

# 洪水時に大量の土砂流入による流路変動を伴う河川の 流入土砂量ハイドログラフの推定法

## Estimation of the sediment discharge hydrograph in rivers with a large amount of sediment yield

16N3100011I 岡安 光太郎 (河川工学研究室)  
Kotaro OKAYASU/ River Engineering Lab.

**Key Words :** Hime River, sediment discharge hydrograph, sediment yield, bed variation

### 1. 序論

近年、大規模洪水により大量の土砂が河川に流入・堆積し、流路変動を伴う災害が報告されている。洪水時に大量の土砂流入を伴う河川の流路変動解析では、流入土砂量のハイドログラフは重要な境界条件を与えるものである。一般に土砂移動の少ない、または動的平衡に近い河川の河床変動解析の上流端境界条件には平衡流砂量を用いられるが、この条件を流入土砂量の多い河川に用いると解析精度が極端に低下する。今のところ、大量の土砂流入を伴う河川の土砂の境界条件を決める明確な方法はないのが実状である。

平成7年7月姫川大洪水では、上流山地から流入した大量の土砂が河道内に堆積し、河幅が広がり樹木群は流失し、堤防の浸食や破堤が生じる等、河道状況は一変した(図-1)。図-2(a) (b) (c)は昭和22年、平成5年、平成7年洪水後の姫川の航空写真を示し、図-3は昭和22年と平成7年の河幅縦断面を示す。昭和22年の航空写真には平成7年7月洪水後の砂州と樹木群、洗掘箇所を重ねて示している。洪水後の河幅と主流路は昭和22年の航空写真で見られる姫川の河道とほぼ対応している。このことは、平成7年7月洪水のように大量の土砂が流入すると、河幅や主流路の蛇行線形が以前の河道に戻ることを示しており、大規模洪水による災害軽減のためには、大規模な流路変動を知る必要がある。従って、解析の境界条件となる流入土砂量のハイドログラフを推定することは重要な課題である。

本研究では、平成7年7月姫川大洪水の河道内の大規模土砂堆積と流路変動を引き起こした、流入土砂量ハイドログラフと樹木群流失の時間帯を洪水流・河床変動解析により検討し、土砂の境界条件となる流入土砂量ハイドログラフを見積もる実用的な方法を構築することを目的とする。

### 2. 平成7年7月洪水の土砂堆積と流路変動

図-4は6.0kmにおける洪水前後の河床形状を示す。平成7年7月洪水では、洪水前に主流路であった河道中央に大量の土砂が堆積し、堤防際の砂州が樹木ごと洗掘され、そこに新たな主流路が形成された。図-2(b)は樹木群が流失した範囲を示し、図-5は洪水前後の河道内の土

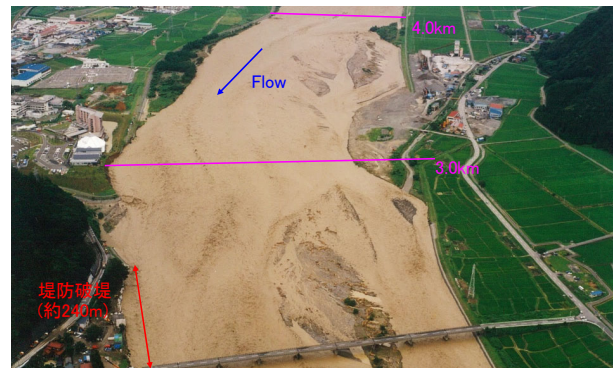
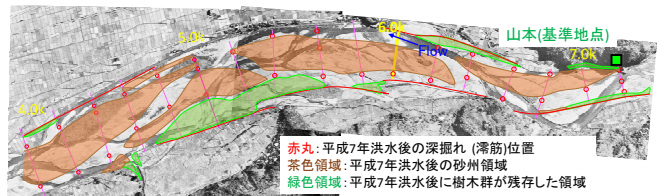
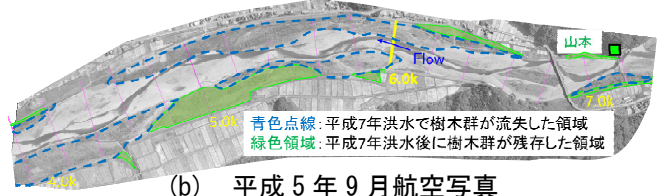


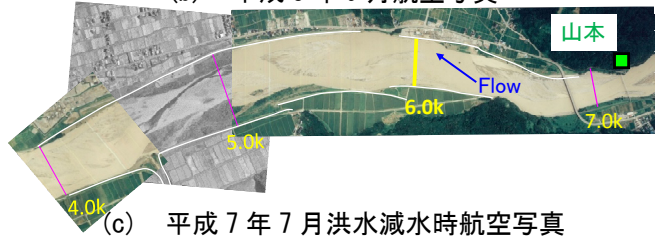
図-1 平成7年7月姫川大洪水航空写真



(a) 昭和22年航空写真



(b) 平成5年9月航空写真



(c) 平成7年7月洪水減水時航空写真  
(モノクロ写真は平成5年9月)

図-2 各年の航空写真

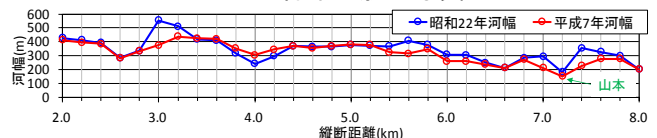


図-3 河幅縦断面

砂堆積量の縦断面図を示す。平成7年7月洪水では、河道内に大量の土砂が流入し、0.0km~7.2kmに約50万 $m^3$ の土砂が堆積した。図-6は洪水前後の粒度分布を示す。7.0kmでは洪水前の $d_{60}$ が約200mmに対して、洪水後は約

100mmに細粒化していることから、洪水時に細かい土砂が流入し大規模に堆積したことが分かる。従って次章の解析では、上流山地からの大量の細かい土砂の流入を考慮して、実測の河床高を再現するように流路変動解析を行い、流入土砂量ハイドログラフを推定する。

### 3. 大量の土砂流入を考慮した流路変動解析法と流入土砂量ハイドログラフの推定

本研究では、流入土砂量ハイドログラフと樹木群流失の時間帯を試行的に設定し、平成7年7月大洪水で生じた縦断的な河床上昇と主流路の変化を出来るだけ再現する解析結果を得ることにより、流入土砂量ハイドログラフを求め樹木群流失の時間帯を推定する。

#### (1) 解析方法と検討条件

解析検討区間は 7.3km から0.6km までとする。上流からの細かい土砂は浮遊砂とし、山地からの浮遊砂成分を発生させる区間(9.3km~8.8km)を設けた。浮遊砂は河床変動解析開始地点までの緩和区間(8.8km~7.3km)の流速分布に応じて、検討区間に供給される(図-7)。この緩和区間下流端の浮遊砂分布を検討区間の浮遊砂解析の上流端境界条件とした。浮遊砂発生区間は、姫川の検討区間の平均的な河幅と河床勾配に概ね一致させ、検討区間に輸送された浮遊砂が河道内に堆積するように設定した。流量ハイドログラフを与えると、浮遊砂発生区間の浮遊砂ハイドログラフが決まり、これを基準のハイドログラフとする。次に浮遊砂発生区間の浮上量を定数倍することにより、検討区間の実測平均河床高をほぼ再現するように流入土砂量を算定し、浮遊砂のハイドログラフを決める。流入土砂の粒度分布は既往論文<sup>1)</sup>を参考に与え、本川河床の初期粒度分布は河床材料調査結果を用いた(図-6)。洪水流解析は、複雑な河道条件での流れ場を精度良く解析出来る一般底面流速解析法<sup>2)</sup>を用いる。流れの上流端境界条件は、流出解析より得られた流量ハイドログラフ(図-8)を与え、下流端境界条件は富山湾の実測潮位を与えた。河床変動解析では、掃流砂の計算には芦田・道上式を用い、浮遊砂濃度の計算には、水深積分した平面二次元移流拡散方程式、鉛直濃度分布式には Lane-Kalinske の式、浮上量には板倉・岸の式、沈降速度式には Rubey の式をそれぞれ適用した。

#### (2) 流入土砂量ハイドログラフの推定

解析の第一ステップとして、流入土砂量ハイドログラフが流量ハイドログラフと同一の波形とし、異なる総流入土砂量を与えた場合(図-8のCase1~Case4)について検討する。本節では、樹木群は流量ピーク前(図-8のCaseA)に流失したと想定して解析を行う。図-9はCase1~Case4の平均河床高の変化の解析値と実測値を示す。Case1, Case2は実測の縦断的な河床高の上昇傾向を再現

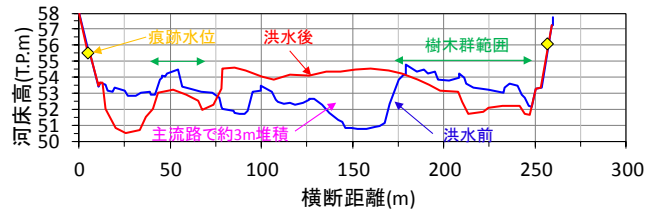


図-4 平成7年洪水前後の河道横断形状の変化(6.0km)

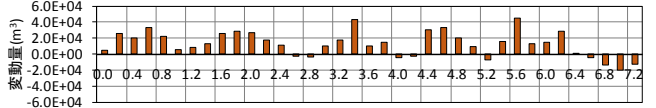


図-5 河道内土砂堆積量の縦断図

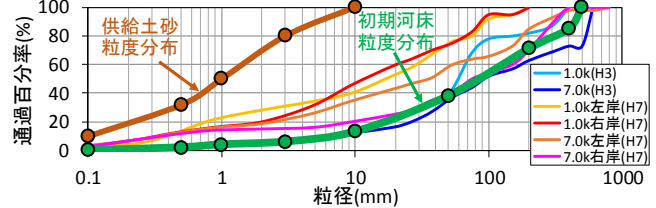


図-6 河床材料粒度分布

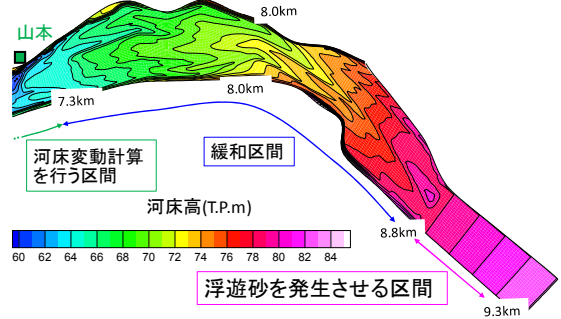


図-7 浮遊砂解析での上流端境界条件の与え方

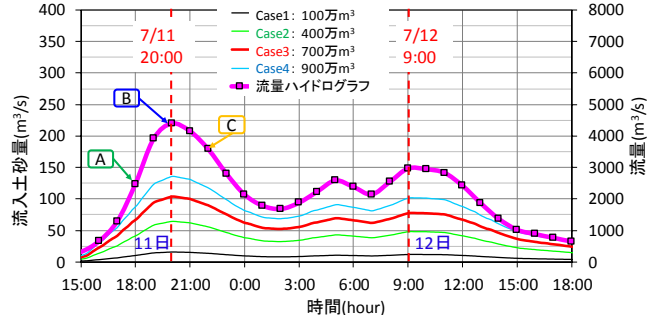


図-8 流量ハイドログラフと与えた流入土砂量ハイドログラフ(流量と同一波形)

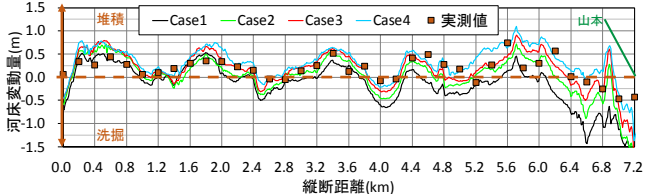


図-9 平均河床高の変化(Case1~Case4)

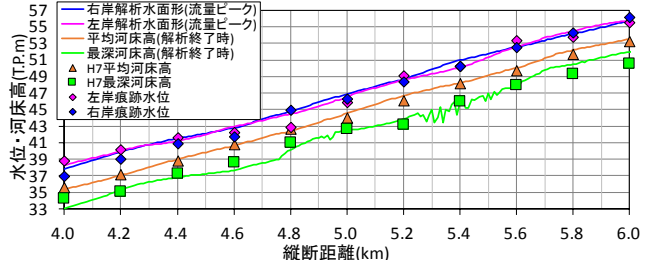


図-10 水位・河床高縦断図(Case3)

できておらず、設定した流入土砂量が少な過ぎることが分かる。Case4は実測と比較して河床高の上昇が大きいため、流入土砂量が多過ぎる。一方でCase3は実測の縦断的な河床高の上昇傾向を比較的良く再現し、その時の総流入土砂量は約700万 $m^3$ である。図-10はCase3における流量ピーク時の解析水面形と痕跡水位を示しており、解析水面形は痕跡水位の縦断分布をほぼ再現している。一方、Case3の主流路の移動については、洪水前に河道中央にあった主流路が堤防際に移動する実測の流路変動を再現できておらず、主流路が河道中央に位置したままである(図-11)。

次に解析の第二ステップに進む。ここでは、流量ハイドログラフに対する流入土砂量ハイドログラフの関係を考慮する。流量ピーク付近で姫川上流域の支川の土砂災害が集中的に発生していたことから<sup>1)</sup>、流量ピーク付近に大量の土砂が流入する土砂量ハイドログラフ(図-12のCase5, Case6)を与えて、流路変動がどのようになるかを検討した。図-13はCase5, Case6の平均河床高の変化の解析値と実測値を示す。Case3と同様に、総流入土砂量を700万 $m^3$ としたCase5の平均河床高は実測の縦断的な河床上昇の傾向を再現しているが、総流入土砂量を900万 $m^3$ としたCase6は河幅の広がる5.0~7.0km付近で実測より大きく河床高が上昇している。この総流入土砂量と縦断的な土砂堆積の再現性の関係は、流入土砂量ハイドログラフを流量ハイドログラフと同一波形としたCase1~Case4の検討結果とほぼ一致している。このことは、縦断的な土砂堆積の再現には流入土砂量ハイドログラフの波形よりも、総流入土砂量の影響が大きいことを示している。図-14はCase5の主流路の位置の時系列と実測値を示す。流量ピーク付近に大量の土砂が流入するハイドログラフを想定したCase5では、流量ピーク(7/11 20:00)では主流路の移動は見られないが、2波目ピーク(7/12 9:00)では5.0km~6.0km区間で主流路が河道中央から右岸堤防際に移動し明確な蛇行が見られるようになっている。図-15はCase3とCase5の河床変動量コンターを示す。黒の実線は洪水前の主流路を示しており、Case5はCase3と比べて5.0km~6.0km区間の洪水前の河道中央主流路に多くの土砂が堆積している。このような河道中央主流路への土砂堆積が主流路の蛇行を生じさせたことが分かる。

第三ステップでは、第二ステップに続いて総流入土砂量をCase5(700万 $m^3$ )と同一とし、流量ピークの2時間前に大量の土砂が流入する土砂量ハイドログラフ(図-12のCase7)を与え、Case5の解析結果と比較する。Case7の平均河床高はCase3・Case5と同様の総流入土砂量であるため、平均河床高の変化を再現している(図-13)。図-16はCase7の主流路の位置の時系列と実測値を示す。流量ピークの2時間前に大量の土砂が流入するCase7では、流量

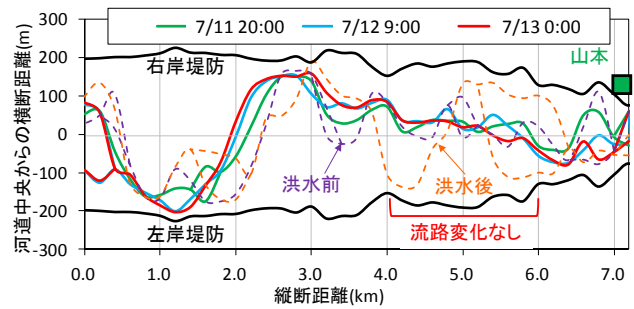


図-11 主流路位置の平面図 (Case3)

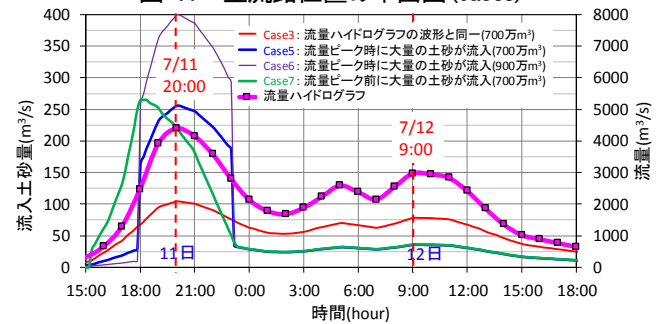


図-12 流入土砂量ハイドログラフ

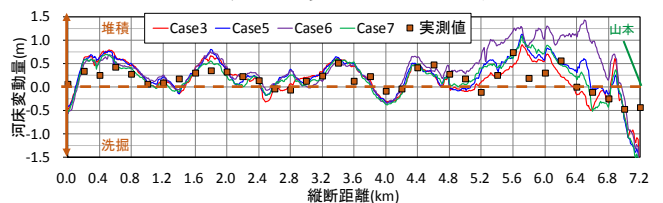


図-13 平均河床高の変化 (Case3, Case5~Case7)

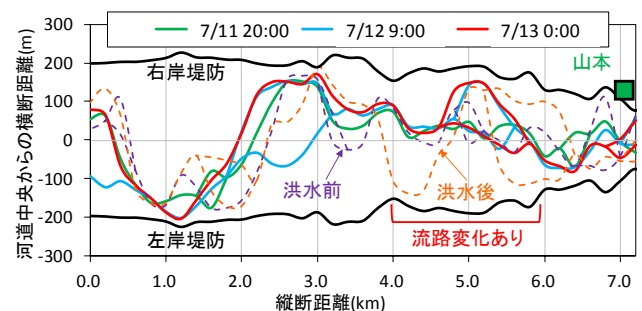


図-14 主流路位置の平面図 (Case5)

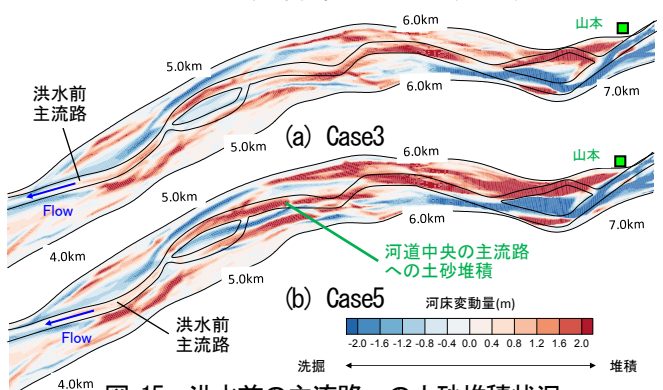


図-15 洪水前の主流路への土砂堆積状況

ピークに5.0km付近の右岸堤防際に主流路が既に発達し、その後5.0km~6.0kmの主流路が右岸側に移動する。Case5では4.5km~5.5kmの区間で洪水前の主流路が残っていたのに対して、Case7では主流路が右岸堤防際に完全に移動することを比較的良く説明している。

### (3) 樹木群流失の時間帯の推定

第四ステップでは、樹木群が流失した時間帯について検討する。樹木群が流失する時間帯は、図-8に示す流量ピーク前(CaseA), 流量ピーク時(CaseB), 流量ピーク後(CaseC)に樹木群が流失したと想定して計算した。ここで、流入土砂量ハイドログラフは、前節で縦断的な河床上昇と主流路の変化の傾向を説明したCase7とする。解析では、樹木群の影響は樹木群透過係数を用いた抵抗で評価し、樹木群流失の時間帯に樹木群の抵抗を0として樹木群の流失を考慮した。

図-17は洪水前後の主流路の位置の実測値と各解析終了時の主流路の位置を示す。各ケースの解析結果では、主流路の蛇行線形にほとんど違いが生じず、流量ピーク付近前後2時間程度の樹木群流失の時間帯の差では、主流路の発生位置に明確な差が見られない。このことは、大量の土砂流入が生じる河川の流路変動には、大量の土砂流入による大規模土砂堆積とそれに伴う流れが支配的であり、樹木群を大量に土砂が流入する時間帯に流失すると設定すれば、実測の流路変動を実用上説明出来ることが分かった。

以上より、実測の大規模土砂堆積を説明する流入土砂量ハイドログラフは、流量ピークの2時間前に大量の土砂が流入し、流入土砂量は約700万 $m^3$ (Case7)であると推定される。柘木ら<sup>1)</sup>は本洪水の総流入土砂量を約860万 $m^3$ と算定しており、本研究の推定値は概ね妥当であると言える。また、樹木群が流失する時間帯は流量ピーク付近であったことを推定した。

#### (4) 大量の土砂流入に伴い流路変動の生じる河川の流入土砂量ハイドログラフを推定するための解析法とその留意点

土砂の境界条件となる流入土砂量ハイドログラフを推定するための解析法の考え方を以下に示す。

まず、上流から流入する細かい土砂については浮遊砂として扱い、図-7に示す上流山地からの浮遊砂成分を発生させるための区間と、それを流速分布に応じて輸送する緩和区間を設けることにより、大量の土砂流入を考慮した流路変動の計算が安定的に出来るようにした。これらの区間は、検討区間の平均的な河床勾配と河幅に概ね一致するように設定することが重要である。また、流れ場の計算には、複雑な河道の計算にふさわしい洪水流解析モデルを用いる必要がある。

流入土砂量ハイドログラフの推定については、種々の現象が重層的に影響しあうため、段階的に検討していく必要がある。まず、Case3とCase5, Case7の比較より、総流入土砂量を同一として、異なる流入土砂量ハイドログラフの波形を与えても、その波形の差は縦断的な土砂堆積の算定にあまり影響を及ぼさなかった。このことから、総流入土砂量の推定のためには、実測の平均河床高の再現が重要であることが分かった。ま

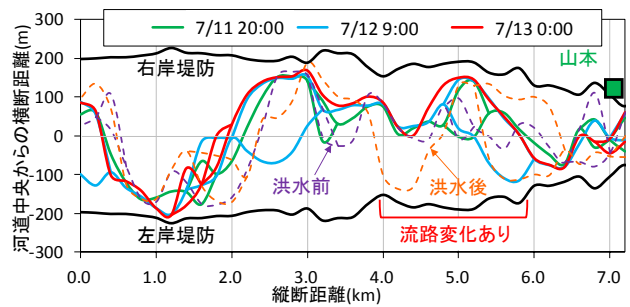


図-16 主流路位置の平面図(Case7)

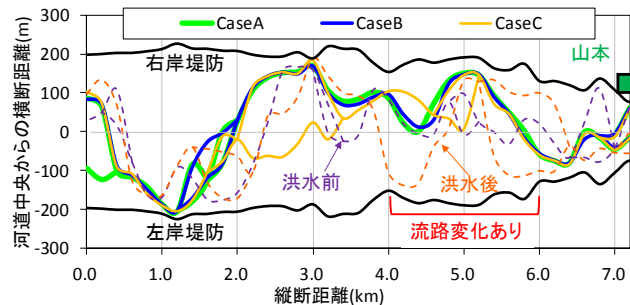


図-17 主流路位置の平面図(樹木群流失時間帯の比較)

た、流入土砂量ハイドログラフと土砂堆積、河道内蛇行の発達の関係より、大量の土砂が流入すると、河幅の広い区間の主流路に土砂が大規模に堆積し、これを契機として流路の蛇行が発達し始めることが分かった。このため、設定した流入土砂量ハイドログラフに対する解析の流路変動の応答を分析し、実測の流路変動を再現するように試行的に流入土砂量ハイドログラフの波形を設定し、これを繰り返すことにより流入土砂量ハイドログラフが推定可能となる。このように総流入土砂量については、与えられる流量ハイドログラフに対し、縦断的な土砂堆積量に着目し、流入土砂量ハイドログラフの波形については流路変動に着目し、それぞれ実測を再現するように段階的に洪水流・河床変動解析を行うことにより算定出来ることを示した。

また、土砂が大量に流入する時間帯に樹木群が流失したと設定すると、主流路の蛇行の発達が概ね説明出来ることが分かった。

#### 4. 結論

本手法により、大量の土砂流入を伴う流路変動の大きい河川における、洪水流量ハイドログラフに対する流入土砂量ハイドログラフの実用的な推定法と樹木群の流失等の設定方法を提示し、流入土砂量の多い河川の河道対応策のための重要な技術情報を与えることが出来た。

#### 参考文献

- 1) 柘木敏仁, 水山高久, 佐藤一幸, 村上正人: 土砂生産のタイミングを考慮した土砂生産・流出に関する研究, 砂防学会誌, Vol. 59, No. 5, p. 15-22, 2007.
- 2) 内田龍彦, 福岡捷二: 非平衡粗面抵抗則を用いた一般底面流速解析法の導出と局所三次元流れへの適用, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol. 71, No. 2, pp. 43-62, 2015.