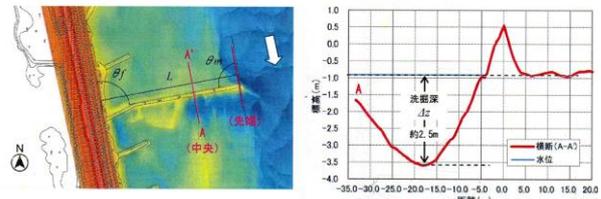


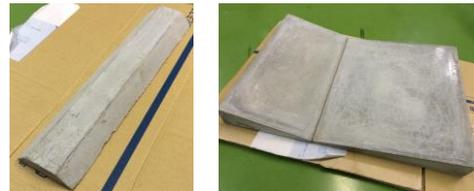
1. はじめに 治水・環境の両面に配慮した河川工法として水制の設置が注目されているが、水制は周辺の局所洗掘により破損するなどして、長期的な水制の効果が見込まれない場合がある。長期的に機能する水制の成功例として木曽川下流部に設置されているケレップ水制群がある。この水制群の間にはワンドが生成しており、多様な生態系と良好な河川環境が形成されている。このケレップ水制群は高水敷上に設置されており、水制直後で局所洗掘が発生しているが、この洗掘の発生機構は未だ解明されていない。今後の維持管理や治水・環境の両面に配慮した水制の設置を提案するには、ケレップ水制周辺の流れ構造の解析が必要不可欠である。本研究では高水敷上に設置された大規模水制の維持管理を目的として、河床が大きく変動する出水時に注目し、実験水路及び数値解析を通じて、越流流れによる水制直下洗掘内部の流れ構造の把握及び、洗掘発生要因の検討を行った。

2. 木曽川水制下流の洗掘形状 木曽川の水制周辺では、航空レーザー測量とスワス式音響測深が実施され、水制下流の洗掘形状が明らかになっている¹⁾。水制の形状特性を図-1に示す。図-1に示す水制では、水制中央から先端下流部の長い範囲において、最大洗掘深約2.5mの洗掘が下流後方約30m付近まで発生している。この洗掘が発生する要因の一つとして水制の長さが重要であることが指摘されている。

3. 実験方法 水制周辺の河川状況を実験水路で再現することは困難であるため、極限状態として2次元的水流を抽出し、水制中央部付近の越流流れの特性を検討することを目的に2次元水路実験を行った。また、実際の複断面河川状況を模擬した水制と洗掘モデルを用いて、高水敷上に設置された水制の先端付近の流れ構造を把握するため、複断面実験を実施した。図-2に使用した水制及び洗掘のモデルを示す。水制は幅29.8cm、上底3cm、底辺6cmの台形断面とした。洗掘モデルは幅29.8cm、長さ40cm、深さ3.5cmとし、最深部は水制下流部から15cmの地点に設けた。水制・洗掘モデルともにセメントで制作した。2次元水路実験では全長7.5m、全幅0.3m、勾配1/2000の勾配可変開水路を用いた。2次元水路実験の条件を表-1に、水路の概略図を図-3に示す。実験では水路上流端から4mの区間と、4.4m~6.4mを長さ200cm、幅14.9cm、厚さ2.1cmの塩化ビニル板12枚で敷きつめた。さらに、塩化ビニル板上に珪砂を吹き付けた幅29.8cm、厚さ0.4cmの鉄板を設置することで粗度を表現し、上流端から4mの地点に水制を設置した。本実験水路では無限長の水制を仮定し、その中央部の流れを表現している。本実験では水制背後に洗掘モデルを有するケース(A)と



(a) 河床コンター (b) 水制周辺の河床形状
図-1 木曽川ケレップ水制の洗掘形状



(a) 水制モデル (b) 洗掘モデル
図-2 使用模型

表-1 2次元水路実験水理条件

case	流量 Q (lit/s)	水制上流側水深 h_u (cm)	水制下流側水深 h_d (cm)	洗掘形状	勾配 I
Q1h1A	0.90	3.0	2.1	A 有	1/2000
Q1h2A		3.0	2.6		
Q1h3A		3.2	3.1		
Q2h1A	1.70	3.8	2.1		
Q2h2A		3.8	3.1		
Q2h3A		4.1	3.9		
Q3h1A	2.90	4.5	2.9		
Q3h2A		4.6	3.8		
Q3h3A		5.1	5.0		
Q1h1B	0.90	2.9	2.1	B 無	
Q1h2B		2.9	2.6		
Q1h3B		3.2	3.2		
Q2h1B	1.68	3.7	2.6		
Q2h2B		3.8	3.4		
Q2h3B		4.2	4.0		
Q3h1B	2.86	4.4	3.2		
Q3h2B		4.5	4.0		
Q3h3B		5.6	5.5		

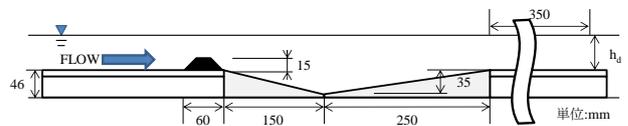


図-3 2次元水路実験水路概略図

表-2 複断面実験水理条件

case	流量 Q (lit/s)	水深 h (cm)	流速 u (cm/s)	洗掘形状	勾配 I
Q1h3	3.12	7.8	9.4	有	1/2000
Q2h3	5.48	8.8	14.3		
Q3h3	8.52	9.7	19.3		

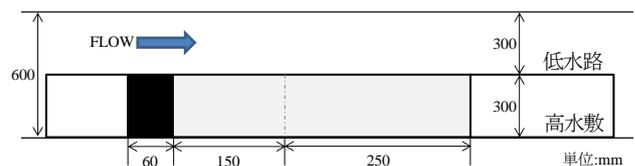


図-4 複断面実験水路概略図

水制設置初期状態を模擬した、洗掘モデルを持たないケース (B) を設定した。本稿では紙面の都合上ケース (A) の結果のみを記載する。上流端から 4.75m 地点の水深 h_d を計測し、越流状態に合わせて 3 パターン、流量を 3 パターン計測した。PIV 計測の流れの可視化には、直径 80μ 、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鉛直断面に照射した。レーザーシートの照射位置は、水路中央部である $y=15\text{cm}$ の 1 断面のみとした。この可視化画像は高速カメラ (ライブラリー) を用いて 1/200s 間隔で撮影した。FlowExpert (カトウ光研) PIV 解析ソフトを用いて直接相互相関法により画像解析し、3200 データ 16 秒間平均値を秒速ベクトルデータとした。複断面実験では全長 7.5m、全幅 0.3m、勾配 1/2000 の勾配可変開水路を用いた。複断面実験の条件を表-2 に、水路の概略図を図-4 に示す。実験では 2 次元水路実験で用いたものを上流端から右岸側に設置した。流速は 2 成分電磁流速計を用いて計測した。

4. 実験結果と考察

4-1. 2 次元水路実験 図-5 に case Q3h1A, Q3h3A における x - z 平面流速ベクトルを示す。水制前後の水位差が最も大きい case Q3h1A では、流れが水路底面付近を速い速度で流下していることから、水制を乗り越えた際に射流に遷移したことが分かる。その後、 $x=20\text{cm}$ 前後で上昇流となり、一部の流れは水面付近で上流方向の流れを形成し、反時計回りの渦を形成している。この流れ形状は **plunging jet flow** と呼ばれ、堰の完全越流時に生じるものと同様である。このケースの流れは水路底面付近を速い流速で流下するため、底面において特に洗掘が発生することが予想される。しかし、現地で本ケースのように水制前後の水位差が大きくなる場合は稀であると考えられ、この流れは非定常時においてのみ瞬間的に発生すると推察される。case Q3h3A では、水制直下の流れは水面付近を流下していることから、流れは水制を乗り越えた際に射流に遷移しなかったことが見て取れる。また、底面付近では上流方向へと向かう流れが形成され、主流と比較して流速が小さい時計回りの渦が生じる。この流れは堰のもぐり越流時にも確認される。横断渦は小さいながらも洗掘の要因となりうると考えられ、現地観測においても同様の渦の存在が確認されている。また、洗掘モデル内部の流速は全体を通じて小さく、低速域となっていることがわかる。case Q3h2A では水制直後の水面に定常波が発生したが、それを除く流れ構造は case Q3h3A と同様であり、洗掘モデル内部においても横断渦が形成が確認された。

図-6 に水深 h_d における $x=15\text{cm}$ での流量で比較した無次元流速 U の鉛直分布を示す。図から、水制中央部付近を乗り越える流れは流量に依存せず、全てのケースにおいて同様の流れ構造を有していることが分かる。また、

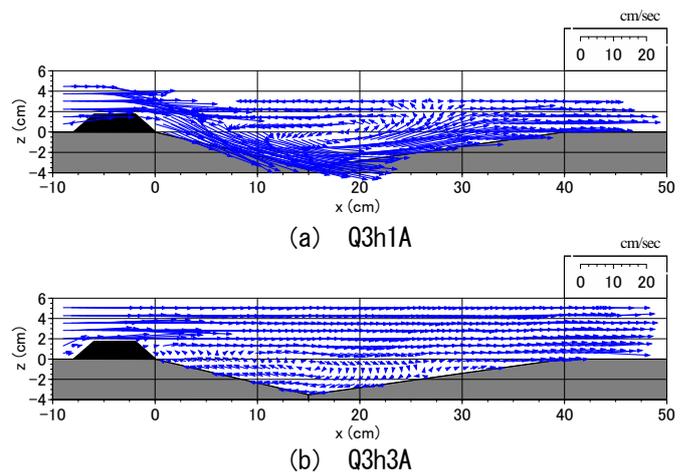


図-5 2次元水路実験流速ベクトル

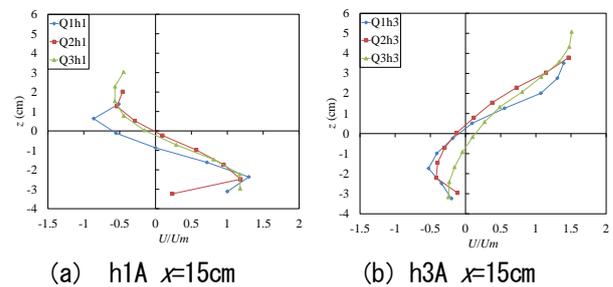


図-6 2次元水路実験 流速 U 縦断分布流量比較

下流端水深によって流れ形状が大きく変化していることがこのグラフからも確認できた。

4-2. 複断面実験 図-7 に複断面実験 case Q3h3 の各断面における流速ベクトルを示す。断面 $z=3\text{cm}$ における x - y 平面流速ベクトルでは、水制先端付近の低水路においては高水敷上から低水路へと流入する流れが存在する。これは、水制の水はね効果によるものであると考えられる。一方、洗掘モデル内部には低水路からの強い流入と、これによって誘起された鉛直渦の存在が確認できる。高水敷底面付近 $z=5.6\text{cm}$ においては、水制の上流側では流れを高水敷上から低水路へと誘導する水はね効果が確認できる。また、水制直下では洗掘モデル内部から低水路へと流出する流れが発生している。この流れは洗掘モデル内部に存在する鉛直渦と、水制を乗り越えた流れが水制背後へと下降した際に発生する横断方向への 2 次流との合成流によって生じたものと思われる。一方、洗掘モデル後部では、低水路から流入した流れの影響を受け、河岸側へと向かいながら流下していく。洗掘モデル中央付近における y - z 平面流速ベクトルでは、他の流速と比較し、低水路から流入し、底面に沿って河岸方向へと向かう卓越した流れが生じている。この流れにより、洗掘モデルと低水路との境界では洗掘が進行すると予想される。一方、水面付近の流れは特に $y=25\text{cm}$ 付近から洗掘内部へと下降し、低水路から流入した流れに巻き込まれるようにして洗掘モデル内部へと向かう。これらの流れによって洗掘モデル内部では縦断方向の渦が生じている。 x - z 平面流速ベクトルでは、水制上流側において水制を乗り越え

る流れが確認でき、この流れの一部は洗掘モデル内部へと下降し、低水路から流入した流れとともに洗掘モデル内部において底面付近で上流向きの流れを形成し、横断方向を軸とする時計回りの渦を形成している。この横断渦は2次元水路実験で確認されたものと同様のものであると考えられる。横断渦による逆流は水制直下まで達し、ここで水制を乗り越えた流れと合流していると思われる。一方、洗掘モデル後方では底面に沿って高水敷へと流下する流れが存在している。これらのことから、洗掘モデル内部へと流入した流れは、水制直下および洗掘モデル後部から流出していくといえる。よって高水敷と低水路境界及び、横断渦によって生じる洗掘によって舞い上がる河床材料も同様の流れに沿って流出されると予想される。

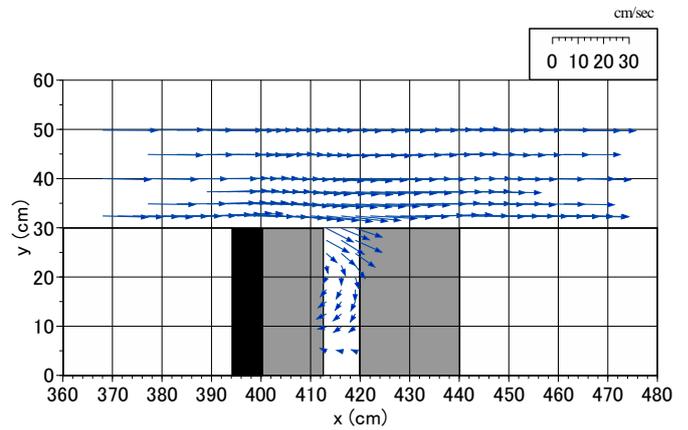
図-8 に示す $x=416\text{cm}$ における流速 V の横断分布では、全ケースにおいて低水路から洗掘モデル内部への流入する流れが卓越していることがわかる。また、流量が最も大きい case Q3h3 では洗掘モデル最深部まで達していることから、流量が多いケースほど洗掘モデル内部のより幅広い範囲に洗掘を拡大させる可能性がある。また、図-9 に示す洗掘モデル中央部における $y=15\text{cm}$ の流速 U の縦断分布より、本実験水路における流れ形状は流量によらずほぼ同様であると考えられる。

以上の実験結果から、特に洗掘モデルと低水路との境界付近において洗掘が発生することが示唆される。

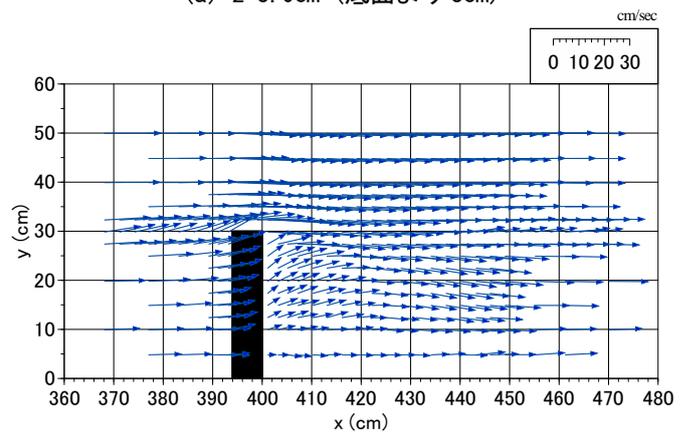
5. 数値計算 複断面実験において数値解析ソフトとの再現性を確認するため、水理条件等を複断面実験に合わせて数値計算を行った。また、複断面実験では計測が困難であった下流端水深がより小さいケースについて、その流れ構造の把握を目的に数値シミュレーションを実施した。計算は河川シミュレーションソフト iRIC のソルバーのうち3次元計算モデルである NaysCUBE を用い、乱流モデルには非線形 $k-\epsilon$ モデルを用いた。

5-1. 複断面実験と数値計算の再現性の確認 図-10 に数値計算によって得られた case Q3h3cal の各断面における流速ベクトルを示す。ベクトル図から、水制の水はね効果や水制を乗り越える流れ等、水制工周辺の基本的な流れ特性がよく表現できている。また、洗掘モデル内部では横断渦・縦断渦及び、低水路・水面近傍からの流入や水制直下及び洗掘モデル後方での流出等、複断面実験で確認された本洗掘モデル内の流れ構造が再現されている。さらに図-11 に示す、洗掘モデル中央部における流速 U の鉛直分布では、実験結果と数値計算の結果は水面付近を除いてほぼ一致している。以上のことから、複断面実験における本数値計算ソフトの再現性が確認されたといえる。

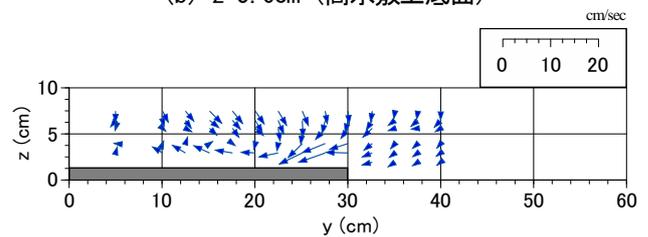
5-2. 数値シミュレーションの結果と考察 複断面実験を模して、下流端水深を減少させ数値シミュレーションを行った。図-12 に case Q3h2cal の計算結果を示す。下流



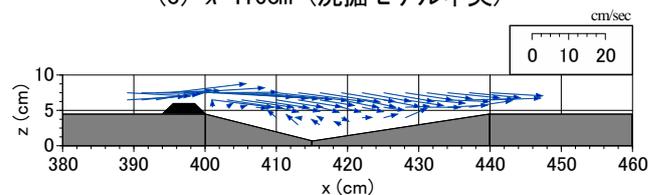
(a) $z=3.0\text{cm}$ (底面より 3cm)



(b) $z=5.6\text{cm}$ (高水敷上底面)

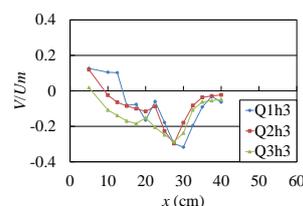


(c) $x=416\text{cm}$ (洗掘モデル中央)

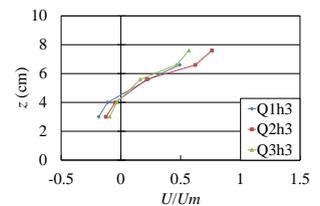


(d) $y=15\text{cm}$ (洗掘モデル中央)

図-7 各断面流速ベクトル (case Q3h3)



(a) $z=3\text{cm}$ ($x=416\text{cm}$)



(b) $y=15\text{cm}$ ($x=416\text{cm}$)

図-8 流速 V 横断分布 図-9 流速 U 縦断分布

端水深が小さくなった case Q3h2cal では、case Q3h3cal よりも流速が大きくなり、洗掘モデル内部に発生する横断渦・縦断渦の規模は大きくなっていることがわかる。

x-z 断面においては、主流からの下降流が強まっていることが確認できる。しかし図-13 に示すように、case Q3h2cal の水面付近では2次元水路実験で確認された定常波は発生しておらず、流れ構造そのものに大きな差異はないといえる。このことから、本実験模型では定常時に水制前後において水位差は生じず、2次元水路実験で確認された下流端水深によって左右される大きな流れ構造の変化は発生しないと考えられる。現在、下流端水深が小さい case h1 については数値計算を行うことができておらず、水制周辺の流れ構造を把握するためには更なる検討が必要である。

6. まとめ

6-1. 大規模水制中央付近の越流流れ構造と洗掘要因

2次元水路実験における凹部を有するケースでは、完全越流には水路底付近を流下する流れ、それ以外では水面付近を流下する流れの存在を確認することができた。どちらの流れにおいても渦の向きは異なるが横断渦の発生を確認できた。このことから、本洗掘モデル内部では越流時に、水制を乗り越えた流れによって洗掘が進行する可能性があると言える。しかし、実河川の水制周辺では完全越流が発生する機会は稀である点、現地では越流流れのみでなく、多様な流れが複雑に絡み合うことで洗掘機構を構成している点には注意が必要である。

6-2. 洗掘モデル内部における3次元流れ構造と洗掘要因

複断面実験より、高水敷上に設置された水制直下の洗掘モデル内部では、横断渦を含む3つの渦が存在し3次元の複雑な流れ構造を有していることが分かった。また低水路と水面近傍から洗掘モデル内部に流入する流れは卓越しており、これらの流れによって洗掘が発生し、洗掘モデルは維持されていると思われる。また、洗掘によって生じた河床材料は渦によって水制直下から低水路及び水面付近へ、もしくは洗掘モデル底面に沿って高水敷上へと輸送されると考えられる。特に洗掘モデル後部へと輸送する流れは、本洗掘モデル特有の流れであるといえる。

6-3. 数値計算に関する考察 今回実施した数値計算では、実験結果を良好に再現できることを確認することができた。また、下流端水深を変化させたことで渦の規模の変化を確認することができた。しかし、シミュレーションを実施した範囲では大きな流れ構造の変化は生じず、新たな洗掘機構の発見には至らなかった。

本研究では、高水敷上に設置された水制周辺の流れ構造を把握した。今後は、実スケールにおいて水制長や水路幅等のパラメータを変化させることで、木曽川のケレップ水制をはじめとする、様々な条件下での水制周辺の流れ構造を解明していくことが望まれる。

参考文献

- 1) 伊藤猛, 富永晃宏: 大規模水制下流に発生する洗掘の発生機構に関する考察, 水工学論文集, 第59巻, 2015

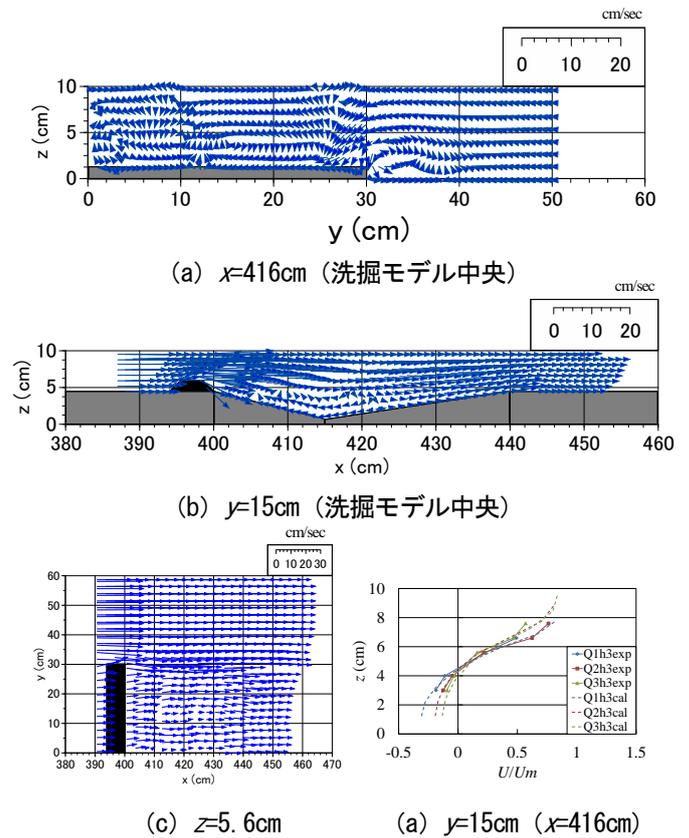


図-10 各断面流速ベクトル

図-11 流速 U/U_m 縦断面分布

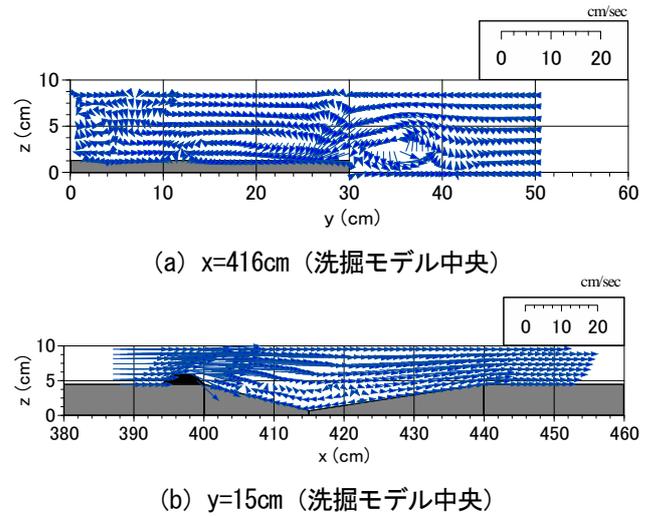


図-12 各断面流速ベクトル (case Q3h2cal)

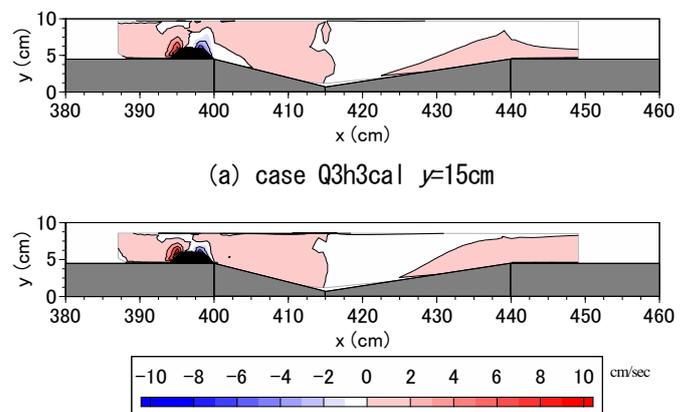


図-13 流速 V コンター