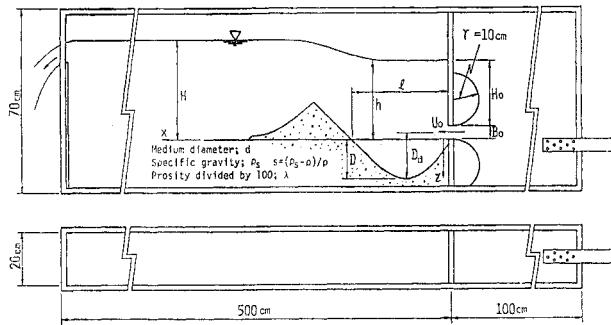


図-1 実験装置および記号説明

## 2. 実験装置と実験方法

実験に用いた水槽は図-1の両面有機ガラス張りの鉄枠製のもので、上端には噴流発生装置を、下流端には水位調節用の可動堰が設置されている。なお、同図には本文で用いる記号の説明を記入してある。

実験砂は粒度加積曲線を図-2に示したほぼ均一な8種類のもので、その特性を図の下方に表示した。ここに $d$ は中央粒径、 $W_0$ および $U_{*co}$ はそれぞれRubeyの式および岩垣の式で計算した沈降速度と限界摩擦速度である。

実験は $d/B_0=0.03, 0.05, 0.10, u_0^2/sgd=15, 60, 200$ の各3通りを標準にし、 $B_0=0.97\sim2.60\text{ cm}$ 、 $u_0=35\sim200\text{ cm/s}$ と変えて $d/B_0=0.014\sim0.435$ 、 $u_0^2/sgd=13\sim230$ の範囲で行った。

洗掘形状および最大洗掘深さの時間的変化はモータードライブを装着した35mmカメラで水槽の側面より撮影し、実寸の1/2の大きさに投影して読みとした。初期および中期洗掘では1/4秒間隔で連続撮影し、以後は対数目盛上で同間隔となる時間間隔で撮影した。後期洗掘では洗掘穴下流側斜面の間欠的崩落ため、洗掘形状の変化が大きいので、1~3秒間隔で撮影した写真4~6枚から決めた平均形状を洗掘形状とした。

代表的な実験においては、洗掘穴内における流れと砂移動との関連を把握するために、噴出孔より間欠的に色素を流して8mmカメラで撮影した。

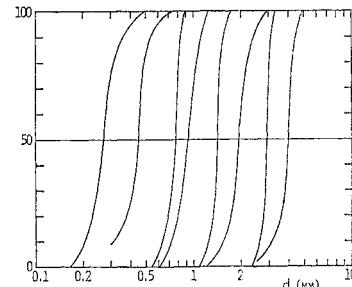
洗掘がほとんどみられなくなった状態(実験時間30分~4時間)での洗掘穴内、および石膏で作製した洗掘穴(図-3(b)に実線で示した形状)内における

流速分布を内径1.8mm、外径2.2mmのステンレス管で製作したピトー管で詳細に測定した。なお、ピトー管の方向は上流から色素を流して流れの方向に一致させている。

## 3. 実験結果とその考察

### (1) 洗掘形状

洗掘形状を規定する無次元量は次式のように表



$d$ (cm)	0.027	0.045	0.077	0.092	0.141	0.192	0.290	0.395	0.435
$W_0$ (cm/s)	3.59	5.52	8.33	9.33	12.3	14.4	18.2	19.9	21.3
$\sqrt{sgd}$ (cm/s)	6.81	8.53	11.2	12.2	15.1	17.6	23.6	25.3	26.1
$U_{*co}$ (cm/s)	1.56	1.72	2.06	2.25	2.92	3.02	4.85	5.65	5.88

図-2 実験砂の粒度加積曲線

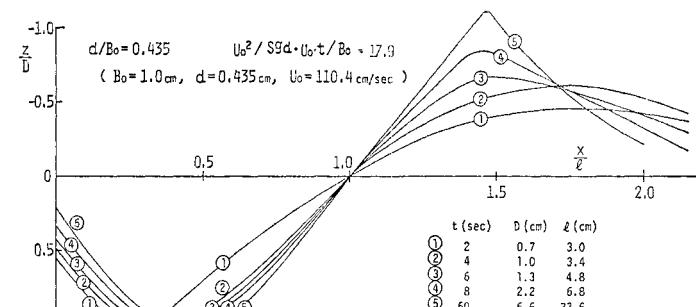


図-3(a) 初期および中期洗掘形状

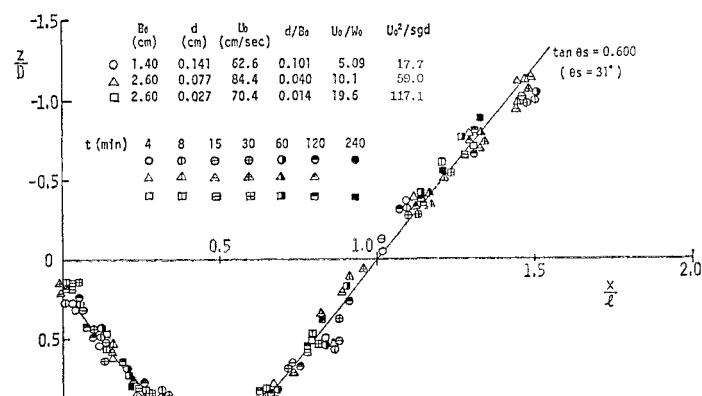


図-3(b) 後期洗掘形状

わされよう。

$$\frac{z}{B_0} = f_1 \left( \frac{x}{B_0}, \frac{u_0 t}{B_0}, \frac{u_0^2}{sgd}, \frac{\sqrt{sgd} \cdot d}{\nu}, \frac{d}{B_0}, \frac{H}{B_0}, s \right)$$

下流水深  $H/B_0$  の影響は後に検討することにして、式中の各無次元量について検討していく。

洗掘形状  $z=f(x)$  を最大洗掘深さ  $D$  および洗掘穴の長さ  $l$  で無次元化して描いたのが図-3である。図-3(b)の後期洗掘では洗掘形状はこの無次元表示によって統一的に表わすことができ、洗掘穴下流側斜面の水平となす角度は  $d/B_0$ ,  $u_0^2/sgd$  などに関係なく約  $31^\circ$  である。図-3(a)に一例を示した初期および中期洗掘における洗掘形状をみると、洗掘穴での最大洗掘深断面の相対的位置が時間的に下流に移動したり、 $u_0^2/sgd$  や  $d/B_0$  によって複雑に変化するなどのため、形状を統一的に表示することは困難である。

洗掘形状の無次元化に用いた  $D$  と  $l$  の関係を描いたのが図-4である。 $D/B_0 < 2$  の範囲では  $l/B_0$  は粗度表示  $d/B_0$  の影響をも受け、 $d/B_0$  が大きいほど  $l/B_0$  は大

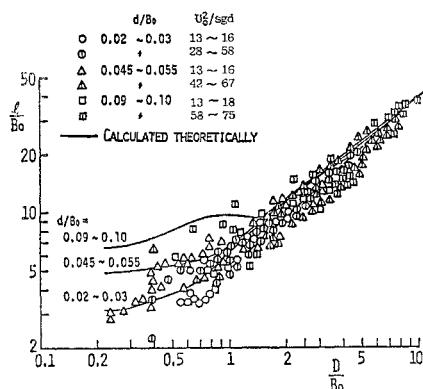


図-4 最大洗掘深さ  $D/B_0$  と洗掘長  $l/B_0$  の関係

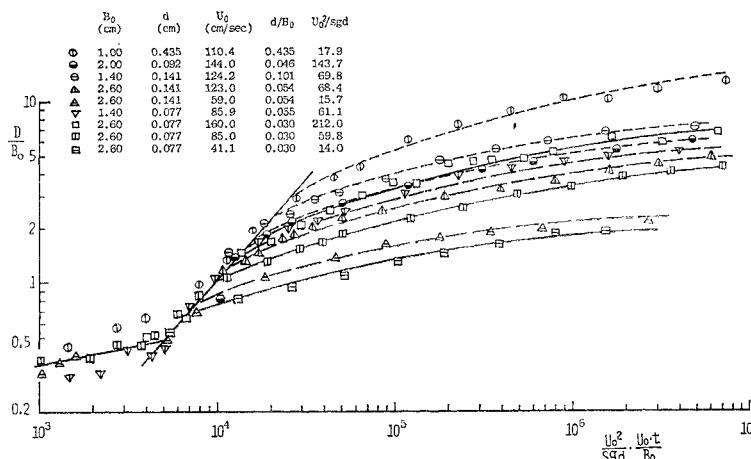


図-5 最大洗掘深さの時間的変化

きい値をとる。 $D/B_0 > 2$  になると、実験条件に無関係に  $l/B_0$  は  $D/B_0$  とはほぼ比例関係にある。したがって、後期洗掘における洗掘形状は一つの基準長で統一的に表示される。なお、図中の曲線は後述する洗掘計算の結果である。

## (2) 最大洗掘深さの時間的変化

前述したように、後期洗掘における洗掘形状は相似的な形状として無次元表示できることがわかったので、洗掘深さの時間的変化を考察するにあたっては最大洗掘深さについて検討する。砂粒の水中比重  $s$  の変化は小さく、また、実験で  $\sqrt{sgd} \cdot d/\nu$  は洗掘にほとんど影響しないので、これらを無視し、下流水深が十分深い ( $H/B_0 \rightarrow \infty$ ) 場合には式(1)は次のように書きかえることができる。

$$\frac{D}{B_0} = f_2 \left( \frac{u_0^2}{sgd}, \frac{d}{B_0}, \frac{u_0 t}{B_0} \right)$$

後述する河床変動の式によると、洗掘の進行は無次元時間  $\tau = (u_0^2/sgd)^{m-1/2} \cdot u_0 t / B_0$  で規定される。洗掘は掃流によるものとみられるので、指数型流砂公式の指数  $m=3/2$  において、最大洗掘深さの時間的変化を示したもののが図-5である。 $\tau = 0.5 \times 10^3$ ,  $D/B_0 = 0.5$ , ならびに  $\tau = 0.7 \sim 2 \times 10^4$ ,  $D/B_0 = 1 \sim 2$  で実験描点の傾向が異なり、それぞれが初期ならびに中期洗掘の限界である。

## (3) 洗掘穴内における流況

石膏面にほぼ均一な砂をペイントで張付けた後期洗掘穴(図-3(b)の実線)内で測定した流速分布から作成した等流速線図の一例が図-6である。図中の  $x_R$ ,  $x_s$ ,  $x_d$  は、報文 II, III で報告した弯曲噴流および弯曲噴流による壁面噴流の特性に関する結果を用い、段落高さが最大洗掘深さであるとして計算した再接触位置、加速流域および定速流域の境界位置である。再接触後洗掘砂面にそって境界層が発達していくが、境界層外縁流速の変化の状態から、図-10に概況を示してある弯曲噴流による壁面噴流と同様に、加速流域、定速流域および減速流域に分けることができる。図のように各領域の境界位置を対応させると洗掘砂面にそつ流れの各領域は最大洗掘深さの段落境界面にそつて形成される弯曲噴流による壁面噴流の各領域の範囲にはほぼ一致している。

境界層外縁流速があまり変化しない定速流域における最大流速

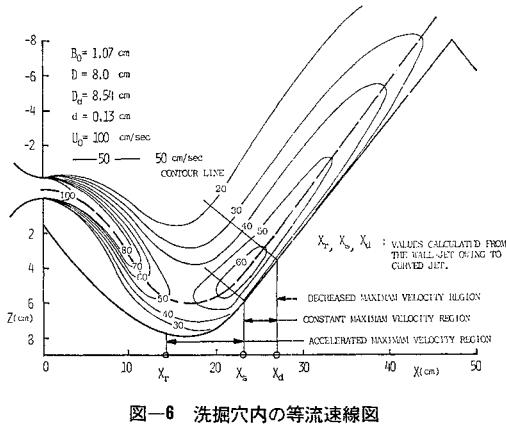
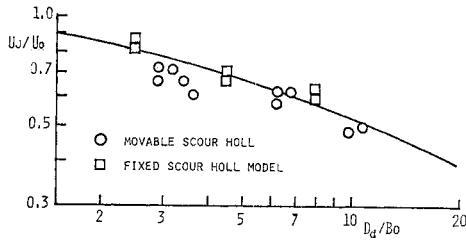


図-6 洗掘穴内の等流速線図

図-7 定流速域における境界層外縁流速  $u_j/u_0$  と  $D_d/B_0$  との関係

$U_j$  と噴出流速  $U_0$  の比を噴出孔中心から測った段落高さ  $D_d/B_0$  ( $D_d=D+0.5B_0$ ) に対して図示したものが図-7 である。描点口は石膏製砂張りの洗掘穴で、描点は終極状態に近いときの洗掘穴内で測定したものである。また、図中の曲線は次式で与えられる段落固定床(報文 III)による結果である。

$$\frac{u_j}{u_0} = \sqrt{3.5 / \left( \frac{D_d}{B_0} + 3.0 \right)}, \quad \frac{D_d}{B_0} = \frac{D}{B_0} + \frac{1}{2} \quad (3)$$

#### 4. 河床変動の基礎式

非平衡状態の砂移動の考え方を河床変動の基礎式に導入することはほぼ同時に著者<sup>2)</sup>らと土屋<sup>3)</sup>とによってそれぞれ独立に sand wave の発生限界の問題、洗掘の問題に対して適用された。両者と同様に Einstein の砂移動モデルに基づいて誘導した非平衡状態での流砂関数の概要を述べ、河床変動について考察する。

砂粒の移動確率  $P$  および平均移動距離  $L$  は砂粒の性質および流れの場によって規定される。したがって、平衡状態および非平衡状態における流砂量をそれぞれ  $q_{B_0}$ ,  $q_B$  とすると、河床表面の単位面積から単位時間に運動状態に入る砂量は  $q_{B_0}/L$ 、移動から停止にかわる砂量は  $q_B/L$  であるから、無次元表示  $\phi_0 = q_{B_0}/\sqrt{sgd^3}$ ,  $\phi = q_B/\sqrt{sgd^3}$  を導入して、砂粒の連続条件は次式で与えられ

る。

$$\frac{\partial \phi}{\partial \xi} = \frac{B_0}{L} (\phi_0 - \phi), \quad \xi = \frac{x}{B_0} \quad (4)$$

上式を  $\xi=0$  で  $\phi=\phi_1=(q_B/\sqrt{sgd^3})_{\xi=0}$  なる条件で積分すると次式となる。

$$\phi - \phi_1 = \exp \left( - \int \frac{B_0}{L} d\xi \right) \int_0^\xi \frac{B_0}{L} \phi_0 \exp \left( \int \frac{B_0}{L} d\xi \right) d\xi \quad (5)$$

Einstein<sup>8)</sup>は平衡状態の流砂関数の式を導いているが、式形が複雑であるので、ここでは河床勾配  $\theta$  による修正<sup>9)</sup>を施した次式を用いる。

$$\phi_0 = K \left( \frac{u_*^2}{sgd} \frac{1}{\sin \theta + \mu \cos \theta} \right)^m \left( 1 - \frac{u_* c_0^2}{u_*^2} \right) \quad (6)$$

ここに、 $\mu$  は砂粒間の摩擦係数、 $u_*$  は摩擦速度である。なお、式(4), (5)の  $L$  について、Einstein は次式を与えており。

$$L = \lambda_1 d / (1 - P) = \lambda_1 d (1 + \phi_0 / A_*) \quad (7)$$

ここに、 $\lambda_1$  および  $A_*$  は実験によって決められる常数で、Einstein によると  $\lambda_1=100$ ,  $A_*=1/43.5$  である。

#### 河床変動の基礎式

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{1}{1-\lambda} \frac{\partial q_B}{\partial x} \quad (8)$$

に式(4)～(6)を代入して無次元化すると次式となる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \tau} = \frac{K}{1-\lambda} \frac{d}{L} \left\{ \phi_{0*} - \phi_{1*} - \exp \left( - \int \frac{B_0}{L} d\xi \right) \int_0^\xi \frac{B_0}{L} \phi_{0*} \exp \left( \int \frac{B_0}{L} d\xi \right) d\xi \right\} \quad (9)$$

ここに、 $u_m$  は断面内最大流速(境界層外縁流速)

$$\left. \begin{aligned} \tau &= \left( \frac{u_0^2}{sgd} \right)^{m-1/2} \frac{u_0 t}{B_0}, \quad \zeta = \frac{z}{B_0} \\ \phi_{0*} &= \left\{ \left( \frac{u_*}{u_m} \right)^2 \left( \frac{u_m}{u_0} \right)^2 \frac{1}{\sin \theta + \mu \cos \theta} \right\}^m \\ \phi_{1*} &= \left\{ 1 - \frac{u_* c_0^2}{sgd} \left( \frac{u_m}{u_*} \right)^2 \left( \frac{u_0}{u_m} \right)^2 \left( \frac{sgd}{u_0} \right)^2 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

着色砂の実験<sup>10)</sup>によると、 $L$  の式における分母  $(1-P)$  は  $P$  の影響を過大に評価しており、むしろ  $L=\lambda_1 d$  の方が適当とされているので、簡単に  $L=\lambda_1 d$  とおくと、上流からの移動砂量がない場合( $\phi_1=0$ )には上式は次式となる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \tau} = \frac{K}{\lambda_1 (1-\lambda)} \left\{ \phi_{0*} - \frac{\lambda_1 d}{B_0} \exp(-\xi) \int_0^\xi \phi_{0*} \exp(\xi) d\xi \right\} \quad (11)$$

なお、式(7)の  $L$  を用いると、式(9)は次式となる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \tau} = \frac{K}{\lambda_1 (1-\lambda)} \left\{ \phi_{0*} - \frac{\lambda_1 d}{B_0} \exp \left( - \int \frac{d\xi}{1+\phi_0/A_*} \right) \int_0^\xi \frac{\phi_{0*}}{1+\phi_0/A_*} \cdot \exp \left( \int \frac{d\xi}{1+\phi_0/A_*} \right) d\xi \right\} \quad (12)$$

.....(12)

以上のことから、洗掘砂面にそろ  $u_*/u_m$  および  $u_m/u_0$  の分布がわかれば、式 (11) の  $\phi_{0*}$  が  $\eta$  の関数として計算され、式 (9) あるいは式 (11) によって各瞬間における河床変動速度  $\partial\zeta/\partial t$  が求められ、洗掘の進行を時間的に追跡していくことができる。したがって、洗掘の解析には洗掘面上における  $u_*/u_m$  および  $u_m/u_0$  の分布を適切に表示する必要で、そのために前述の実験結果と壁面噴流に関する知見に基づいて次のように流れをモデル化する。

## 5. 流れおよび砂移動のモデル化

洗掘穴内における流れおよび砂移動を各期ごとにモデル化し、それによる洗掘の解析方法について考察する。

### (1) 初期洗掘

河床変動量がごく小さく噴出流はほぼ砂面に沿って直進しているので、この時期における流れは粗壁面に沿って噴出した壁面噴流とみなせる。

壁面噴流は最大流速が一定である流れの形成領域と最大流速が  $\sqrt{x}$  に逆比例して減少していく流れの確立領域とに分けられる。報文 (I) により、噴出孔より両領域の境界までの距離  $x_E$  は噴出孔上端からの速度不連続面の拡散と噴出孔下端からの境界層の発達とによって決まり、Manning-Strickler の抵抗則を用いて次式のように与えられる（報文 (I) の式 (10)）。

$$\frac{x_E}{B_0} / \left\{ 1 - 0.248 \frac{x_E}{B_0} \left( \frac{d}{B_0} \right)^{1/4} \right\} = 14.44 \dots \dots \dots (13)$$

$x \leq x_E$  における摩擦速度は次式のとおりである。

$$\left( \frac{u_*}{u_m} \right)^2 = 0.00785 \left( \frac{d}{x} \right)^{5/12} \dots \dots \dots (14)$$

次に、 $x \geq x_E$  における最大流速の低減は次式で与えられる。

$$\frac{u_m}{u_0} = \left( \frac{x_E + x_0}{x + x_0} \right)^{1/2}, \quad \frac{x_0}{B_0} = 4.43$$

さらに、主流部流れの乱れを考慮した境界層速度分布則で計算した流れの確立領域における局所抵抗係数（報文 (I) 5章 図-17）を計算の簡略化のために実験式化すると次式となる。

$$\left( \frac{u_*}{u_m} \right)^2 = \frac{1}{2} \left\{ 0.0128 + 0.103 \left( \frac{d}{B_0} \right)^{1/2} \right\} \\ \left( \frac{x}{B_0} \right)^{-[0.237 + 0.15 \cdot \exp(-100d/B_0)]} \dots \dots \dots (16)$$

$x \leq x_E$  では式 (15) の代りに  $u_m/u_0=1$  と式 (14) を、 $x \geq x_E$  では式 (15) の  $x_E$  に式 (13) を代入したもののと式 (16) を式 (11) の右辺に代入して積分すると各断面における河床の変動速度が得られる。初期洗掘にお

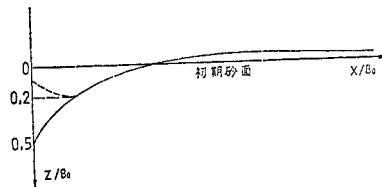


図-8 初期洗掘計算の説明図

いては  $u_*/u_m$  および  $u_m/u_0$  は時間と無関係に与えられているので、洗掘穴の長さ  $l$  は一定であり、河床変動量は時間に比例して増大していく。この計算による初期洗掘形状は図-8 に実線で示すように  $x=0$  において最大の洗掘深さを与えるが、実際には瞬間に噴出孔直下流に発生する Roller によって  $x=0$  付近は埋めもどされて図の点線のような形状である。このように、Roller が噴出孔近くの砂移動に大きく影響しているが、8 mm カメラで撮影したものを参考にして、噴出孔断面 ( $x=0$ ) における洗掘深さの計算値が  $(z/B_0)_{cal}=0.5$  となる洗掘形状を計算し、逆流による埋めもどしを考慮して図-8 の破線のように  $x=0$  付近での洗掘深さは一定値  $z/B_0=0.2$  とし、それより下流の洗掘形状は計算した形状とする。以後、次に述べる中期洗掘における流れを用いて河床変動を計算していく。この場合、中期洗掘と異なるのは洗掘穴下流斜面での流れのはく離がないことである。

### (2) 中期および後期洗掘

すでに 2. (3) で述べたように、中期および後期洗掘における洗掘面にそろ流れは図-9 に概略を示すように、弯曲噴流が最大洗掘深さの位置にある段落境界面に再接觸して、その下流に形成される壁面噴流の流れで近似することができる。

弯曲噴流による壁面噴流流れの概要は図-10 のとおりで、報文 (II), (III) より各領域の境界位置や境界層外縁流速などの洗掘に必要な諸量について簡単に説明する。

#### a) 再接觸位置 $x_R$

弯曲噴流が境界面に再接觸する  $x$  座標  $x_R$  は噴出流の拡散、曲率および段落高さに規定されるが、終局的には  $x_R/D$  は  $D/B_0$  のみで表示され、両者の関係  $x_R/D =$

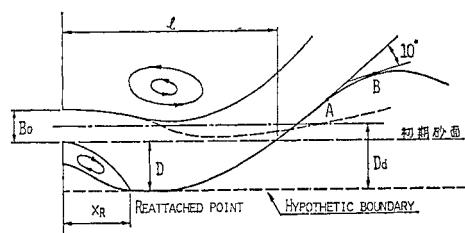


図-9 中期洗掘計算の説明図

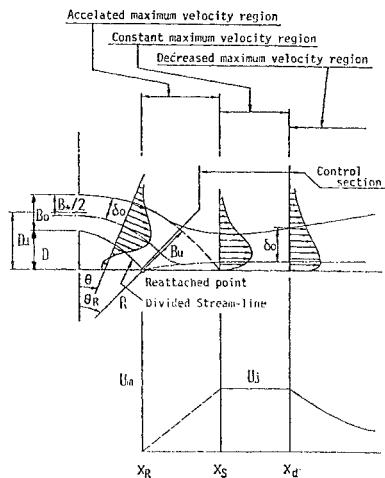


図-10 弯曲噴流による壁面噴流の流況と境界層外縁流速の変化

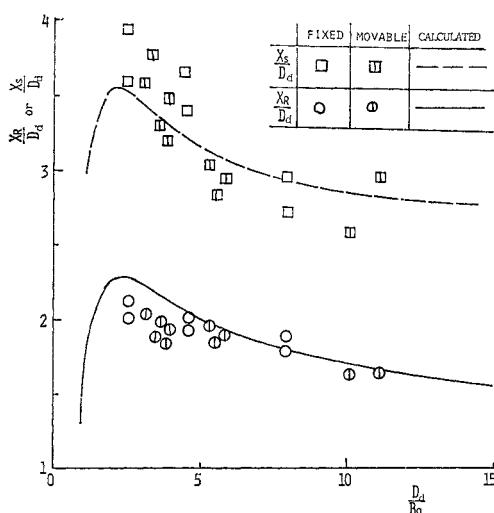


図-11 再接位置 \$x\_R/D\$, 加速流域と定速流域の境界位置 \$x\_s/D\$ と \$D/B\_0\$ の関係

\$f(D/B\_0)\$ は図-11 (報文 III, Fig. 13) に示すとおりである。

b) 加速流域 \$x\_R \leq x \leq x\_s\$

再接触後、壁面近傍における流れが加速されるのは壁面に垂直方向の速度成分による流れの縮流する結果によるものであることより、再接触点における \$1/10\$ 最大流速点より再接触角 \$\theta\_R\$ で延長した直線が境界と交差する位置を加速域の境界位置として求めた結果が図-11 の破線である。図中の描点は洗掘実験および固定洗掘穴内で測定した流速分布から求めたものである。

加速流域における境界層外縁流速の変化は \$x=x\_R\$ で \$u\_m/u\_0=0\$、\$x=x\_s\$ で \$u\_m/u\_0\$ が式(3)に帰着することから簡単に次式の直線分布を仮定する (報文 III 境界層の発達)。

$$\frac{u_m}{u_0} = \sqrt{3.5 / \left( \frac{D}{B_0} + 3.5 \right)} \frac{x - x_R}{x_s - x_R} \quad \dots\dots\dots (17)$$

c) 定速流域 \$x\_s \leq x \leq x\_d\$

定速流域と減速流域との境界位置は後述の減速流域の最大流速の遞減式 (19) の \$u\_m/u\_0\$ が定速流域における式(3)の \$u\_m/u\_0\$ と一致する位置として次式で与えられる。

$$\frac{x_d}{B_0} = 4.4 (K_{u1} \cdot K_{u2})^2 \left( \frac{D}{B_0} + 3.5 \right) - 5.9 \quad \dots\dots\dots (18)$$

d) 減速流域 \$x\_d \leq x\$

滑面水平壁面噴流における最大流速の遞減式

$$\left( \frac{u_m}{u_0} \right)_{H.S.} = \sqrt{15.4 / \left( \frac{x}{B_0} + 5.9 \right)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

を基準とし、粗・滑段落境界面で行った測定結果から、段落高さ \$D/B\_0\$、粗度表示 \$d/B\_0\$ の影響を表わす係数 \$K\_{u1}\$、\$K\_{u2}\$ を導入した結果が次式である (報文 III、式(21), (22))。

$$\frac{u_m}{u_0} = K_{u1} \cdot K_{u2} \sqrt{15.4 / \left( \frac{x}{B_0} + 5.9 \right)} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$K_{u1} = \left\{ 2.4 / \left( \frac{D}{B_0} + 1.9 \right)^{1/8} \right\}$$

$$K_{u2} = \left\{ 0.176 \log_{10} \left( \frac{D}{B_0} \right) + 0.553 \left( \frac{d}{B_0} \right)^2 / 4 \left( \left( \frac{d}{B_0} \right)^2 + 0.005 \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (21)$$

以上の実験式で与えられる定速流域、減速流域における

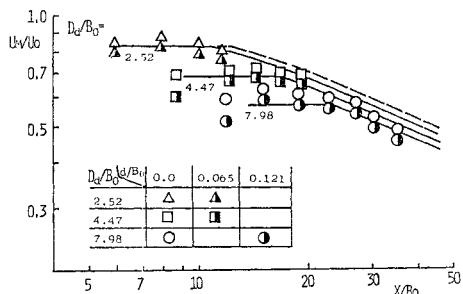


図-12 弯曲噴流による壁面噴流および洗掘砂面における境界層外縁流速の変化

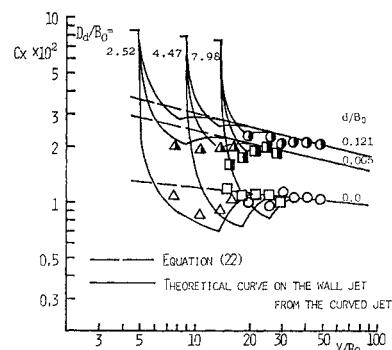


図-13 弯曲噴流による壁面噴流および洗掘砂面上の局所抵抗係数

る最大流速の変化と固定洗掘穴内で測定した結果を比較したもののが 図-12 である。

図-13 は再接触噴流による壁面噴流の局所抵抗係数で、実曲線は報文(Ⅲ)の方法で解析した結果である。計算の簡略化のために再接触点より下流の局所抵抗係数の分布を図中の破線で与えると、摩擦速度の分布は次式となる。

$$\left(\frac{u_*}{u_m}\right)^2 = \frac{1}{2} \left\{ 0.0145 + 0.103 \left( \frac{d}{B_0} \right)^{1/2} \right\}$$

$$\left( \frac{x}{B_0} \right)^{-\{0.237+0.15+\exp(-100d/B_0)\}} \quad \dots \dots (22)$$

### (3) 中期および後期洗掘における洗掘計算法

洗掘砂面にそろ  $u_m/u_0$  が式(3), (20)で、 $u_*/u_m$  が式(22)で与えられたので、式(10)で計算した  $\phi_{0*}$  を式(11)に代入して積分すると、各瞬間ににおける河床変動速度の場所的分布が求められ、洗掘を時間的に追跡することができる。前述したように、中期洗掘では洗掘穴下流側斜面で流れがはく離しており、後期洗掘では洗掘穴下流側斜面が間欠的に崩落しているので、これらを河床変動の計算に次のように導入する。

中期洗掘：拡大流れにおいて拡大角が  $7^\circ \sim 10^\circ$  で流れがはく離することが知られている。また、はく離の下流で砂粒が巻きあげられているので、時刻  $\tau$  における洗掘砂面の最大傾斜点（図-9 の A 点、 $x=x_A$ ）からその傾斜角より  $10^\circ$  緩い点（図-9 の B 点、 $x=x_B$ ）までの間における  $\phi_0/L$  ( $x$  地点から動き出す砂量) を次のようにおく。

$$\begin{aligned} \frac{\phi_0}{L} &= \left( \frac{\phi_0}{L} \right)_{x=x_A} \frac{x_B - x}{x_B - x_A} \quad \text{for } x_A \leq x \leq x_B \\ \phi_0/L &= 0 \quad \text{for } x \leq x_B \end{aligned} \quad \dots \dots (23)$$

$x_R \leq x \leq x_A$  では前節のモデル流れで与えられる  $\phi_0$  を、 $x \geq x_A$  では上式の  $\phi_0$  を式(12)の右辺に代入して積分すると、河床変動速度  $\partial \zeta / \partial \tau$  の場所的变化が得られ、次の  $4\tau$  時間の河床変動量が求められる。この場合、 $\xi_B = x_B/B_0$  より下流の堆積速度は、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial \tau} = -\frac{K}{1-\lambda} \frac{d}{B_0} \exp(-\xi) \int_0^{\xi_B} \phi_{0*} \exp(\xi) d\xi$$

$$\text{for } \xi \geq \xi_B \quad \dots \dots (24)$$

となり、 $\xi_B$  より下流の堆積量は指数関数で減少していく。

後期洗掘：中期洗掘が進行して洗掘穴下流側斜面にはほぼ水中安息角程度の勾配部分が現われると、この部分で流れがはく離し掃流されてきた砂がその下流砂面に堆積して不安定な斜面を形成するようになる。この不安定部分が噴出流の動搖によって間欠的に洗掘穴に崩落し、洗掘穴下流側斜面は平均的には水中安息角程度の勾配を

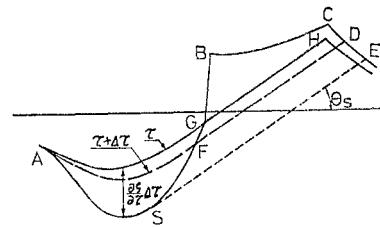


図-14 後期洗掘計算の説明図

として洗掘が進行する。この崩落現象を次のようにして河床変動へ導入した。すなわち、

(i) 前節で説明した流れのモデルで時刻  $\tau$  における洗掘砂面（図-14 の A GH 曲線）上の  $u_m/u_0$ ,  $u_*/u_0$  を求める。

(ii) (i) の結果を式(12)に代入し、再接触点（図-14 の A 点、A 点より上流側の河床変動は無視する）より積分して河床変動速度  $\partial \zeta / \partial \tau$  を  $\partial \zeta / \partial \tau = 0$  となる断面（図-14 の G 点）まで計算していく。

(iii) 図-14 の G 点で流れがはく離するとして、G 点より下流 ( $\xi \geq \xi_G = x_G/B_0$ ) では  $\phi_0/L = 0$  とおき、式(12)の右辺の積分上限  $\xi_B$  を  $\xi_G$  と書きかえて堆積量を計算する。

(iv) (i)～(iii) の計算による  $4\tau$  時間後の形状は図-14 の ASBCDE 曲線となり、斜面傾斜角が水中安息角より急になる S 点より下流の斜面は不安定な斜面である。

(v) 斜面傾斜角が水中安息角  $\theta_S$  である S 点から接線 SE を描き、容積 SBCE を求める。

(vi) AS 間では洗掘深さ  $\partial \zeta / \partial \tau \cdot 4\tau$  に比例して埋めもどされ、S 断面より下流では  $\theta_S$  なる一定勾配の斜面である AFD 曲面を仮定し、容積 ASEDF を求める。

(vii) 容積 SGBCE = 容積 ASEDF (容積 ASF = 容積 FBCD) となる曲線 AFD を試算で求める。

以上の計算で得られた曲線 AFD が時刻  $\tau + 4\tau$  における洗掘形状である。

## 6. 数値的検討

最大洗掘深さの時間的変化、最大洗掘深さと洗掘長の関係および洗掘形状を上述の解析モデルで数値的に検討する。

式中の砂の特性値としては全実験砂の平均値である水中比重  $s=1.65$ 、空隙率  $\lambda=0.4$ 、水中安息角  $\theta_S=31^\circ$  を用い、砂粒間の摩擦係数を  $\mu=1.0^{(3)}$  とする。洗掘穴内の砂の移動は掃流形式であるから  $m=1.5$  とおき、移動砂量強度を規定する係数  $K=4 \sim 20^{(1)}$  と、砂粒の平均移動距離を与える  $\lambda_1=80 \sim 300^{(2)}$  と検討の余地があるが、著者らが、Sand wave の発生限界の検討で用いた

$\lambda_1=100$  と、境界層流れが主流部の影響を受けていることを考慮して  $K=30$  とおくことにする。以上の諸数値を用い、式(11)で洗掘を追跡した結果は次のとおりである。

$D/B_0 \sim l/B_0$  (図-4)：初期・中期洗掘では実験値・計算値とも  $d/B_0$  が大きいほど  $l/B_0$  が大きくなっているが、後期洗掘では両者の値はともに  $d/B_0$  に関係なく、ほぼ一直線となっている。これは、初期・中期における洗掘形状が移動砂量の相対的な場所的分布によって決まるのに対し、後期洗掘においては洗掘穴下流側斜面が一定勾配に保たれるためである。なお、 $u_0^2/sgd$  が関係しないのもこのためである。

後期洗掘形状(図-15)：噴出孔直下流の洗掘面上に形成される Roller の逆流による洗掘を考慮していないため、噴出孔より最大洗掘深断面までの計算による洗掘深さは実験値よりかなり小さいが、計算による洗掘穴下流側斜面の形状は実験結果とよく一致していて、噴出流の動搖に伴う斜面の間欠的崩落が洗掘形状に大きく関与していることが明らかである。

最大洗掘深さの時間的变化(図-16)：最大洗掘深さ  $D/B_0$  は  $d/B_0$ 、 $u_0^2/sgd$  を parameter として無次元時間  $\tau=u_0^2/sgd \cdot u_0 t/B_0$  で規定され、計算値と実験値とはよく一致している。 $u_0^2/sgd$  が大きいほど  $D/B_0$  が大きいことは、 $u_0^2/sgd$  が大きいほど移動砂量が大きいことから予測されるとおりであるが、 $d/B_0$  が大きいほど  $D/B_0$  が大きくなることは、 $u_m/u_0$  の減少よりも  $u_*/u_m$  の増加が大きくて、結果的に  $u_*^2/sgd=u_0^2/sgd \cdot (u_*/u_m)^2(u_m/u_0)^2$  が大きくなるからである。すなわち河床砂が大きくなると最大流速は小さくなるが、それ以上に壁面せん断力が大きくなって、無次元掃流力が大きくなるからである。

以上のように計算結果は実験結果とかなり量的にもよく一致していて、中期・後期洗掘にお

ける噴出流の洗掘穴方への弯曲が洗掘の進行に重要な役割をもっていることが明らかである。

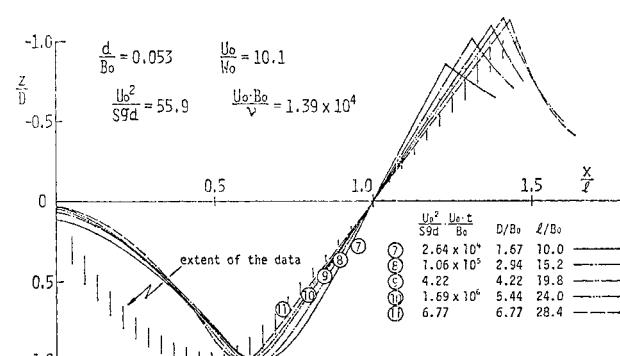
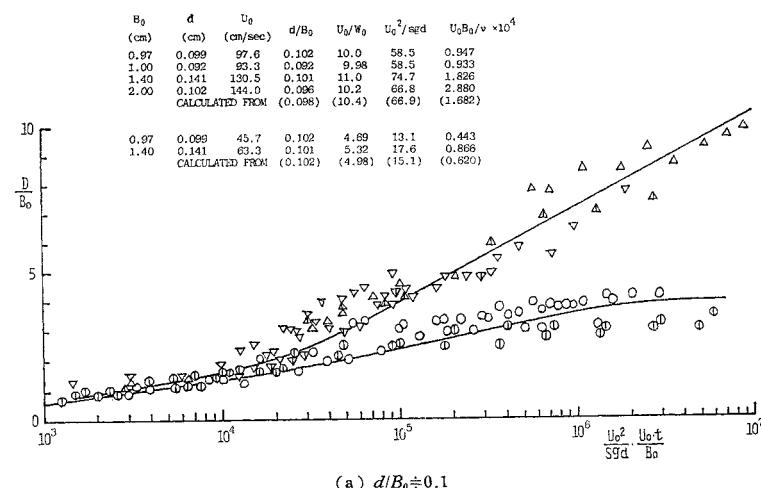
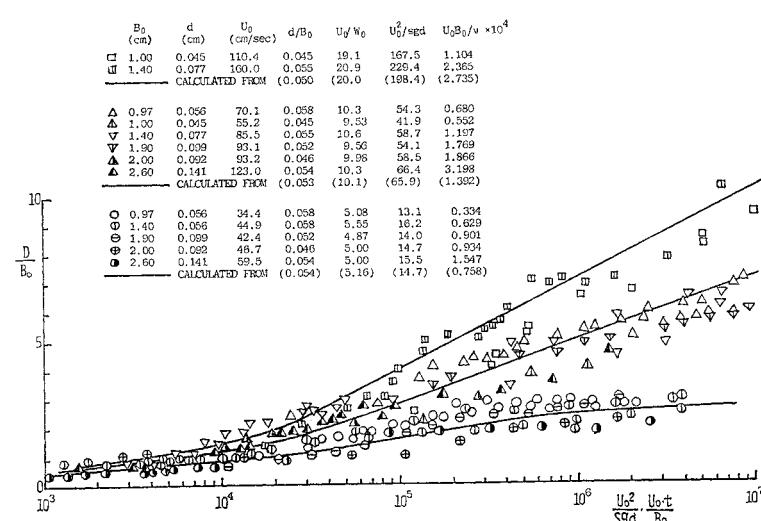


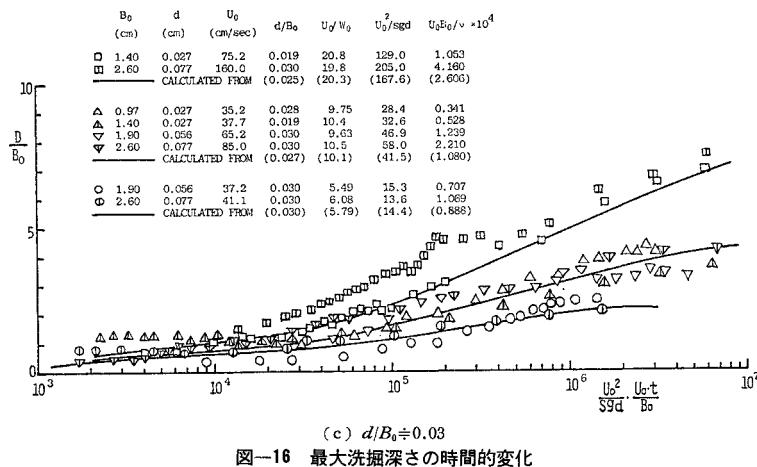
図-15 後期洗掘形状に関する計算結果と実験結果との比較



(a)  $d/B_0=0.1$



(b)  $d/B_0=0.05$



## 7. 間欠的洗掘に関する実験

下流水深が浅い場合には、洗掘の途中で噴出流が下流水深、洗掘深さおよび洗掘形状との関連で交互に上向き、下向き流れに変わり、洗掘と埋めもどしが間欠的に繰返される現象がみられる。この現象を間欠的洗掘とよび、その発生条件および最大洗掘深さに与える影響などを実験的に調べ、弯曲噴流の変流機構に関する知見や現象論的考察を行った。

### (1) 洗掘形状

洗掘の状態から埋めもどしに変わる直前（点線・洗掘状態の形状）および埋めもどしの状態から洗掘が始まる直前（実線・埋めもどし状態の形状）の洗掘形状の一例が図-17である。埋めもどし状態の洗掘形状は、最大洗掘深さの増加に対して洗掘穴の長さの増加が大きく、洗掘形状を無次元形で表示することは困難であるが、洗掘状態の形状は水深が十分大きい場合のものと同様であって、洗掘状態の最大洗掘深さ、洗掘長を  $D_e$ 、 $l_e$  とする

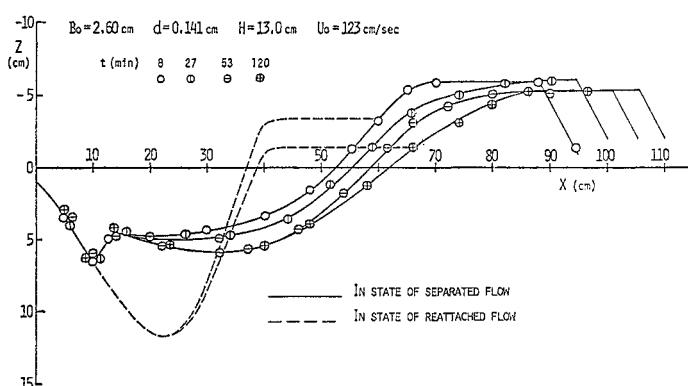


図-17 間欠的洗掘における洗掘形状

ると、 $l_e/B_0 \sim D_e/B_0$ 、洗掘形状における  $z/D_e \sim x/l_e$  との間に図-3,4 の関係がある。

### (2) 間欠的洗掘の発生限界

初めて下向きの噴出流による洗掘状態から噴出流が上向きの流れに変わり洗掘穴が埋めもどされていく直前の最大洗掘深さ  $D_e$ （上向き矢印付描点）、および次に再び噴出流が下向きに変わり急激な洗掘が始まる直前の最大洗掘深さ  $D_u$ （下向き矢印付描点）と下流水深との関係を

描いたのが図-18である。最大洗掘深さの時間的変化は次のとおりである。すなわち、実験開始より最大洗掘深さは図-18のA点からB点まで増加していく。最大洗掘深さがB点に達すると噴出流が下向きから上向きの流れに変わり洗掘面上に形成される Roller の逆流で埋めもどされていく。埋めもどしによって最大洗掘深さがC点になると噴出流が再び下向きの流れに変わって急激な深さ方向に卓越した洗掘が行われる。以後、DEFと噴出流の弯曲方向の変化に対応して最大洗掘深さが変わっていく。図中の斜線部分は段落境界に再接触する弯曲噴流の変流限界に関する実験描点の範囲で曲線は報文(II)の計算値である。図-16の洗掘形状から予測されるように上向き流れ(Separated flow)から下向き流れ(Reattached flow)へ変わるとときの  $H/B_0$  と  $D_u/B_0$  の関係は段落界面と洗掘面とあまり違わず、間欠的洗掘の繰返しによってその関係は固定床の結果に漸近していく。一方、噴出流が下向きから上向きの流れに変わるとときの  $H/B_0$  と  $D_e/B_0$  の関係は固定床と移動床によって大きく異なる。これは洗掘穴下流側斜面に沿って噴き上る流れによって水表面側にもはく離領域ができる、この内の渦による圧力(水面低下)によるものである。

### (3) 最大洗掘深さの時間的変化

下流水深以外は同一条件の実験での最大洗掘深さの時間的変化を比較した一例が図-19である。下流水深が小さくても間欠的洗掘現象が現われない間の最大洗掘深さの時間変化は下流水深に無関係であるが、間欠的洗掘現象が発現すると最大洗掘深さの増加速度は極端に小さくなっている。

段落固定床実験によると噴出流の弯曲

方向が変わる条件は境界面の幾何学的条件のみで決まるが、下流水深が一定である間欠的洗掘で最大洗掘深さが増大していくのは、洗掘穴下流の砂堆部を流下する間の損失水頭が大きくなっている、その水頭だけ噴出流の弯曲方向を規定する噴出孔付近の水位が上昇するからである。

無次元時間  $\tau = u_0^2 / sgd \cdot u_0 t / B_0 = 10^7$  における最大洗掘深さ  $D/B_0$  を下流水深  $H/B_0$  に対して描いたのが図一

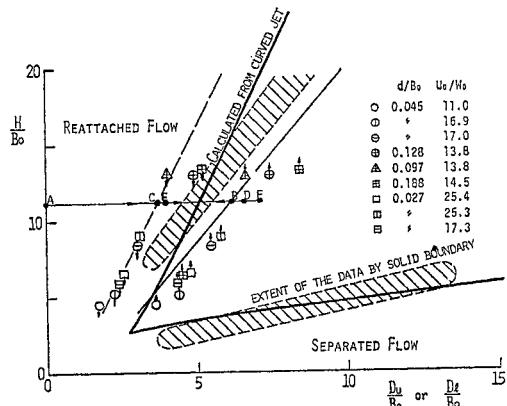


図-18 間欠的洗掘の発生限界と弯曲噴流の変流限界との比較

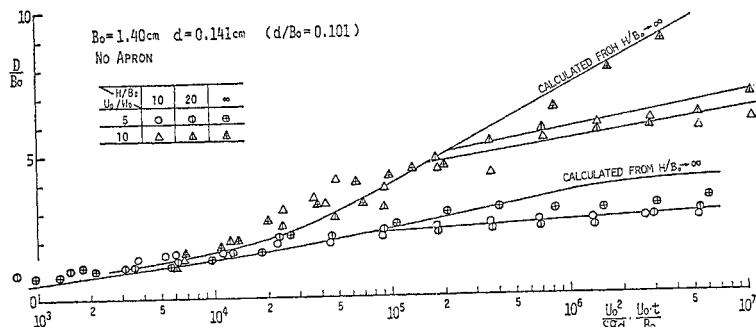


図-19 最大洗掘深さの時間的変化における下流水深の影響

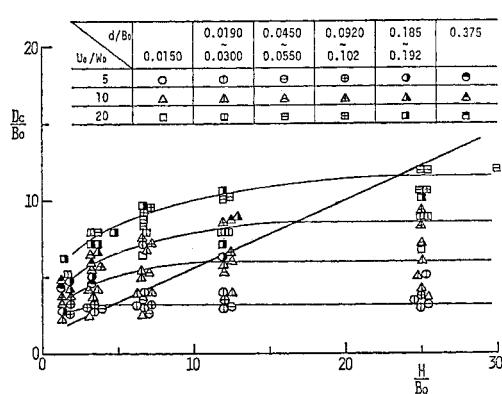


図-20  $\tau = 10^7$  における最大洗掘深さの下流水深による変化

20 で図中の実線は図-17 の間欠的洗掘の発生限界である  $D_e/B_0 \sim H/B_0$  の直線である。直線の左側領域で間欠的洗掘がみられ、下流水深が小さいほど最大洗掘深さは小さくなっている。一方、間欠的洗掘現象がみられない直線の右側領域での最大洗掘深さは下流水深に無関係である。

## 8. 結 語

以上、二次元水平噴流による洗掘と流れに関する詳細な実験を行い、洗掘過程を初期、中期および後期洗掘にわけ、以下のように洗掘穴内の流れおよび砂移動をモデル化して理論的な検討を加えた。

初期洗掘においては水平壁面噴流流れの特性を用い、中期および後期洗掘における洗掘穴内の流れは弯曲噴流およびそれによる壁面噴流の流れで表わし、洗掘砂面上の流れの特性を最大洗掘深さで表示した。

中期洗掘においては洗掘穴下流側斜面での流れのはく離の影響、後期においては噴流の動搖による間欠的崩落を導入して洗掘穴内の砂移動をモデル化した。

これらを非平衡状態での砂移動による河床変動の基礎式に用い、洗掘過程を追跡した。

解析においては流れのはく離が砂移動に及ぼす影響などにかなり粗い仮定が導入されているが、計算結果は最大洗掘深さと無次元時間との関係および洗掘形状などの実験結果とかなりよく一致して、噴流の洗掘穴方向への弯曲と壁面に再接触後形成される壁面噴流が洗掘にきわめて重要な役割をもつことが示された。さらに、実用上重要な下流水深が浅い場合には、噴出流が交互に上・下方向の弯曲を繰返す間欠的洗掘現象の発生限界および最大洗掘深さなどへの影響を系統的な実験によって明らかにした。

以上得られた結果は、水門やカルバートなどの下流部における局所洗掘を合理的に軽減するための基礎資料として応用することができよう。

最後に本研究の遂行にあたり種々ご教示をいただいた九州大学・椿東一郎教授に深甚の謝意を表する。また、実験・計算に際して多大なる協力をいただいた亀田芳満、林健二郎、山本規夫、松尾真治、松下浩之、前田和雄の諸氏に感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- Laursen, E.M. : Observation of the nature of scour, Proc. 5th Hyd. conf. State Univ. of Iowa, 1952.

- 2) 岩垣雄一・土屋義人・今村正孝：水門下流部における局所洗掘に関する研究，京大防災研究所報，第 8 号，1965.
- 3) Tsuchiya, Y. : On the mechanism of the local scour from flows downstream of an outlet, Proc. 12th Hyd. Conf. Colorado State Univ., 1967.
- 4) 斎藤 隆：二次元乱流壁面噴流に関する研究，土木学会論文報告集，第 264 号，1977.
- 5) 斎藤 隆：境界の影響を受ける二次元噴流の特性，土木学会論文報告集，第 164 号，1969.
- 6) 斎藤 隆・赤司信義・亀田芳満：衝突および再接触噴流による壁面噴流，山口大工学部研究報告，第 28 卷，第 1 号，1977.
- 7) 権 東一郎・斎藤 隆：流れによる Sand wave の発生限界，九大工学集報，第 40 卷，第 5 号，1967.
- 8) Einstein, H.A. : The bed load function for sediment transportation in open channel flows, U.S. Dept. Arg. Tech. Bull. 1026, 1950.
- 9) 権 東一郎・斎藤 隆：突堤による河床の洗掘について，山口大工学部学報，第 13 卷，第 1 号，1963.
- 10) 篠原謹爾・権 東一郎：河床砂礫の移動機構に関する一考察，九大応力研所報，第 10 号，1957.
- 11) 土木学会編：水理公式集，46 年度改訂版，pp. 205, 昭和 46 年。
- 12) 矢野勝正・土屋義人・道上正規：砂礫の流送機構の確率過程としての特性について，京大防災研年報，第 11 号 B, 1968.
- 13) 土屋義人：混合砂礫の限界掃流力に関する研究，京大防災研年報，第 6 号，B, 1962.

(1978.1.30・受付)