

噴流の洗掘作用に就いて

応用力学研究所水文学研究委員会

<https://doi.org/10.15017/4743344>

出版情報：応用力学研究所所報. 4, pp.11-27, 1954-03. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



噴流の洗掘作用に就いて

応用力学研究所水文学研究委員会

水槽の中に砂を充分厚く敷いて、その中に噴射ノズルを埋没しておき、これに水圧を加へた場合に起る噴流の洗掘作用に就いて実験的研究を行つた。2に於ては用いた実験装置が説明されて居り、3, 4, 5に於ては現象の概要、及び実験に依り得られた直接の結果が述べられている。6に於てはこれ等の結果に対比して、噴流が自由噴流に近いものとした場合の洗掘作用が考察されている。7, 8に於ては得られた測定資料を用いて、洗掘距離及び洗掘の最大深度と噴流の流速との関係が、水深や砂層中のノズルの深度及び水槽の幅或は使用した砂の粒径等を副変数として無次元的に考察され、最後に9に於ては噴砂状態（水圧の小なる場合）から掃砂状態（水圧の大なる場合）への遷移流速に就いて述べられている。

1. 緒言 砂浜に構築された港の出入口に暴風等によつて堆積されるであろう砂の層を除去し適當の深度の航路を維持せしめる一つの方法として強力なポンプによる噴流の掃射作用が考えられる。水文学研究委員会は日本港湾協会及び日本漁港協会の要請によりこの想案の可能性を確める目的を以つて表題の研究を行つたものであるが、この種の問題は河川工学に於ても堰、水流の流出口に於ける射流による洗掘、或は土砂層内の湧水による洗掘作用にも密接な関係を有するもので土木工学に於ける一つの重要課題たる性格を有する。この様な意味に於て研究は能う限り一般的に行われた。

吾々の本来の問題は、水面下に沈積された砂層があるとき、層中に水平に埋められたノズルから水を噴射するならば砂は水流の方向に掃射され、ここ起る活潑な洗掘作用とノズルに与えられた条件との関係を実験的に求めることにあるが、この研究に於てはノズルに徐々に水圧を加へて行つた場合に起る洗掘現象を系統的に検べることにした。

一定の条件の下にある噴流の洗掘作用はそこに形成される洗掘穴の形状、大き及びそれ等の時間的経過に依つて測られる。他方考慮されるべき条件としては、先づ砂層を構成する砂粒の密度及び粒度分布、次いで水深及び砂層中のノズルの深度、最後にノズルの直径と流出係数があつて、これ等が与えられた時にノズルに加えられる圧力或は流速を種々変えた場合の洗掘状態を検べることになる。然しながら使用した水槽の幅が狭かつたので以上の他に水槽の幅をも変数の中に加へなければならない。

要素が非常に多いので次の様に取り扱いを簡單化した：

i) 先づ洗掘穴の形状及び大きさは若干の代表的な場合に就いて詳細に検べ、概要を知つ

た上で、一般には洗掘穴のノズルの中心を通る縦断曲線（以下 **洗掘曲線**と呼ぶ）のみを問題にした。ii) 洗掘穴の大きさは噴流の作用時間と共に増大してゆくから、代表的な幾つかの場合に就いてその時間的経過を吟味し、一般には噴流作動後 20 分前後の洗掘曲線を測定することにした。iii) 定量的に洗掘作用を表はす目的のために、この様にして得られた洗掘曲線から求められる ノズルの先端と洗掘穴の先端までの洗掘距離と最大の洗掘深度及び先端の急勾配面の勾配を採用し、これ等の量、主として洗掘距離と諸要素との関係を吟味することを以つて満足した。

最後に砂粒の平均直径による現象の相違を見るために研究室所在の津屋崎町近郊の海岸より採取した大小 2 種の砂に就いて測定を行つた。

吾々の研究はこれを以つて完了したものでなく、特に幅のせまい水槽を使用したため現象が 2 次元的のものに近く、幅の影響を充分確め得なかつた点に於て今後の研究を俟つものである。

2. 実験装置に就いて (1) **水槽** 応用力学研究所津屋崎分室に於ける巾 50 糎、深さ 50 糎、長さ 10 米のコンクリート水槽に適当に装置を施し、その両端には常に水位を等しく保たれた水溜をつくり、その中間に金網を以つて仕切られた長さ約 6 米の領域を設け、この部分に砂を充填し洗掘作用の場に供した。

この砂溜の一端に噴射ノズルの取り付け台を設けた。ノズルは必要に応じて深度を調節される。5 馬力ポンプよりの給水はノズルより流出し、砂溜の両端の金網を自由に通過して、水槽の一端に置かれた吸込口より再びポンプに戻る。従つて水槽内の平均水位は全体の水量により加減され、実験中は絶えず一定に保たれる。

(2) **噴射ノズル** 水槽の幅がせまいのとポンプの容量が小さいのとで、使用ノズルは口径 1 糎、2 糎及 3 糎のものに限られた。この他に矩形断面のノズルに就いて測定を行つたが、これは円形のものより能率は悪く、而も副変度が 1 つ増加するので結果の整理は円形のものに就いて行われた。

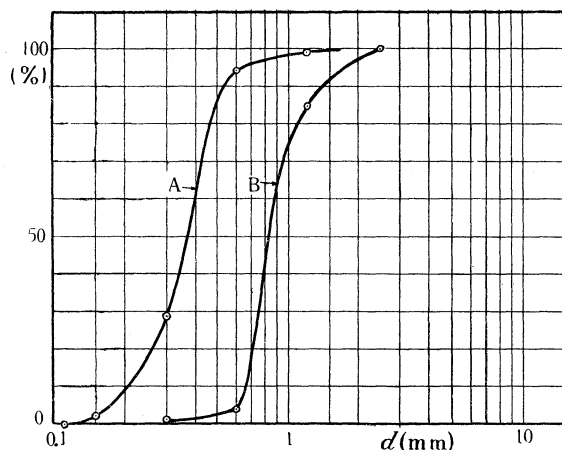
ノズルに作用する水圧はその外側の静水圧から測つたノズルの導管内の静水圧を以つて表はされるが、ここでは便宜のため水圧に代つてノズルよりの自由噴流の流出速度を用いた。このために必要な流出係数の詳しい検定は総ての実験が終つた後に、砂を排除した水槽を用いてなされた。

(3) **使用した砂** 使用した A 種砂及び B 種砂の特性は次の様なものである：

	平均直径 d (mm)	水中に於ける 安息角	境パラメ ーター β	限界摩擦速度 u_c (cm/sec)	速度 $u_c/\sqrt{s'gd}$	沈 降 速 度 u_s (cm/sec)	速度 $u_s/\sqrt{s'gd}$
A 種	0.36	33°	1.22	1.74	0.228	4.85	0.635
B 種	0.83	32°	1.20	2.30	0.198	8.7	0.75

水中に於ける砂の比重 $s' = 1.65$,

茲に平均直径は粒度曲線に於て 50% に対応するものであり、限界摩擦速度は限界掃流力に対応する摩擦速度を意味する¹⁾。又沈降速度は Rubey の公式より計算されている。最後に β は粒度分布に関する境氏のパラメーターである。



第1図 使用砂の節分曲線

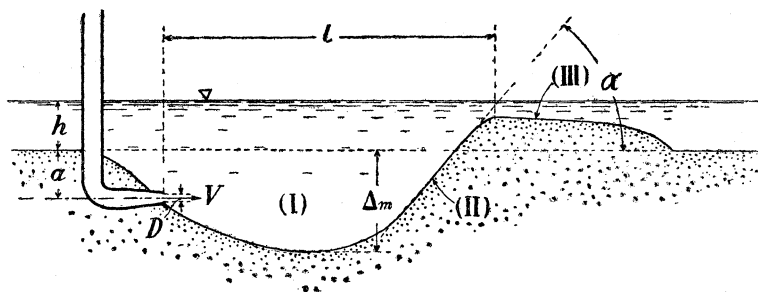
3. 現象の概要 始めに前述の様な装置による噴流の洗掘作用に就いてその概要を述べておく方が便宜であると思う。

ノズルに徐々に水压を加えて行くと、水は始めノズルの口附近の砂粒の間隙を縫つて砂層の表面に滲透してくるが、水压が或る限界に達すると砂の表面に噴出口が開けて水の急激な流出と共に噴出された砂に依つて楕円形の外輪廓が次第に形成される（この限界はノズルの砂中の深度及び水位ばかりでなくノズルの口径及び砂粒の直径の函数である）。然しながら水勢は未だ弱く砂は掃射されるに到らず、やがて安定される外輪廓の内部で対流運動をなすに止まる。この様な状態を噴砂状態と呼ぶことにする。

水压を更に増し水勢を強めてゆくと、外輪廓は次第に大きく発達して行くが、第二の限界圧を越すと状態は急激に活潑化し、外輪廓は崩れ砂は噴流の方向に掃射され本格的な洗掘作用が始まる。この状態を掃砂状態と呼ぶことにする。この様子は第二図に略示されている。

第二図に於てノズルよりの噴流は(I)の部分を通して際に拡大減速し、水勢は弱められてその前面の砂層により前進をはばまれ、ここに(II)の様な安息角に近い砂の斜面を形成し、その底面附近より上昇流となる。この上昇流の一部は水の上層及び水槽壁に沿うて逆流し再び主噴流に混入し循環運動をする。そしてここに大規模な渦動運動が現はれ

¹⁾ 限界掃流力に就いては、栗原道徳、樺東一郎、流体力学研究所報告 第4巻第3号 昭和23年9月を参照されたい。



第2図 噴流による洗掘作用

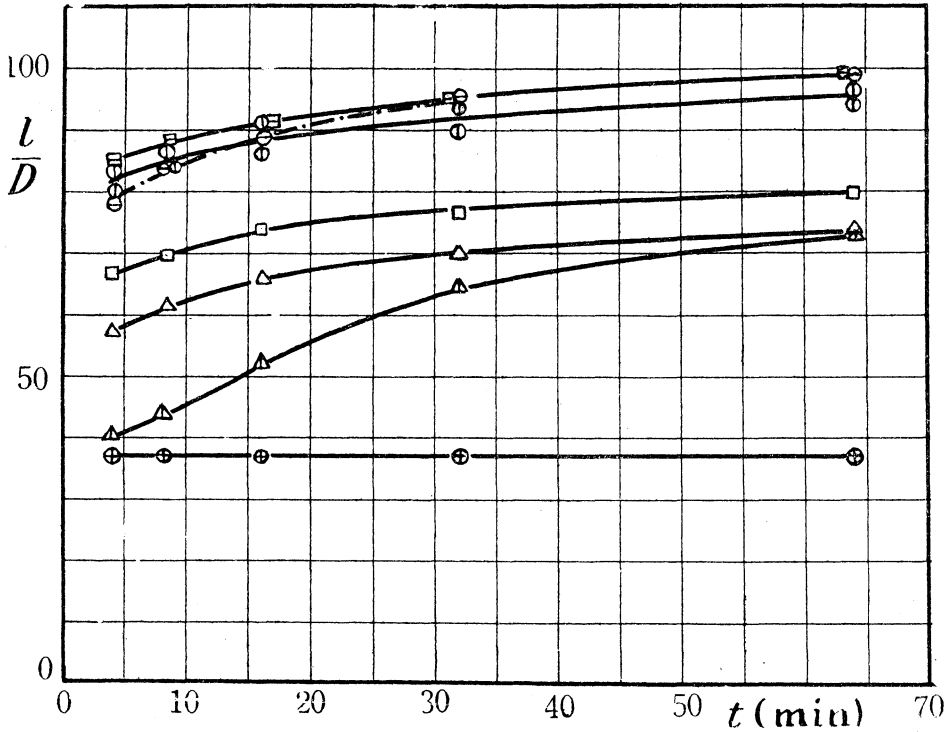
る。他の一部（ノズルよりの流出量に略々等しい）は外廓（III）を越えて外方に流出する。（II）に於て噴流により掃流された砂は流れに乗つて上述の水流と共に一部は循環、し他の部分は外方に運び去られて行く。この様にして洗掘は絶えず行はれるため、（I）の部分は次第に増大して行くが、洗掘穴の増大に伴う掃流力の減少及び篩分により粗い砂粒が残ることのために洗掘作用は次第に緩慢になる。吾々の実験に際しては大体に於て掃射開始後数分にして洗掘の大部分は行はれ、20分にして洗掘穴及び外廓は殆んど安定して仕舞つた。

噴砂状態から掃砂状態への遷移圧力はノズルの砂中の深度に著しい関係をもっており、深度と共に増加する。又ノズルの深度が余り小さいと噴流は自由噴流の如くなり遠方に達するが、洗掘効果は殆んどない。

4. 洗掘の時間的経過 噴流の洗掘作用を定量的に諸条件と結び付け得るためには、洗掘作用の時間的経過を知ることが先づ必要である。充分永い時間の後に果して洗掘穴は安定するものであろうか。若し絶えず変化してゆくものならば20分前後の測定値はどのような誤差を伴うだろうかを予め知る必要がある。

この目的のために洗掘作用を表はす1つの量として洗掘穴の長さ l を採用し、 l の時間的経過を測定することとした。先づ2,3の場合に就き数時間に亘つて得た結果より噴射開始後約1時間以後はどの場合にも l は対数的に増加することを知り得たので、以下の測定は総て64分を以て打ち切つた。又簡単のために水圧はノズルに於ける自由噴流の流速が約 9.2 m/sec の場合に限り、種々の水深 h 、ノズルの砂中の深度 a 及びノズルの直径 D に就いて測定を行つた。その結果は第3図に示されている。

既に述べた様にノズルの深度が大きいと容易に掃砂状態になり得ない。遷移前の噴砂状態では外輪廓は直ちに安定して時間的变化は起らない。図では $a/D=10$ の場合がそれで、 l/D は初めから一定である。 a/D が少しく減少し、ようやく遷移を起し得る様な状態では未だ掃流能力が弱く洗掘穴は容易に安定せず、 l/D の変化は永く続く。従つて初めの間の l/D の増加率は著しい。この模様は $D=1\text{ cm}, 2\text{ cm}$ のノズルに就いて $a/D=7.5$ の場合に明瞭に認められる。更にノズルの深度が減少すると洗掘は当初より活潑に起り、



$D=1\text{cm}$						$D=2\text{cm}$		
$\square$	a/D	h/D	$\square$	a/D	h/D	$\triangle$	a/D	h/D
$\ominus$	5	10	$\square$	5	5	$\triangle$	5	5
$\oplus$	7.5	10	$\square$	5	10	$\triangle$	7.5	5
$\oplus$	10	10	$\square$	5	15			

第3図 洗掘長さの時間的経過. B種砂, $V=9.2\text{m/sec}$.

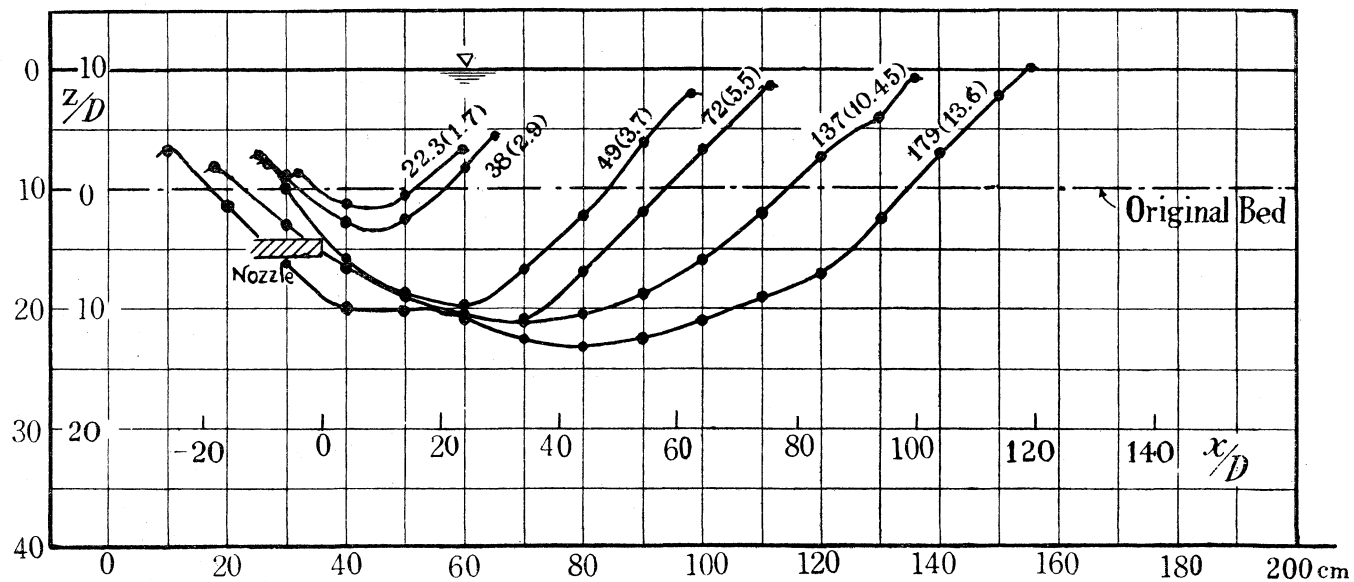
初めの僅か数分にて略々完了し、その後は対数的に緩かに増加してゆく。 $a/D=5$ に対応する結果がそれである。

最後に水深を増加して行くと l/D の絶対値も増加するが、時間的増加率は殆んど同じである ($a/D=5$, $h/D=5, 10, 15$)。

以上の結果から洗掘状態を定量的に取扱う場合には、遷移状態の近傍を除いて、掃砂状態では噴流作動後 20 分前後に於ける洗掘状態を採用することとした。噴砂状態に対しては何等の心配もない。遷移領域のものだけには特に考慮を払つた。

5. 洗掘曲面 ノズルに加えられる水圧を次第に増加して行くと洗掘穴も次第に拡大して行く。この洗掘穴の形及び大きさが水圧と共に如何に変化するか。その函数関係を探り、更にこの関係が水深 h 、ノズル深度 a 、ノズル直径 D 及び砂の粒径 d 等に如何様に関係するかを知ることが吾々の目的である。

A種砂とB種砂とは直径が 1:2.3 の割合で異なるため掃流力も異つて、同一の条件下に



第4図 洗掘曲線. 1 cm Nozzle, $a/D = 5$, $h/D = 10$, A種砂.

於ける洗掘の様子が可成異なる。

A種砂 $D=1$ 糎, $a=5$ 糎, $h=10$ 糎の場合に種々の流速に対応する洗掘曲面の縦断面即ち洗掘曲線を第4図に示す。曲線に付けられた数字は $V/\sqrt{s'gd}$ を, 括弧内のものは V そのものを示している (V はノズルの出口に於ける流速 m/sec, s' は砂粒の水中での比重, g は重力の加速度である)。

図を一瞥すれば知られる様に洗掘は流速と共に増加している。ノズルの埋没しているのは噴砂状態に関するものである。この状態では噴流を止めると洗掘穴は対流状態にあつた砂の沈降に依つて半ば埋められて仕舞う。従つて斜面は安息角よりも著しく小さい。

掃砂状態に於ては洗掘は殆んど2次元的に行はれている。その主な理由はA種砂は細かく、水槽壁に沿う循環流に依つても容易に掃流され縦断面内に砂は均らされるにある。実際B種砂に於ては洗掘曲面は3次元的である。

洗掘曲面の前方斜面も噴流中止後の残留攪乱を受け少しく原形は平均化され安息角より少しく小さい 28° 角程度の角をなしている。これに対してB種砂に於ては噴流中止後も原形を止める傾向がある。

ノズル後方の砂山は逆流により運ばれた砂の一部の沈積に因るものである。

B種砂 前述の様に洗掘曲面は3次元的である。縦断面はA種の砂と同型であるが、ノズル後方の山は著しくなく、前方斜面も洗掘中の原形を若干止めて居る。その平均勾配は安息角 32° に較べて可成小さく 23° 程度のものが多い。

横断面は主噴流の附近が深く洗掘され、左右に遠去かるにつれて浅くなる。

第5図 a), b) は $D=1$ 糎, $a=5$ 糎の場合に $h=5, 10, 15$ 糎なる3種類の水深に就いて前同様に示された洗掘曲面の縦断面及び横断面 (ノズル先端と前方外廓との中央に於けるもの) を示している。

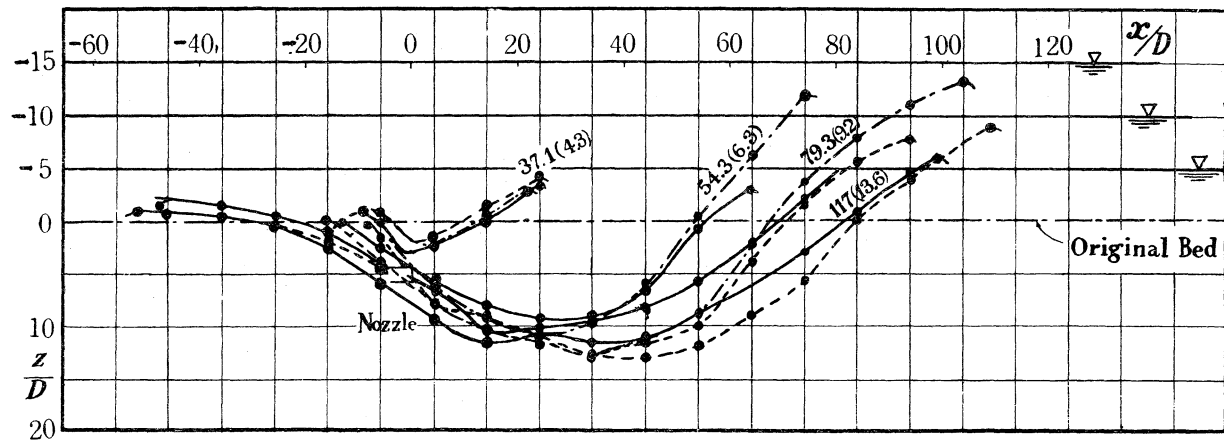
第6図 a), b) は $a/D, h/D$ を一定に保ち各種のノズルに対する洗掘曲線及び横断曲線を示すものである。これ等には水槽の幅の影響が現れているものと思われる。

6. 自由噴流 M. L. Albertson 等¹⁾によれば自由噴流の速度分布は、 x をノズルより噴流の中心線に沿つて測つた距離、 r をこの中心線からの距離として、

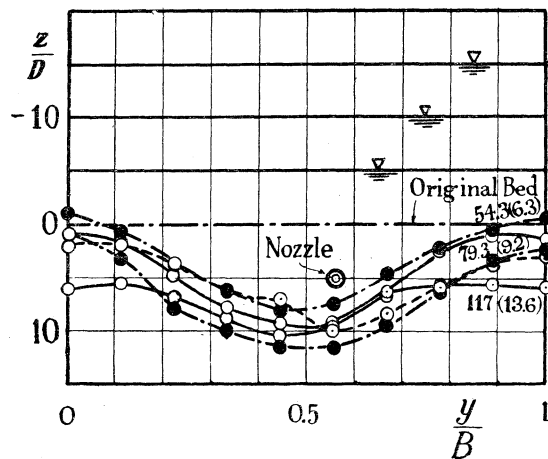
$$\left. \begin{aligned} x/D \leq 6.2 \text{ に対して} \quad \frac{u}{V} &= \exp \left[\frac{-(r + C_2 x - \frac{D}{2})^2}{2(C_2 x)^2} \right] \\ \geq 6.2 \text{ に対して} \quad &= \frac{1}{2C_2} \cdot \frac{D}{x} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2(C_2)^2} \cdot \frac{r^2}{x^2} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

¹⁾ M. L. Albertson, Y. B. Dai, R. A. Jensen, H. Rouse, Transactions A. S. M. E., 115 (1950), 588.

(a) 縦断面

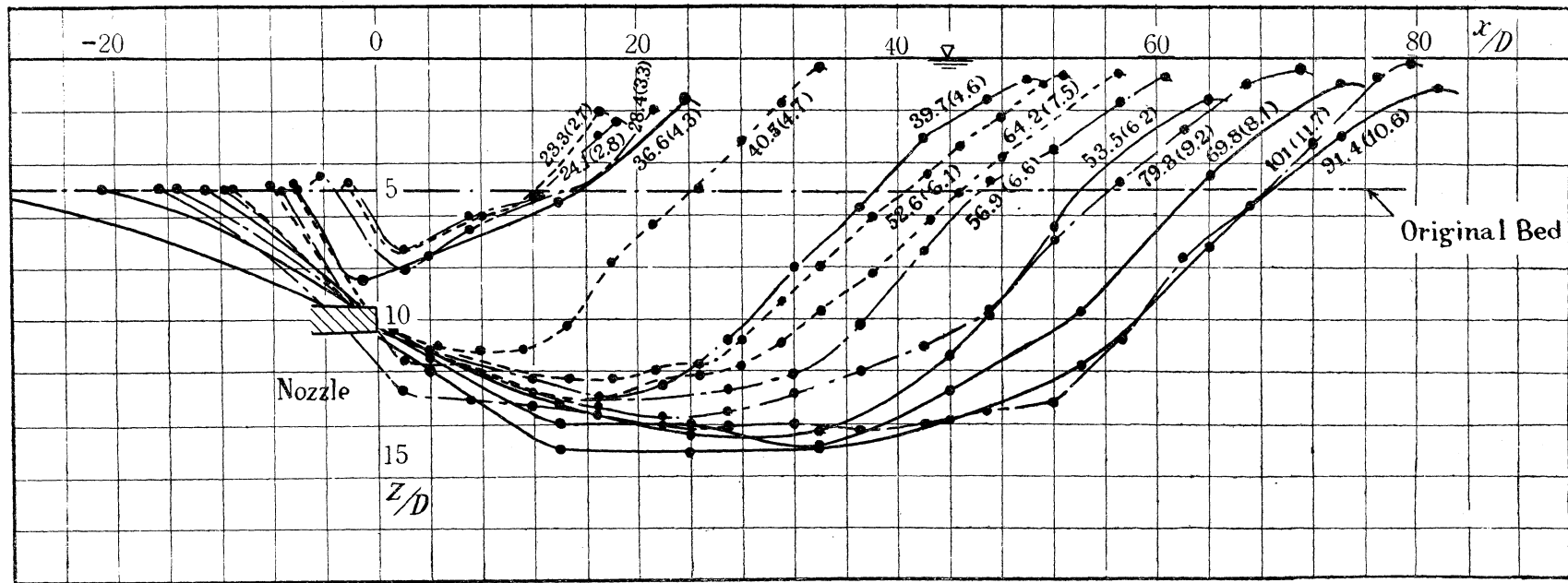


(b) 横断面



第5図 洗掘曲面.

1 cm Nozzle, $a/D = 5$, B種砂.実線は $h/D = 5$,破線は $h/D = 10$,鎖線は $h/D = 15$.

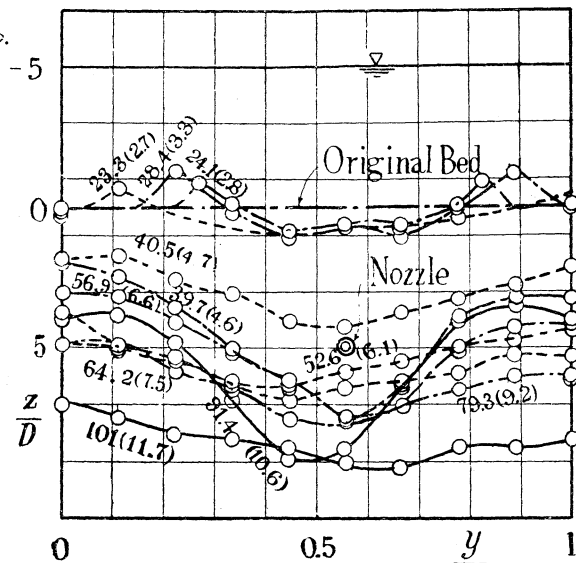


第6图(a) 洗掘曲面，縱断面。 $\frac{a}{D} = 5$, $\frac{h}{D} = 5$, B種砂。

实線：1 cm Nozzle

鎖線：3 cm Nozzle

破線：3 cm Nozzle



第6图(b) 洗掘曲面，横断面。 $\frac{a}{D} = 5$, $\frac{h}{D} = 5$, B種砂。

实線：1 cm Nozzle

鎖線：2 cm Nozzle

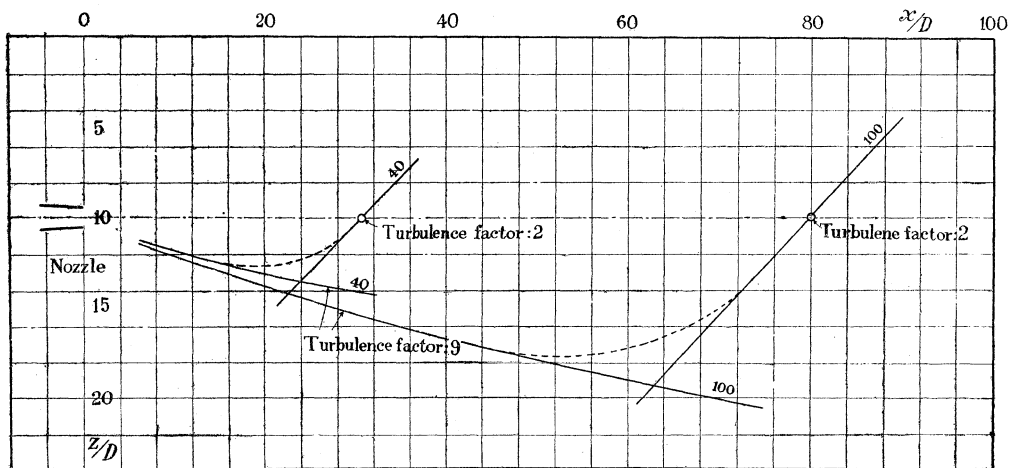
破線：3 cm Nozzle

で与えられる。茲に V は噴出口に於ける流速, u は (x, r) 点に於ける流速であり, $C_2 = 0.081$ である。

今, 仮に吾々の場合の噴流もこの自由噴流に似たものであるとするならば, 洗掘曲面は次の様にして定められる: 比較的水平に近い洗掘面の部分に於ては, 砂粒はその粒径に対応する限界掃流力を受けている筈である。B種の砂に就いては $u_c/\sqrt{s'gd} = 0.20$; 従つて $u/\sqrt{s'gd} = 1.7$ であるから $V/\sqrt{s'gd}$ が与えられると (1) から洗掘曲面が計算される。他方主噴流は絶えず前面の砂を排除掃流し洗掘を拡大してゆかねばならぬために, 前面に常に急勾配の斜面を形成する。この斜面に於ける砂粒がこの面を沿う平均流速に依つて掃流される限り洗掘は進行する。従つて限界掃流力の乱流係数を極く小さく 2 として, 斜面に沿つて $u/\sqrt{s'gd} = 7.7$ となる¹⁾。主噴流の流速 (中心線上) がこの様な値になるところで洗掘は終り, ここに安息角に近い急斜面が出来るものと考えられる。

ノズルに近い部分では $u/\sqrt{s'gd} = 1.7$ なる曲線, 前面の斜面は主軸上にて $u/\sqrt{s'gd} = 7.7$ となる如き安息角をなすものとして洗掘曲線を計算すると, $V/\sqrt{s'gd} = 40, 100$ の場合に第 7 図を得る。

第 6 図 a) と第 7 図とを比較すれば, 洗掘の傾向のよく似ていることが解る。特にノ-



第 7 図 自由噴流による仮想的洗掘曲線。

ズルの附近は自由噴流の場合に近いものと考えられる。実際の場合には噴流の上方及び側方の逆流が大きな幾つかの渦を形成するため自由噴流に較べて energy の消耗及び運動量の拡散が著しく, 流速は速かに減ずるものと考えられる。

¹⁾ $u_c/\sqrt{s'gd} = 0.20$ は乱流係数が 9 の場合である。従つてこれが 2 の場合には $u_c/\sqrt{s'gd} = 0.9$, $u/\sqrt{s'gd} = 7.7$ 。

主噴流の下層部は砂面に接するため energy の消耗も運動量の拡散も極めて少なく、従つて洗掘曲線も自由噴流より浅くなり、更にこのことは洗掘を前方に押し進めるのに有効である。

前方斜面の直前で起る上昇流は水面勾配を生じ、ために主噴流の流速を減少する役割をもっている。

7. 前節に述べた様に洗掘曲線はノズルの近くでは自由噴流によるそれに近いので、最大深度 Δ_m 及び前方斜面の勾配 α 及び洗掘穴の長さ l を知ると近似的に洗掘曲線を描くことが出来る(第2図参照). 然るに α は略々一定しているので以下 l, Δ_m に就いて考えて見る。

次元解析から知られる様に洗掘距離 l に就いて次の関係が成立する：

$$\frac{l}{D} = f\left(\sqrt{\frac{V}{s'gd}}, \frac{a}{D}, \frac{b}{D}, \frac{B}{D}, \frac{d}{D}\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに吾々が普通に使用する砂粒に対しては沈降速度、限界摩擦速度何れも $\sqrt{s'gd}$ に比例することが考慮されている。

(2) の右辺で最も重要な変数は $V/\sqrt{s'gd}$ であるから、最も簡単な指数法則

$$\frac{l}{D} = C \left(\sqrt{\frac{V}{s'gd}}\right)^n \quad \dots\dots\dots (3)$$

を採用し、指数 n 及び係数 C が $\frac{a}{D}, \frac{b}{D}, \frac{B}{D}$ 及び $\frac{d}{D}$ の函数として表わし得るものと仮定する。

1) ノズルの深度及び粒径の影響 (3) の両辺の対数をとつて

$$X = \log \sqrt{\frac{V}{s'gd}}, \quad Y = \log \frac{l}{D} \quad \dots\dots\dots (4)$$

とおけば

$$Y = A + nX \quad \dots\dots\dots (5)$$

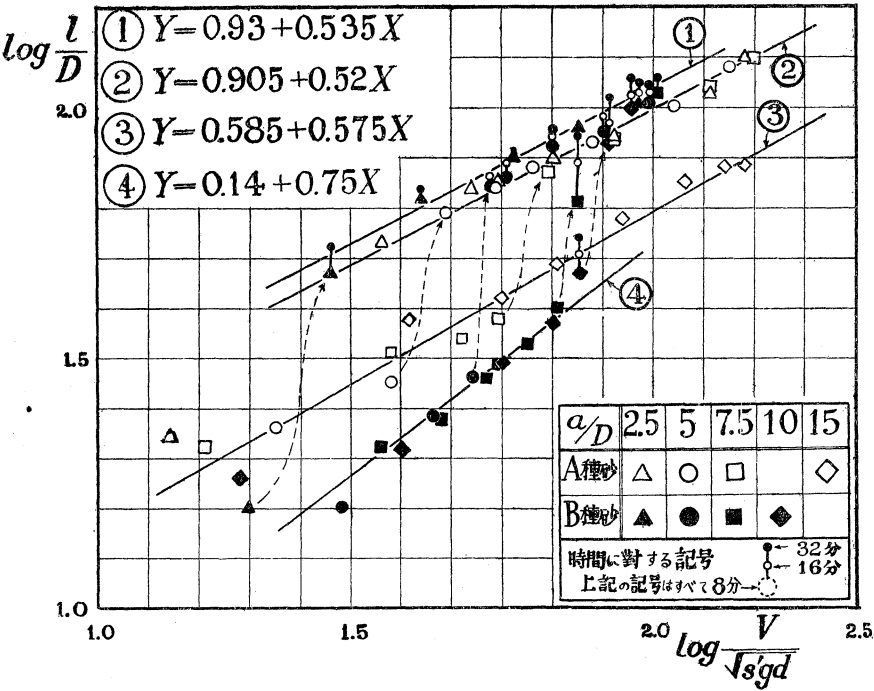
を得る。

先づ a/D 及び d/D の影響をみるために同一のノズルに就き水深 h を一定に保つた場合に、A, B 2 種類の砂を用いノズルの深度を数段に変化させて測定を行つた。その結果は第8図 a), b), c) に示されている。

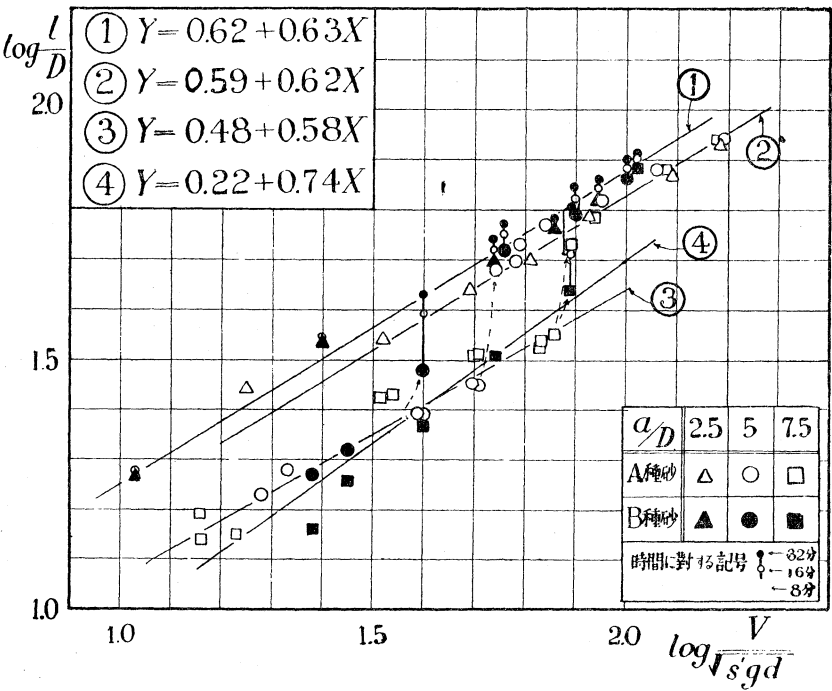
図が示す様に a/D の影響は判別し難い。粒径が異なると掃射状態に於ては若干の系統的な差違を認められるが、傾向は全く同じである。これに反し噴射状態に於ては散乱は著しく、又粒径の影響の著しいことが想像される。

第8図 c) に於ける掃射状態の2種の砂に対する相違は粒径及び水深の相違によるものである。

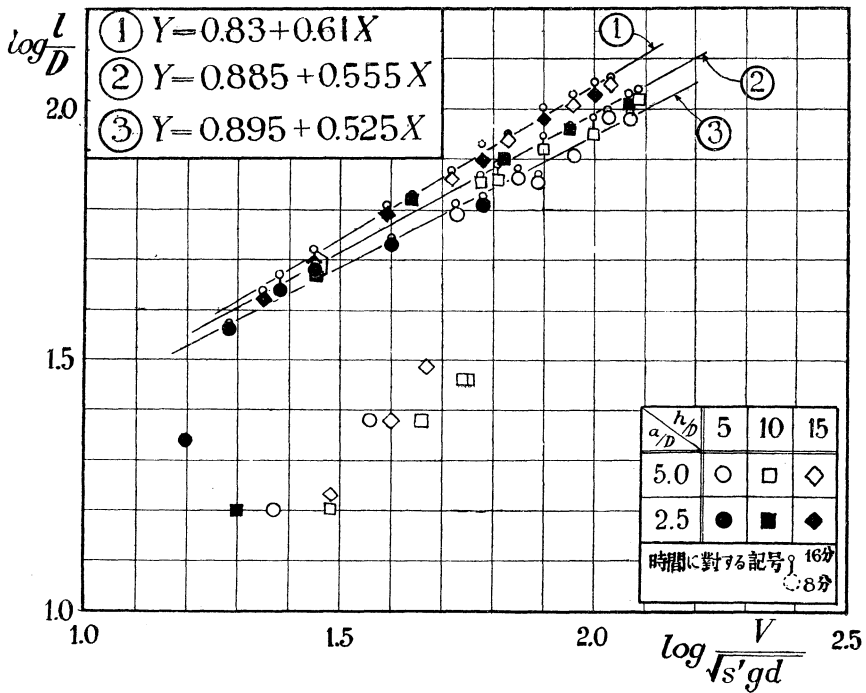
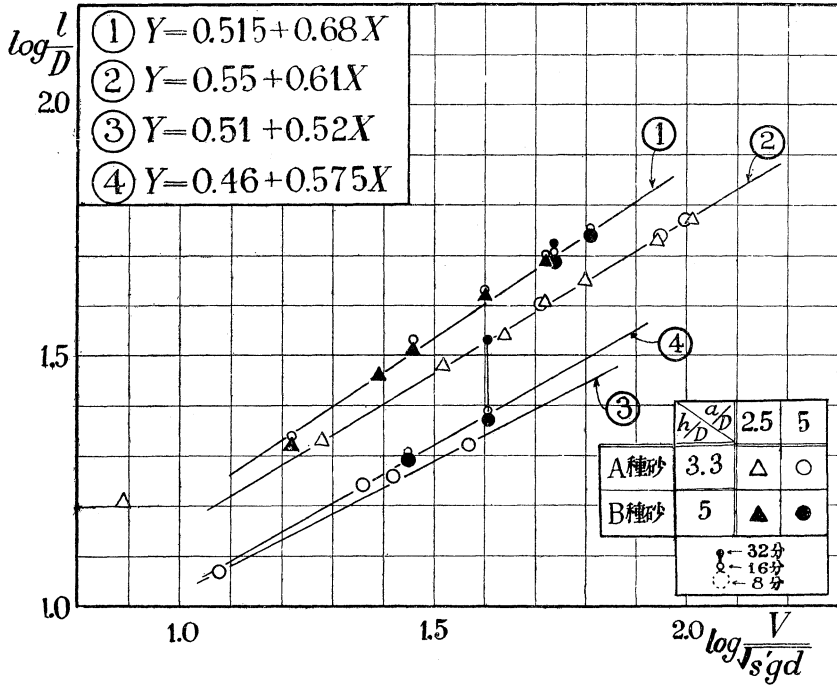
2) 水深の影響 第8図の諸直線を比較してみると水深 h/D の影響が明瞭である。これを詳しく見るために、B種砂、1 号ノズルに就いて $h/D=5, 10$ 及び 15 の場合を整

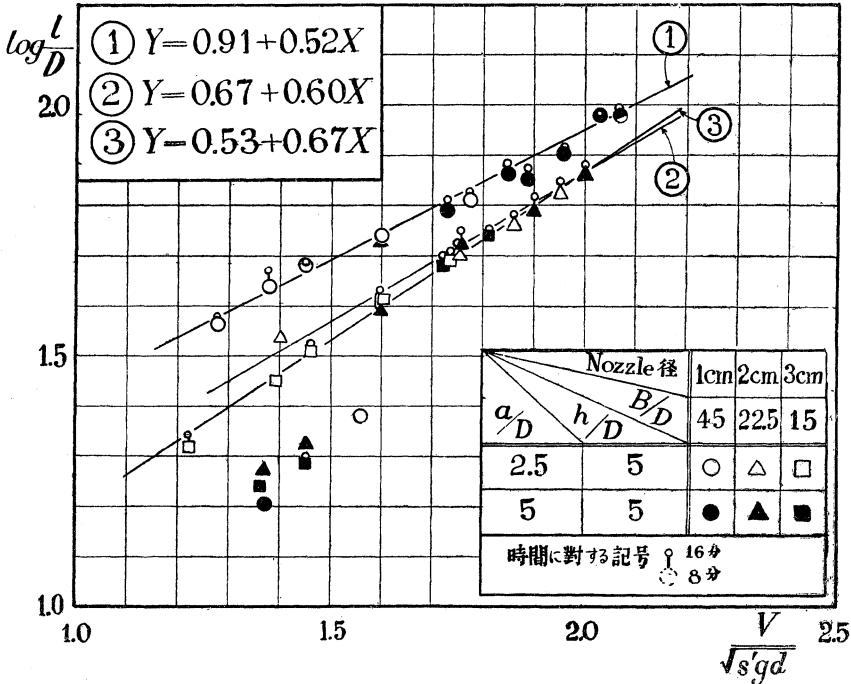


第8図 (a) $\frac{a}{D}$ 及び粒径の影響. 1 cm Nozzle, $h/D = 10$.



第8図 (b) $\frac{a}{D}$ 及び粒径の影響. 2 cm Nozzle, $\frac{h}{D} = 5$.





第 10 図 側壁の影響. B種砂.

理すると第 9 図の如くなる. a/D の 2 つの値 2.5 及び 5.0 に対する差異は認め難く, 上記 3 種の水深に就いては明かに区別され異つた直線を示している.

この理由は h/D が大きくなると主噴流の上部水層が厚いため逆流が弱められ, 従つて噴流は多少遠方に到達するためであろう. h/D が充分大きくなると噴流は自由噴流に若干近づくものと思はれる.

3) 水槽の幅の影響 側壁の影響は, 流速が未だ小さく噴流の幅が比較的小さい場合には, 側壁に沿う逆流の減速作用として現はれるが, 流速が増加して噴流の幅も増大すると, これは本流に対して直接に固体壁の作用とし現はれる. 従つて始めの間は l/D を減少する方向に作用するが, 流速の増加と共に 2 次元流の性格を示し始め l/D の減少の割合は減少を始める. この様にして直線 (5) の勾配は B/D と共に増加し, 常数 A は逆に減少することが想像される.

B種砂, $h/D=5$ の場合に 3 種のノズルに就いて上述の関係を調べた結果は第 10 図に示されている.

8. 洗掘距離に就いての総括 前節までの結果は

$$\log \frac{l}{D} = A + n \log \frac{V}{\sqrt{s'gd}} \dots\dots\dots(6)$$

に於て、 A , n は共に a/D 即ち砂層中のノズルの深度には無関係であり (a/D が余り大きいと容易に掃射状態になり得ない。又小さ過ぎると性質の全く異つた自由噴流となつて仕舞う。この様な制限のもとに於て), h/D , B/D 及び d/D の函数であることを示している。以下少しくこれ等の関係を検べてみる。

今 n を h/D に対して図示してみると、噴砂状態では A , B 種の砂に対する結果が著しく相違して居ることが分る。掃射状態に就いても実験の変域が小さ過ぎて函数関係を引出すことは困難である。又 B/D による変化も同様である。従つて吾々の実験の範囲に於てはこれ等の場合に就いての平均値を用う方が妥当である。

実験の行はれた総ての掃射状態に就いての n の値は次の通りである：

h/D	15	10	5	5	5	3.33
B/D	45	45	45/2	45/3	45	45/3
砂の種類	B	B A	B A	B	B	A
n	0.61	0.54 0.54	0.63 0.62	0.68	0.53	0.61

これ等の平均値は 0.60 である。以下 $n=0.6$ と仮定する。

$$\frac{l}{D} = \text{Const.} \times \left(\frac{V}{\sqrt{s'gd}} \right)^{0.6} \dots\dots\dots(7)$$

第6節に述べた様に、噴流の模様が自由噴流に近いものとする、自由噴流の軸上の流速が $\sqrt{s'gd}$ の或倍数になつたところに急斜面が出来るとして吾々は

$$\frac{l}{D} = \text{Const.} \times \frac{V}{\sqrt{s'gd}}$$

を得る。

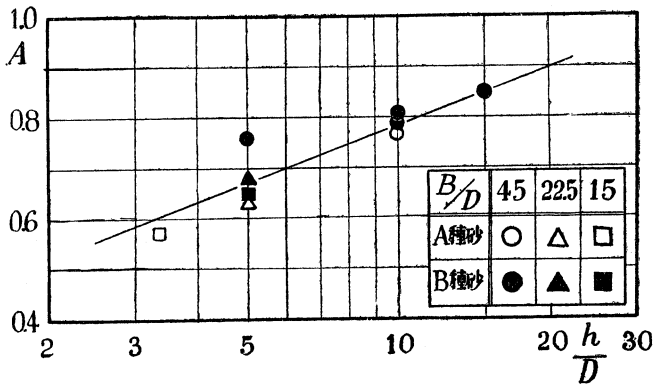
これと (7) とを比較して、2つの式の右辺の指数の相違は自由噴流が前面に生ずる急斜面自身及びそれに依り生ずる逆流のために著しくエネルギーを殺がれ運動量を失うことを示しているものであらう。

$n=0.6$ として引かれた直線が夫々の場合に最もよく測定点に應ずる如くに (5) 或は (6) の A を定めると次の如くなる：

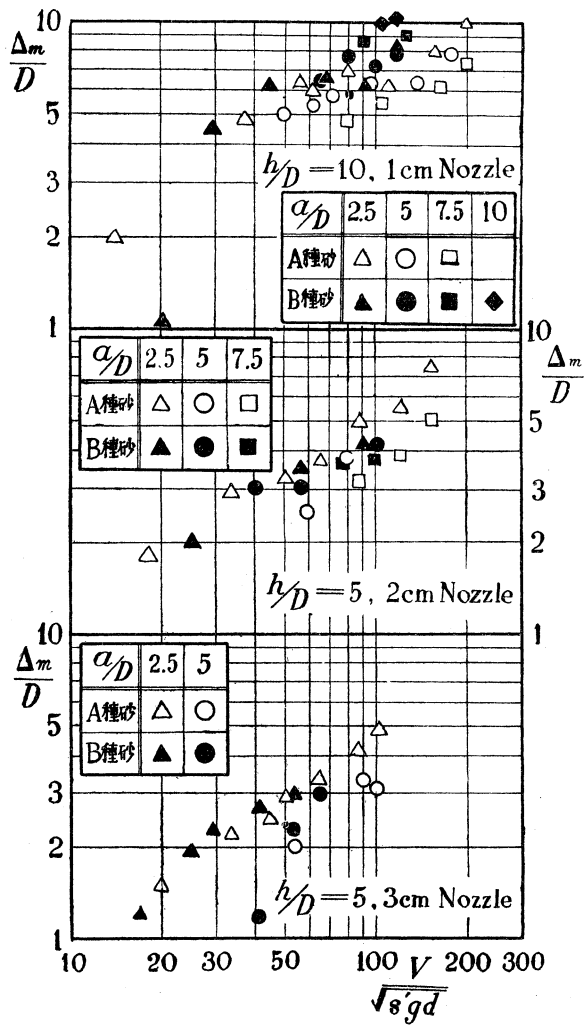
h/D	15	10	5	5	5	3.33
B/D	45	45	45/2	45/3	45	45/3
砂の種類	B	B A	B A	B	B	A
A の 値	0.85	0.81 0.77	0.69 0.63	0.65	0.79	0.58

図示すれば第11図の如くなる。明かに A は h/D と共に増加し、一見図に示す直線によりその関係は表わされているが、実験に際しての諸量の変域が余り狭いので、この直線を一般的な関係と見做すことは危険である。

9. 洗掘の最大深度、噴砂から掃射への遷移 洗掘穴の最も深いところの深度 l_m も亦



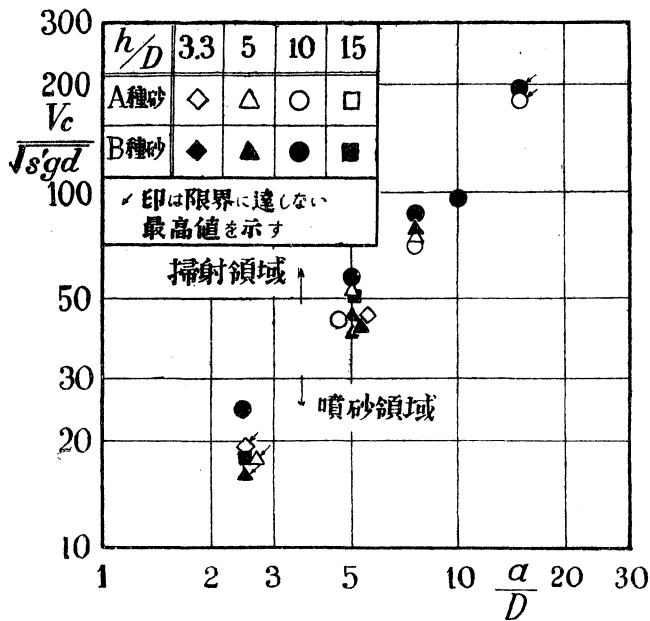
第 11 図
水深と A の関係.



第 12 図
最大深度.

洗掘作用を表はす重要な量である. Δ_m/D を $V/\sqrt{s'gd}$ に対して表示すると第12図の如くなる. Δ_m/D は a/D には殆んど関係しないが, ノズルの直径に著しく影響される. この事は水槽の幅 B/D の影響とみるべきである. 又 Δ_m/D の h/D に依る変化も同じ様に殆んどないと見做される.

最後に噴砂状態から掃射状態へ移行する ノズルの水圧或は流速は, 現象が元来不安定なるものであるにも拘らず ノズルの砂中の深度 a/D に対して可成明瞭に一定の値をとる. この模様は第13図に示されている.



第13図 噴砂から掃射への遷移.

本研究に対する問合せ, 討論その他の連絡は九州大学応用力学研究所, 水文学研究委員会, 松尾春雄又は栗原道徳に宛てられたい. 実験の遂行及び整理は主として栗原道徳, 椿東一郎その任に当り, 古屋朝治, 富岡勝の協力により行はれたものである.

(昭和29年1月14日受理)