

# 巨石まわりの洗掘と流れの経時変化

指導教員 富永 晃宏 教授

伊藤 佑介

## 1. 序論

河川に巨石を投入することで、流れに多様性を持たせ、水生生物の生息環境を創出しようという試みは各地で行われている。これは特に単調な流れを有する都市河川で適用されており、魚にとっての餌場や休憩地の確保、付着藻類の着生面積の増加、出水時の避難場所といった効果が期待される。実際、アユをはじめとする魚類の生息数が増加したという報告がある。しかし一方で、このような効果が得られるのは投入初期であり、数年程度で巨石が砂礫に埋まってしまうことが多いことがわかっている。今後は計画時点において、工学的な検討をすることで長期に物理的に安定性のある事業が期待される。以上のことから、巨石を投入することによる河床洗掘の時系的变化、河床形状変化に伴う流れ構造の解析についての研究は重要である。

開水路中に構造物を設置した場合の研究は橋脚を想定した研究が多くある。しかし、本研究で用いる巨石は、根固めをしないため流れにより可動すること、巨石の形状・大きさによって3次元的な流れが発達しやすいことが特徴として挙げられる。本研究では、開水路中に巨石モデルを設置し、変化していく河床形状を計測した。その後、時間変化する河床形状の一部を再現し、PIVにより詳細な流れ構造の様子を計測した。

表 1 水理条件 (移動床実験)

水路幅 [cm]	30.03	勾配	1/1096
水深 [cm]	3.9	フルード数	0.322
流量 [ $cm^3 / sec$ ]	2315 ± 28	水温[度]	28.5
断面平均流速 [cm/sec]	19.9		

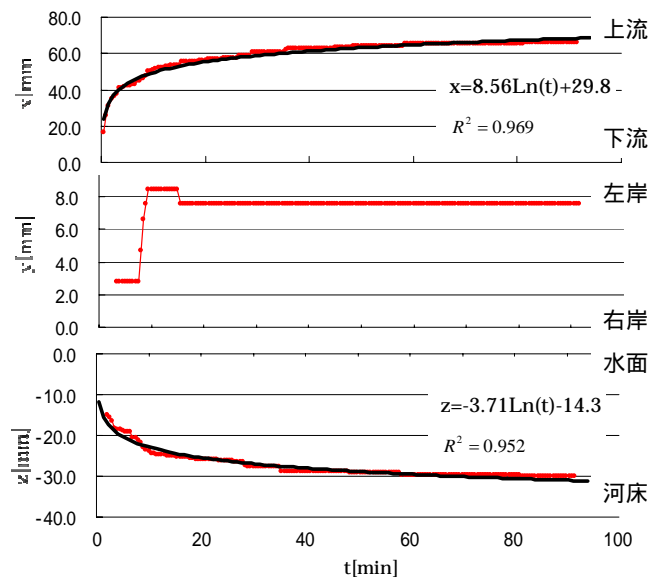


図 1 球の位置

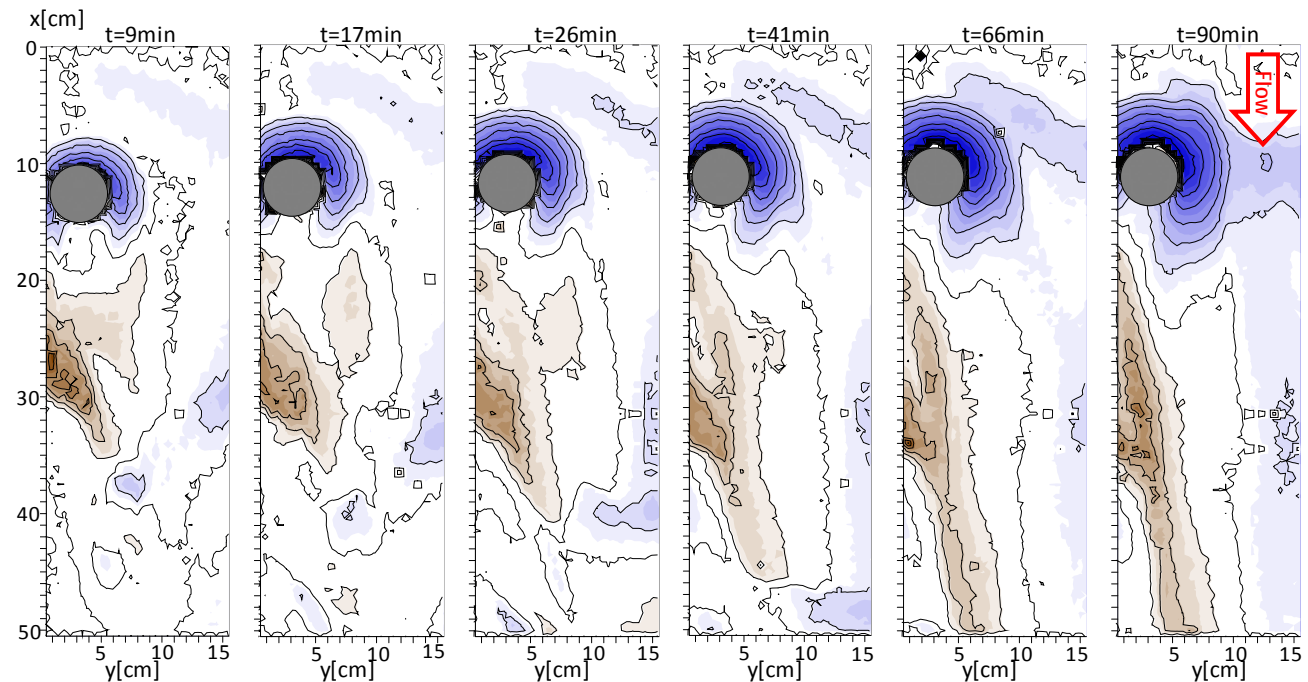


図 2 河床形状の時間変化

## 2. 移動床実験

実験水路は長さ 6 m、幅 30cm の直線開水路を使用した。計測区間においては、平均粒径  $d_{50}=0.351$ 、均等係

数  $d_{60}/d_{10}=1.52$  の一様砂を厚さ 8.4cm で敷き詰め、残りの底面は砂を散布し、粗度をつけている。水理条件を表 1 に示す。実験は直径 5.0cm、密度  $2.7\text{g/cm}^3$  のアルミニウム球を巨石模型と見立て、 $t=0\text{min}$  に右岸端に設置した。河床高計測はレーザー距離計を使用し、 $x$  方向に 50cm、 $y$  方向に 15cm、5mm 間隔で行った。計測は  $t=9,17,26,41,66,90\text{min}$  の 6 度計測した。一断面を計測するには約 2.5min かかっている。また、水路の上と横から 30sec ごとにデジタルカメラで球を撮影し、球の位置計測をしている。

図 1 に  $t=0\text{min}$  を基準として球の移動量を示す。 $x$  方向には上流方向に対数的に移動していることがわかる。 $y$  方向には投入後初期に壁面から離れていき、20 分で  $y=7.5\text{mm}$  となり動かなくなった。 $z$  方向には  $x$  方向と同様に対数的に沈んでいき、収束することが予想される。このことから、投入初期には球は大きく移動するが、時間の経過により、対数的に変化していくことがわかる。

図 2 に河床形状の時間変化をコンター図で示す。球の周りは同心円上に洗掘が発生している。洗掘範囲と洗掘深は次第に大きくなっていき、特に右岸側で進みやすいことがわかる。榊<sup>1)</sup>の研究から、この後洗掘は球の斜め後方へ向かって伸びていくことが予想される。これは水制を設置したときと同様に、巨石に対して直進してきた流れが水路中央方向に偏流されるためであると考えられる。後方の堆積は球の 5cm ほど後方から始まっており、斜め後方に伸びている。時間の経過とともに堆積域は後方になだらかに伸びていき、 $t=66\text{min}$  には計測域外まで達している。河床形状についてさらに細かく検討をする。

図 3 では各時間における計測区間の最大河床高と最小河床高からそれぞれ 4 点を示したものである。4 点示したのは、計測誤差による影響を減らすためである。図より、最大河床高は時間が経過してもほとんど変化がないため、球付近の洗掘により給砂が行われても、堆積領域は大きくなるが堆積高は変わらないことがわかる。一方、最小河床高について、球の直下はレーザー距離計では計測できないため最大洗掘深とは異なるが、次第に小さくなっていき、対数関係にあることがわかる。これは中川・鈴木ら<sup>2)</sup>の橋脚まわりの最大洗掘深の結果と類似している。

図 4 では  $y=35\text{mm}$  における洗掘領域河床高の時間変化を示している。投入初期には洗掘領域が大きく前方へ移動していることがわかる。洗掘領域の変化は次第に小さくなっているが、 $t=66\text{min}$  から  $t=90\text{min}$  にかけても洗掘が進行していることから、定常流であっても洗掘域の安定にはかなり長い時間がかかることがわかる。

図 5 では  $y=30,35,40\text{mm}$  における洗掘領域の安息角を示している。安息角は洗掘領域内の河床高を最小二乗法で近似した傾きにより算出している。安息角は  $t=9\text{min}$  では大きくなっているが、以降は  $38\sim 42^\circ$  で推移している。図 3 の結果から、安息角はほとんど変わらず、洗掘深が大きくなっていることがわかる。

図 6 は  $x$  成分の洗掘領域端を示している。洗掘領域端は図 5 で用いた最小二乗法の  $x$  切片と定義した。洗掘

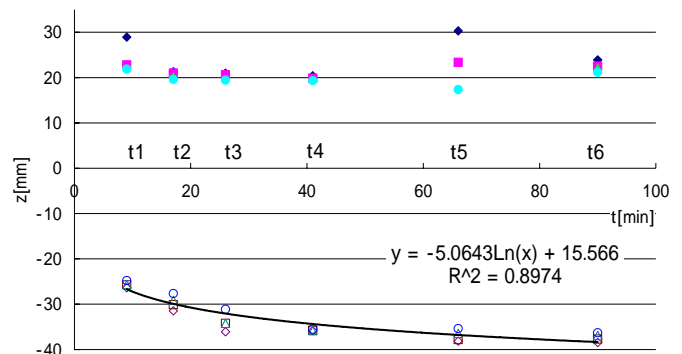


図 3 最大河床高と最小河床高

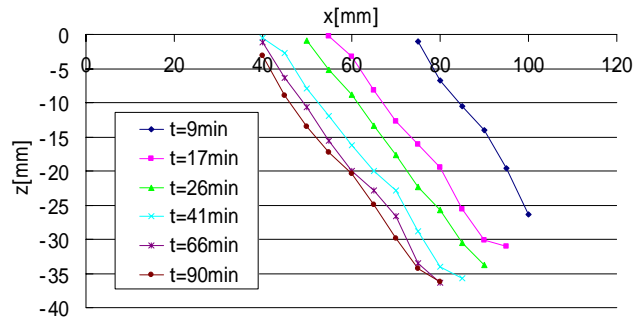


図 4 洗掘領域河床高の時間変化

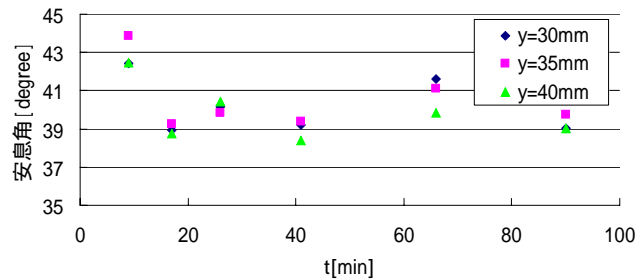


図 5 安息角 ( $y=30,35,40\text{min}$ )

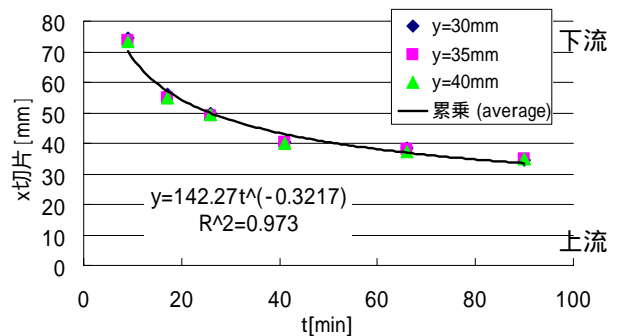


図 6 洗掘領域端 ( $x$  成分)

領域は次第に上流側へ広がっている。その広がり方は時間の累乗で精度よく近似できる。y 成分については巨石投入とは関係ない河床波によって、河床低下が発生しているため検討しにくいと同様の傾向が見られる。

### 3. PIV 解析法

本研究では独自の PIV 解析プログラムを作成したのでその特徴を述べる。PIV 解析法は 20 世紀初期に開発された画像解析による流速計測法であり、実験室スケールで詳細な流れを計測する際によく利用される。PIV 解析法の手順は 画像から輝度値配列の取得 輝度値から相互相関関数の取得 相互相関関数の分布からサブピクセル解析による移動量の取得の順で行われる。

相互相関関数の取得について、これまで計算時間短縮のためフーリエ変換による導出が多く行われてきたが、PIV 解析においては誤差を含んだ少ない輝度情報を連続関数と見なさなければならぬため直接相互相関法による相互相関関数取得の方が適切であると思われる。本研究では計算量を減らすために、相互相関関数の代わりに RMS 値を用いている。

サブピクセル解析は最大の相互相関関数を求めるだけでは解析精度が 1 画素単位と粗いため、相互相関関数の分布に近似曲線をあてはめ、そのピークを移動量とするものである。これまでの PIV 解析では x 成分、y 成分それぞれについて、2 次曲線または正規分布を当てはめ、曲線のピークを移動量としていたが、1 次元で曲線を当てはめると、相互相関関数の分布が歪んでいる（同心円状でない）場合正しく移動量が評価されない場合がある。そのため、本研究ではサブピクセルとして、2 次曲面をあてはめている。a から f の係数は最大相関関数の点およびその周りの点から求めている。これにより、撮影画像中の粒子が歪んでいたとしても、正しく評価することができる。ただし、画像中に粒子が極端に少ない場合、大ベクトルが発生することが確認されているので、別途後処理する必要がある。

### 4. 固定床実験

水路は長さ 7.5m、幅 30cm の直線開水路を使用した。計測区間においては、移動床実験の結果から、t=0min として直径 5cm の球が 1cm 埋まった場合と、t=9min の時点の河床形状を河床模型として再現した（図 7）。残りの底面は移動床実験と同様に砂を散布し、粗度をつけている。水理条件を表 2 に示す。水理条件は移動床実験のときとほぼ同じである。流速計測は PIV を使用した。トレーサ粒径は粒径 80micron、比重 1.02 のナイロン樹脂粒子を用いて、厚さ約 2mm



図 7 河床模型 (t=9min)

の 400mW の半導体レーザーを開水路鉛直および水平断面に照射した。撮影は高速度カメラにより 200frame/sec、露光時間 1/250sec で、16 秒間 3201 データを撮影した。撮影された画像はハードディスクに空間解像度 640 × 480pixel のグレースケール Bitmap データとして記録される。

図 8 は t=0min における球の主流側端付近 y=50mm の縦断面平均流速ベクトル図である。下の散布図は点線の位置における主流速を示している。球の前部では底面付近で流速が小さく、水面付近でもやや小さくなっており、対数則が成り立っていることがわかる。球のある地点からは下降流が発生している。主流速分布から、球の部分では流速はほとんど発生していないが、水面付近と底面付近で大きくなっている。特に底面付近では隙間を抜けるような流れが発生している。球から 60mm ほど後方では水面付近で流れはほとんど発生していないが、底面で大きな流速がある。このことから、球により下降流が発生し、底面で大きな流速を生み、後方にも伝わっていることがわかる。底面流速の発達が長く続いていることがその領域において、洗掘が進む原因であると考えられる。

図 9 は t=0min の y=3mm における縦断面平均流速ベクトル図である。球のある地点では、水面付近で上昇流が、底面付近で下降流が発生している。また、y=50mm と同様に底面での主流速が大きくなっている。ただ

表 2 本研究の PIV 解析法

	従来	本研究
相関方法	$S_{fg}(\xi) = \lim_{L_0 \rightarrow \infty} \frac{2\pi}{L_0} F(\xi)G(\xi)$ $C_{fg}(\Delta x) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{fg} e^{i\xi\Delta x} d\xi$	$RMS_{fg}(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(x_i, y_j)g(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(x_i, y_j)^2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N g(x_i + \Delta x, y_j + \Delta y)^2}}$
サブピクセル解析	<p>相互相関関数</p>	<p><math>f(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f</math></p>

し、球の後方 40mm では底面流速はほとんどなく、局所的に強い底面せん断力がはたらくとみられる。移動床実験の結果と合わせて考えると、底面流速が大きい地点は初期に洗掘が起こっているため妥当な結果となった。

図 10 は  $t=9\text{min}$  における球の主流側端付近  $y=60\text{mm}$  の縦断面平均流速ベクトル図である。図 8 と比較すると、球の前部では同様の底面の対数則が見られるが、球のすぐ後部の底面で上昇流が発生しているのがわかる。これは洗掘領域からのわき上がりによるもので、河床を巻き上げ、洗掘を促進させると考えられる。

図 11 および図 12 はそれぞれ  $t=9\text{min}$  の  $y=5\text{mm}$  および  $y=10\text{mm}$  における縦断面平均流速ベクトル図である。 $y=5\text{mm}$  では球のある地点から後部にかけて大きな底面流速が発生している。一方で、 $y=10\text{mm}$  では洗掘領域から球の下に潜り込むような流れが発生している。断面が 5mm 違うだけで大きく流れが変化している。これは球の前部で潜りこむ流れが洗掘を促し、洗掘された砂が球の側部を通過して後部へ運ばれる流れを表している。そのため球前部では次第に洗掘が進んでいき、球の足元の珪砂が減ることで球が前転し、流れが変化するとともにさらに洗掘が起こる原因になると考えられる。

## 5. 結論

河床に球を設置したとき、球の移動や洗掘領域、洗掘深は対数または累乗で表すことで、どの程度で収束するかが予測できる。また球のような下部に隙間のある形状では、隙間を抜けるような流れにより、底面流速が大きく発達することが洗掘を促す要因であると考えられる。

また、流量を非定常にすることで巨石が埋まることが予想される。現地ではこのことによる効果喪失が問題となっているので、現地により近い条件での河床変動のメカニズムの解明が必要である。

### 参考文献：

- 榊卓也：巨石を設置した開水路の流れ構造と淵創出に関する研究，名古屋工業大学修士論文
- 中川博次・鈴木幸一：橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究，京大防災研究所年報第 17 号 B（昭 49.4）

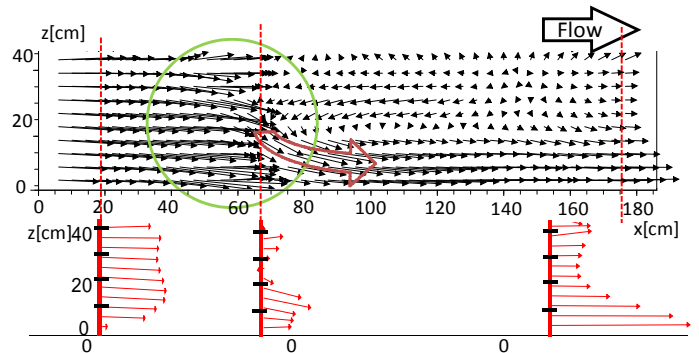


図 8 流速ベクトル図 ( $t=0\text{min}$ ,  $y=50\text{mm}$ )

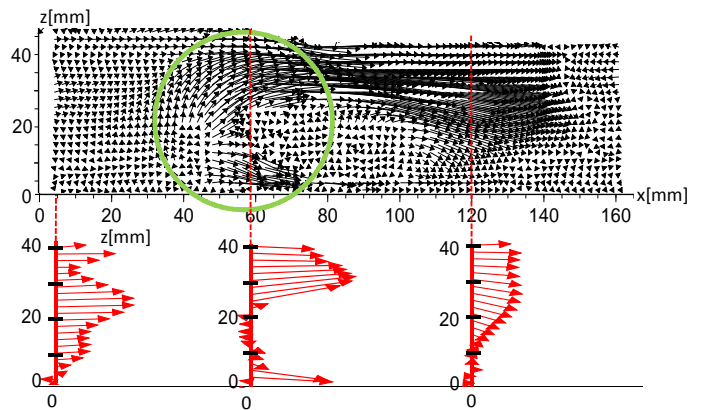


図 9 流速ベクトル図 ( $t=0\text{min}$ ,  $y=3\text{mm}$ )

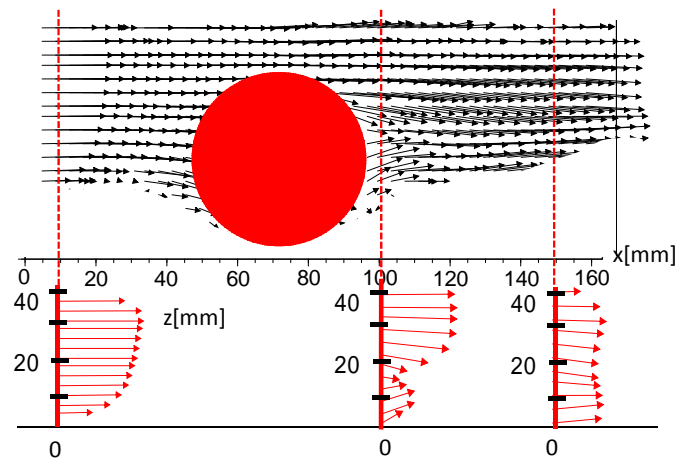


図 10 流速ベクトル図 ( $t=9\text{min}$ ,  $y=60\text{mm}$ )

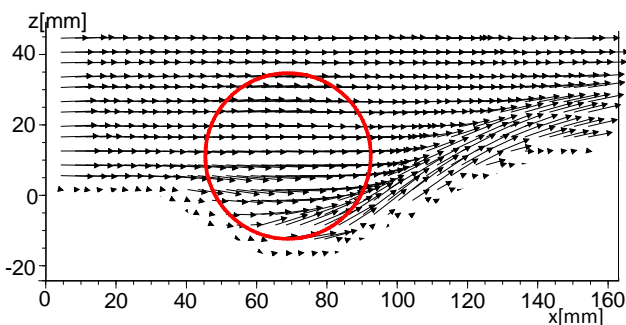


図 11 流速ベクトル図 ( $t=9\text{min}$ ,  $y=5\text{mm}$ )

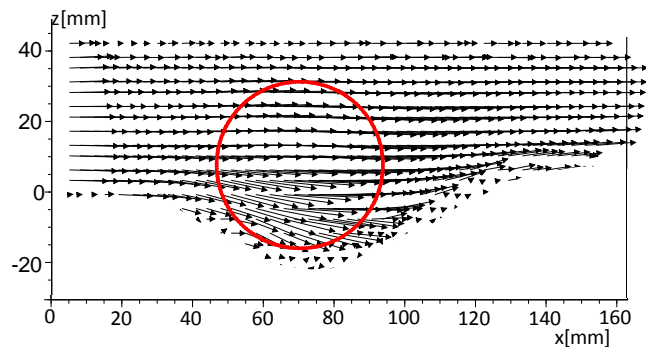


図 12 流速ベクトル図 ( $t=9\text{min}$ ,  $y=10\text{mm}$ )