

**1. はじめに** 中小河川は改修によって平坦で単調になりやすく、生物にとって好ましくない物理環境となっていることが多い。このような河川において、河道に巨石を設置することで流れに多様性を持たせ、魚類の採餌場や休息場、洪水時の避難場所の確保といった効果が期待される。こういった試みは多自然川づくりの一環として各地で行われている。しかし、実際に巨石を設置する際は経験的に行われることが多く、明確な配置方法が確立されていない。そこで本研究では、巨石を複数配置する場合の基礎的知見を得るために流下方向配置間隔と横断方向配置間隔が巨石背後の流れに与える影響について PIV 計測実験を行い検討した。

**2. 実験方法** 実験水路は、長さ 7.5m、全幅 0.3m の勾配可変開水路を用いた。水深は非越流時が 2.5cm、越流時が 6.0cm となるよう流量および下流の堰で調節した。実験条件を表-1 に示す。模型は一辺 3.0cm の亚克力製立方体を用い、流下方向配置間隔  $dx$  が 3.0cm、6.0cm、横断方向配置間隔  $dy$  が 2.0cm、3.0cm、4.0cm となるよう図-1 のように設置した。なお、上流側に設置した 2 つの模型を第 1 模型、下流側に設置した模型を第 2 模型とする。PIV 計測の流れの可視化には直径 80 ミクロン、比重 1.02 のナイロン樹脂粒子を用い、厚さ約 3mm のシート状にしたアルゴンレーザー光を開水路水平断面及び鉛直縦断面に照射した。レーザーシートの照射位置は、水平断面は 0.5cm 間隔で、非越流時には 4 断面 ( $z=0.5\sim 2.5\text{cm}$ )、越流時には 11 断面 ( $z=0.5\sim 5.5\text{cm}$ ) 設定した。鉛直縦断面は模型の対称性より  $y=0\sim 15.0\text{cm}$  を計測区間としている。水路中央から第 1 模型端 (右岸側端) までは 0.5cm 間隔で 9~11 断面、模型端からは 1.0cm 間隔で 3 断面、2.0cm 間隔で 3 断面の計 15~17 断面設定した。鉛直縦断面の断面数が統一でないのは、横断方向配置間隔  $dy$  がケースごとに異なり、水路中央から第 1 模型端 (左岸側端) 間の断面数が変化するためである。この可視化画像は高速度カメラを用いて 1/200 秒間隔、1 断面につき 16 秒間 3201 枚の撮影を行った。PIV 解析には FlowExpert (カトウ光研) を用い、相互相関法により画像解析を行っている。

**3. 実験結果** 図-2 に case1, case4 の  $z=1.5\text{cm}$  における平均流速コンターを示す。第 1 模型間は流路の縮小による加速域、各模型の後方には低速域が形成され模型背後は逆流域となっている。この傾向は水深  $h=6.0\text{cm}$  でも同様に見られるが、 $h=2.5\text{cm}$  に比べ低速域は小さくなっている。これは、模型上を越流し加速

表-1 実験条件

case	流下方向 間隔 $dx$ [cm]	横断方向 間隔 $dy$ [cm]	水深 $h$ [cm]	流量 $Q$ [l/s]	断面平均 流速 $Um$ [cm/s]	フルード数 $Fr$	勾配 $I$
1	3.0	2.0	2.5	0.48	6.41	0.129	1/2000
2		3.0					
3		4.0					
4	2.0						
5	3.0						
6	4.0						
7	3.0	2.0	6.0	2.56	14.20	0.185	
8		3.0					
9		4.0					
10	2.0						
11	3.0						
12	4.0						
13	6.0	2.0	2.5	0.48	6.41	0.129	
14		3.0					
15		4.0					
16	2.0						
17	3.0						
18	4.0						
19			2.5	0.48	6.41	0.129	

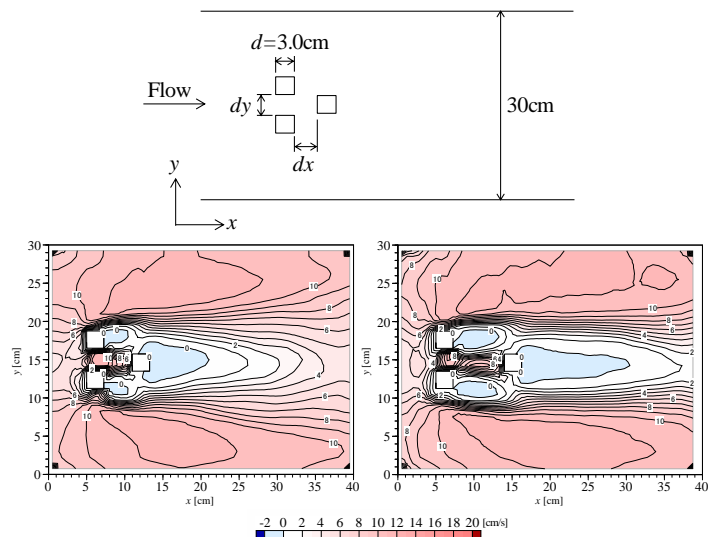


図-2 平均流速コンター (左: case1, 右: case4)

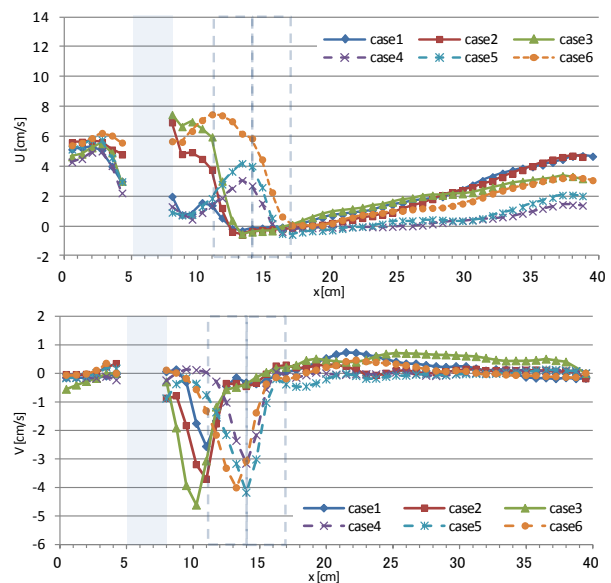


図-3 流速縦断分布 (上: 流速  $U$ , 下: 流速  $V$ )

した流れと第2模型後方に発生する上昇流が後流の影響を弱めたためと考えられる。case4における逆流のx方向長さは、case1の約2倍である。

図-3に $z=1.5\text{cm}$ における流下方向流速 $U$ 、横断方向流速 $V$ の第2模型側面 $y=13.5\text{cm}$ での縦断分布を示す。第1・第2模型間において、流下方向配置間隔 $dx$ 、横断方向配置間隔 $dy$ が大きいほど流速 $U$ は大きくなっている。これは、第1模型の横断方向間隔 $dy$ が大きくなったことから第1模型と第2模型間へ流れ込む流量が増加したためだと考えられる。また、横断方向配置間隔 $dy$ が大きいほど流速 $V$ の絶対値も大きくなるが、流下方向配置間隔 $dx$ が大きくなると流速 $V$ の絶対値は小さく、第2模型前方での偏流角度が小さくなっている。これは、流下方向配置間隔 $dx$ が大きくなることで第1模型と第2模型の間が広くなり、流れが分散されたためだと考えられる。これらの傾向は水深 $h=2.5\text{cm}$ 、 $6.0\text{cm}$ ともに見られ、水深 $h=6.0\text{cm}$ では、第1・第2模型間を抜ける流れは下降流となる。第2模型後方の流速 $U$ の回復はcase4、case5が他に比べ緩やかで、流速コンター図でcase4の低速域がcase1に比べx方向に大きいことと一致する。

図-4に $z=1.5\text{cm}$ における横断方向流速 $V$ の第2模型側面 $y=13.5\text{cm}$ での第2模型以降の縦断分布を示す。横断方向間隔 $dy$ が大きいほど流速 $V$ の絶対値は大きく、水路中央へ向かう流れが強いといえる。これは、横断方向間隔 $dy$ が大きいほど第1・第2模型間を抜ける流れが強くなり、それに伴い水路中央へ向かう流れも強くなったと考えられる。case4、case5は大きな変化がなく、他のcaseに比べ水路中央へ向かう流れが弱いことがわかる。このことが模型後方の低速域範囲に影響を与えていると考えられる。

このように形成される低速域の特性を調べるため、水深 $h=2.5\text{cm}$ 、 $z=1.5\text{cm}$ における16秒間平均流速の面積占有率のヒストグラムを図-5に示す。ヒストグラムに用いた平均流速データは、模型後流の影響に注目するため第1模型後方 $x=8.0\text{cm}$ 以降のデータを採用している。全体的に3つのピークを持ち、3つの分布が混在していることがわかる。流下方向配置間隔 $dx$ によらず共に、 $10.0\sim 11.0\text{cm/s}$ で最大ピーク、次いで $4.0\sim 6.0\text{cm/s}$ 、 $0\sim 1.0\text{cm/s}$ でピークをとっている。 $0\sim 1.0\text{cm/s}$ は模型背後の低速域、 $4.0\sim 6.0\text{cm/s}$ は低速域からの流速の回復部、 $10.0\sim 11.0\text{cm/s}$ は主流速部の分布を表している。横断方向配置間隔 $dy$ による違いは、低速域の規模の違いからcase4~5の $0\sim 0.1\text{cm/s}$ 分布が多いものの大きな違いは見られない。表-2に各断面におけるcaseごとの標準偏差を示す。標準偏差は、流下方向配置間隔 $dx$ が大きく、横断方向配置間隔 $dy$ が小さいほど大きな値となっており、流速のばらつきが大きいといえる。また、

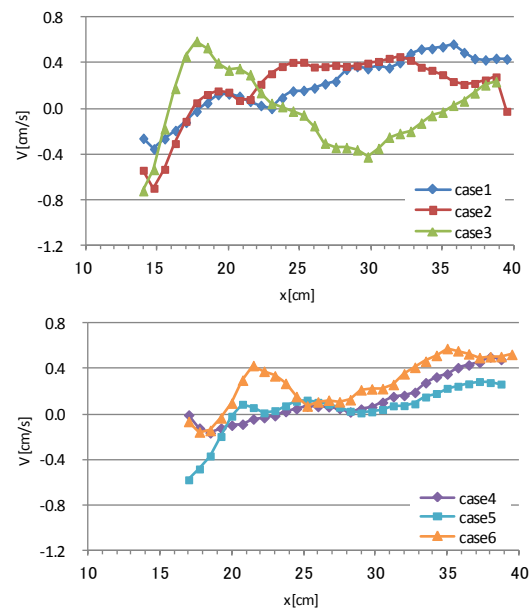


図-4 流速 $V$ 縦断分布

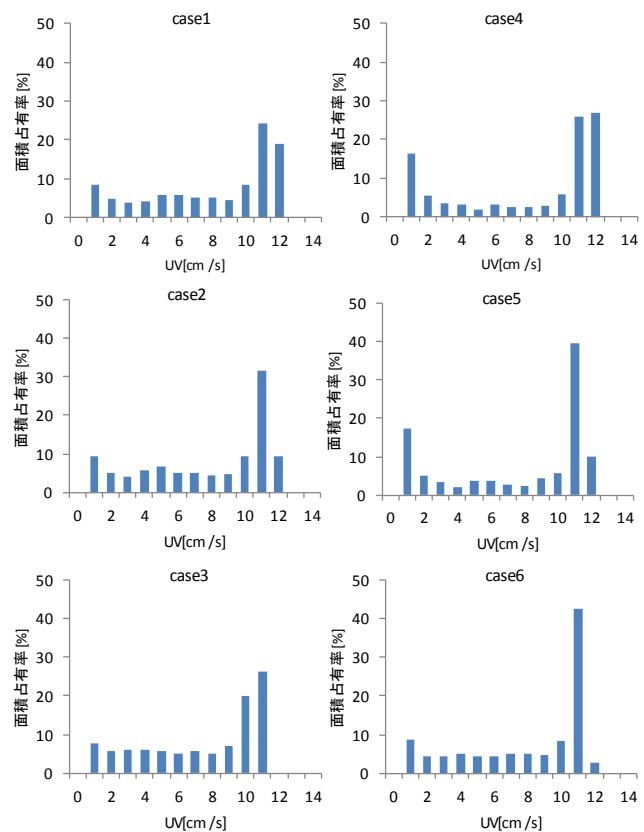


図-5 流速の面積占有率

表-2 標準偏差

$z$ [cm]	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case13	case14	case15
0.5	3.434	3.462	2.939	3.723	3.438	3.401	3.017	2.517	2.282
1.0	3.719	3.657	3.281	4.244	3.944	3.650	3.319	2.816	2.716
1.5	3.720	3.728	3.421	4.307	4.235	3.659	3.328	2.999	2.823
2.0	3.912	3.697	3.466	4.043	3.795	3.639	3.357	3.124	2.802

水面付近ほど標準偏差は大きくなる傾向にある。設置模型数の違いは、3つ配置したcase1~6の方が2つ配置したcase13~15に比べ標準偏差が大きい。case13~15においては、横断方向配置間隔 $dy$ が大きくなるにつれ後流の干渉が弱まることで低速域の分布が減少する傾向

が見られた。case1~6 では後流の干渉部に模型を置いたことで、横断方向配置間隔  $dy$  が後流の干渉に与える影響を減らすことができ、低速域を一定割合確保することが可能となった。

次に、模型後流域はカルマン渦の影響により周期的な変動特性を示すことから、流速  $u, v$  の時間変化と自己相関関数、ストローハル数について検討した。自己相関関数は不規則変量  $x(t)$  の周期を調べるために用いられ、以下のように定義される。

$$C(t, \tau) = E[x(t)x(t+\tau)] \quad (1)$$

$\tau$  は遅れ時間、 $E$  はアンサンブル平均である。ストローハル数は振動現象の周波数を表す無次元量で以下の式で表され、角柱の場合は約 0.16 であることが知られている。

$$St = \frac{D}{UT} \quad (2)$$

$D$  は模型の横断長さ、 $U$  は平均流速、 $T$  は流速変動の周期である。模型 1 つを設置した case19 において渦周期は 3.0sec であり  $St=0.156$  となる。図-6 に水深  $h=2.5\text{cm}$ 、 $z=1.5\text{cm}$  の自己相関関数の領域区分を示す。 $v$  はカルマン渦などの影響により後流域において広く周期性を持っており、 $u$  も後流域にて周期性を持つが分布は限定的である。模型後方では組織渦が発生し、それに伴い後流は模型を中心として横断方向に振れる。第 2 模型後方の領域①は組織渦の発生により  $v$  に 5.0sec の周期が見られ、後流が横断方向に振れることから  $v$  の変動の正負いずれのピークにおいても  $u$  は周囲の高速流が輸送され正のピークをとり、 $u$  の周期は  $v$  の半分の 2.5sec となる。第 2 模型斜め後方の領域②は後流の影響を受け  $u, v$  とともに 5.0sec 程度の周期をもつ。これは、渦が発生することで  $v$  が正のとき周囲の高速流が輸送され、 $v$  が負のとき後流域の低速流が輸送されるためである。この領域において  $St=0.16$  となるには  $D=5.1\text{cm}$  とみなすことになる。第 1 模型斜め後方の領域③は  $u, v$  とともに 1.8sec 程度の周期が見られる。この場合、 $D=1.8\text{cm}$  に相当し渦発生メカニズムが変わることを示唆している。模型側方から側壁側にかけての領域④は不規則に短い周期で変動しているが  $u, v$  とともに周期は見られず主流速領域になっている。 $u$  と  $v$  には強い相関があることがわかる。

**4. 数値計算** 得られた実験結果を基礎データとして数値シミュレーションにより、さらに多様な模型の配置方法について検討する。数値計算の基礎方程式には、水深平均された開水路平面 2 次元流れの運

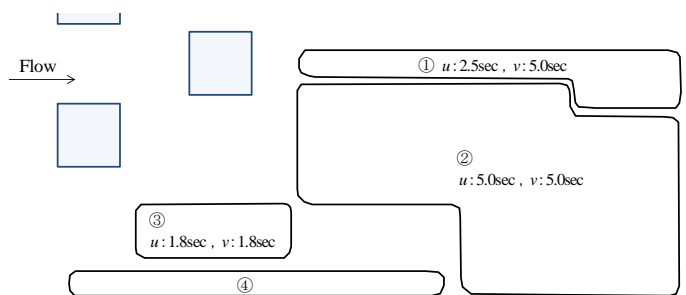


図-6 自己相関関数の領域区分

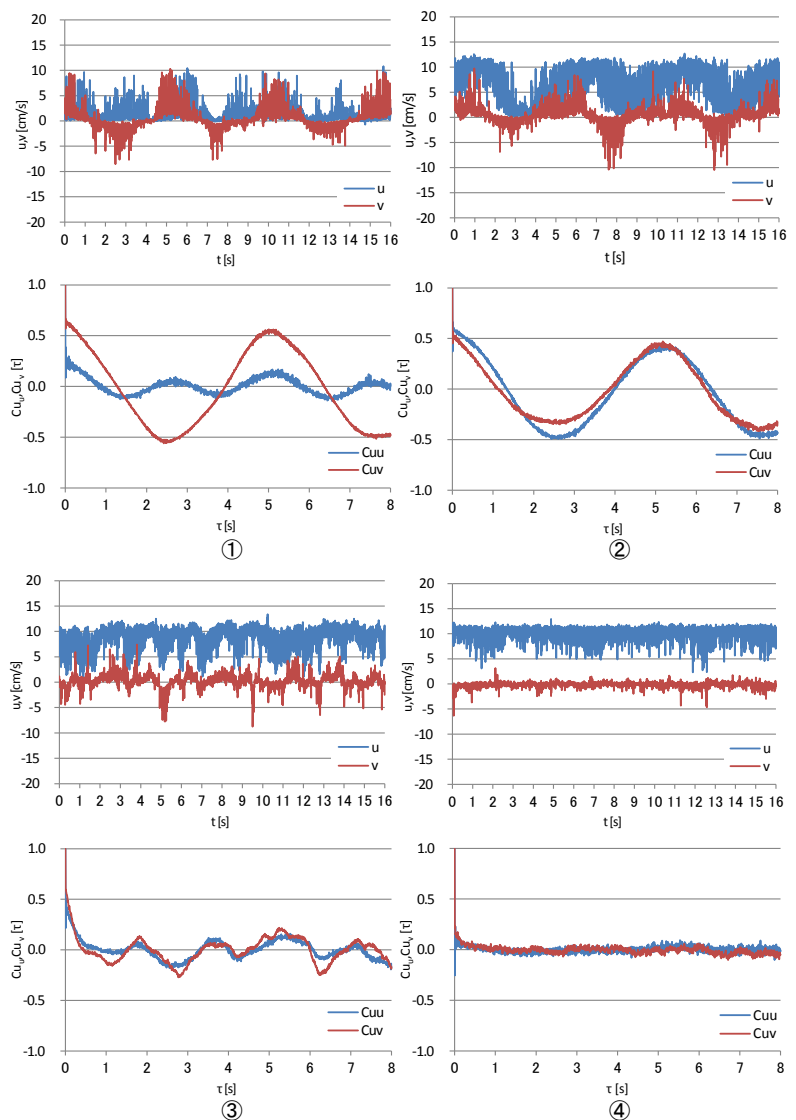


図-7 時系列変化 (上:流速  $u, v$ , 下:自己相関関数)

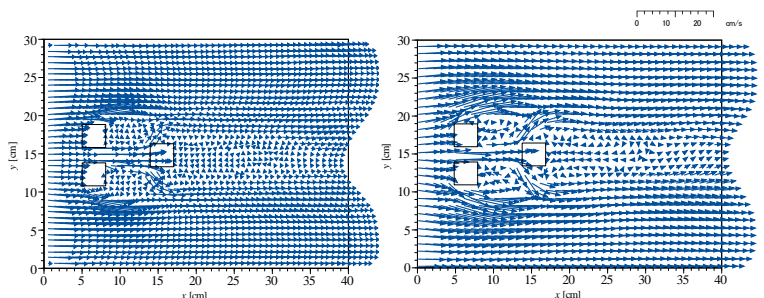


図-8 case4 の流速ベクトル (左:実験, 右:数値計算)

動方程式及び連続式を用いた。

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu u}{\partial x} + \frac{\partial hu v}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hu v}{\partial x} + \frac{\partial hv v}{\partial y} = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \quad (4)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$\tau_{bx}$ ,  $\tau_{by}$  は  $x$ ,  $y$  方向の底面せん断応力,  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{yy}$ ,  $\tau_{xy}$  は水深平均レイノルズ応力である。乱流モデルには水深平均の  $k-\epsilon$  model を使用した。図-8, 図-9 に case4 における実験及び数値計算から得られたベクトル図とコンター図を示す。数値計算は実験結果に比べ、模型前方での偏流や模型背後の逆流の影響がやや大きく出ているものの、流れ特性については概ね再現できている。そこで、模型の設置数を増やし横一列や格子状、千鳥格子状に配置した場合について検討する。実験結果から横断方向配置間隔  $dy=2.0\text{cm}$  において最も流速のばらつきが大きくなったことから、横断方向配置間隔  $dy=2.0\text{cm}$  の場合の数値計算結果について見ていく。case1, case4, の模型数を 5 つにした場合をそれぞれ case1', case4', case1 の模型数を 6 つにし格子状に配置した場合を case1'', case13 の模型数を 3 つにした場合を case13' とする。図-10 に数値計算による流速コンターを、図-11 に流速の面積占有率を示す。図-5 の実験結果による面積占有率と同様、case1', case4' は 3 つのピークを持っている。実験結果に比べ設置模型数が増えたことから、主流速部の分布が減り低速部の分布が増加している。case1'', case13' は格子状、横一列に配置しているため模型間での加速域が後流まで影響し、低速域における分布の偏りの流速範囲が広がる。その影響は流速の面積占有率にも表れており、千鳥格子状配置に比べ流速の分布ピークは低速域に偏っている。表-3 に数値計算による標準偏差を示す。横断方向配置間隔  $dy$  が大きくなるほど標準偏差は小さくなっており、実験結果の傾向と一致する。しかし実験結果では case4, case5 の逆流域が他に比べ大きく標準偏差も大きくなったのに対し、計算結果ではこのような傾向が見られなかった。配置形状は、千鳥格子状配置の方が格子状配置、横一列配置に比べ、流速のばらつきは大きくなることがわかった。一方で低速域規模については格子状配置、横一列配置の方が大きくなっている。

**5. おわりに** 本研究では、巨石の流下方向配置間隔と横断方向配置間隔を変化させることで流速分布や低速域の規模に影響を与えることがわかった。配置形状については、千鳥格子状配置は流速のばらつき、横一列配置は低速域の確保に高い効果が期待できるため、実際に現場で配置する場合はそれぞれの現地に期待する効果に合わせ配置方法を選択する必要がある。今後

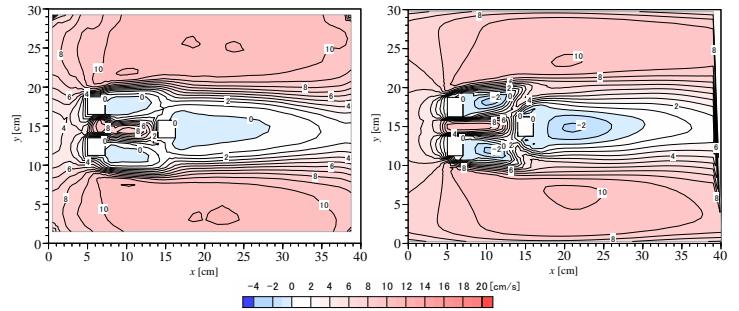


図-9 case4 の流速コンター (左:実験, 右:数値計算)

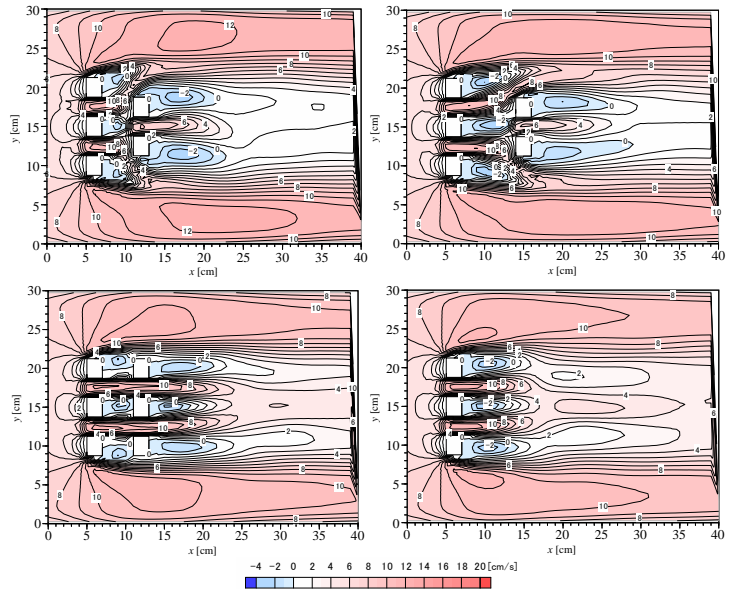


図-10 数値計算による流速コンター (上:case1', case4', 下:case1'', case13')

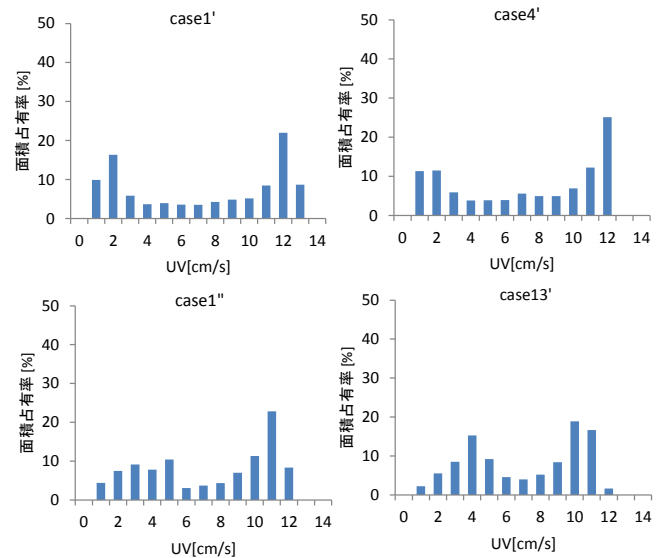


図-11 数値計算による流速の面積占有率 (上:case1', case4', 下:case1'', case13')

表-3 数値計算による標準偏差

case1'	case2'	case3'	case4'	case5'	case6'	case1''	case4''	case13'	case14'
4.418	4.007	3.658	4.132	3.849	3.574	3.566	3.763	3.386	3.067

は、3次元流れの数値計算や現地観測などについても検討を行い、巨石の設置が流れに与える影響を解明することが実用化の上で必要と考えられる。