

大規模洪水時における砂州の発達に伴う洪水流の三次元エネルギー分布の変化に基づく河川構造物の被災機構

洪水全エネルギー 砂州の変形・発達 洪水流・河床変動解析 中央大学研究開発機構 正会員 ○後藤 岳久
中央大学研究開発機構 正会員 後藤 勝洋
中央大学大学院 学生会員 加藤 宏季
中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 序論

近年、洪水時の水位が計画高水位を超過する、または堤防天端高さに匹敵するような大規模洪水が起こっており、このような、大規模洪水に備える河道と堤防の一体設計を行う必要がある。これには洪水時の水位・河床高に速度水頭と圧力の非静水圧水頭を加えた洪水の全エネルギー水頭分布の時空間変化を理解することが重要である¹⁾²⁾。

洪水の全エネルギー水頭 $H_{all}(x, y, t)$ は、洪水の三次元エネルギー水頭 $H(x, y, z, t)$ が式(1)で定義されることから、その地点の三次元エネルギー水頭 $H(x, y, z, t)$ を底面から水面まで積分することにより式(2)で評価される。

$$H(x, y, z, t) = \frac{u^2(x, y, z, t) + v^2(x, y, z, t) + w^2(x, y, z, t)}{2g} + \frac{p(x, y, z, t)}{\rho g} + \hat{z} + z_b(x, y, t) \quad (1)$$

$$H_{all}(x, y, t) = \frac{1}{h(x, y, t)} \int_{z_b}^{z_s} H(x, y, z, t) dz = \frac{1}{h(x, y, t)} \int_{z_b}^{z_s} \left(\frac{u^2(x, y, z, t) + v^2(x, y, z, t) + w^2(x, y, z, t)}{2g} \right) dz + \frac{1}{h(x, y, t)} \int_{z_b}^{z_s} \left(\frac{\delta p(x, y, z, t)}{\rho g} \right) dz + h(x, y, t) + z_b(x, y, t) \quad (2)$$

ここで、 u, v, w は三次元空間における x, y, z 成分の流速、 p は圧力、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 h は水深、 δp は圧力の非静水圧成分、 z_b は河床高、 $\hat{z}$ は河床高 z_b を基準とした高さである。従って、式(2)より洪水流の全エネルギー水頭の時空間分布を評価するためには、位置エネルギーである河床高 z_b の時空間分布の変化、特に堆積することによる位置エネルギーの増加による流れ場の変化を把握することが極めて重要である。

これまで、福岡らは京王線橋梁(35km 付近)直下流の左岸高水敷および日野橋(39.9km 付近)の橋脚が被災した多摩川の令和元年 10 月の大洪水を対象に準三次元洪水流(Q3D-FEBS)³⁾・河床変動解析を行い、洪水流の全エネルギー水頭分布を明らかにすることで、上記の被災機構について分析してきた²⁾。しかし、洪水時に生じた大規模な砂州の移動、変形、発達が十分再現出来ておらず、砂州の発達に伴う洪水流の全エネルギー水頭分布の時空間変化、それに基づく被災機構の検討が十分ではなかった。このため本研究では、準三次元洪水流(Q3D-FEBS)・河床変動解析法の改良を行うことにより、多摩川の令和元年 10 月大洪水時の砂州の大規模な移動・変形・発達を精度良く解析する。この結果に基づき砂州の大規模な変形・発達に伴う洪水流の全エネルギー水頭分布の時空間変化を明らかにし、京王線橋梁直下流の左岸高水敷および日野橋の橋脚の被災機構を分析する。

2. 非静水圧準三次元洪水流解析(Q3D-FEBS)と非平衡流砂運動に基づく河床変動解析法とその改良点

図-1 は本解析法の枠組みを示す。本研究では、橋梁等の構造物周辺における圧力の非静水圧分布を伴う 3 次元な流れ場を解析するため、洪水流解析法には非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS 法)³⁾を用いる。この解析法では、水深積分の連続式と水深積分および水面・底面での水平方向・鉛直方向の運動方程式を流速鉛直分布式と一体的に解析することにより、洪水流の 3 次元流速場と圧力場を解析している。河床変動解析については、石礫粒子の非平衡流砂運動を修正長田・福岡の解析法⁴⁾⁵⁾により、掃流砂の連続式と運動方程式を用いて解析する。式(3)は掃流砂の連続式を示しており、掃流砂の連続式には河床からの離脱量 P_k 、掃流砂から河床への堆積量 D_k に加えて掃流砂から浮遊砂への遷移量 q_{suk} 、浮遊砂から掃流砂へ

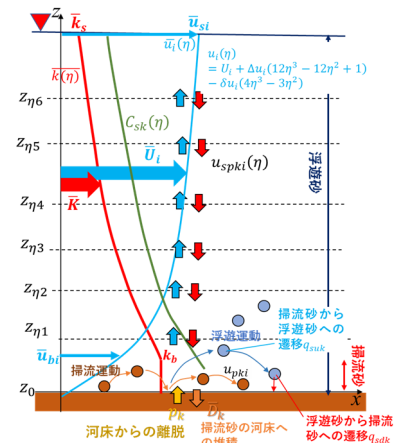


図-1 本解析法の枠組み

Analysis of Damage Mechanism of River Structures Based on the Change in the 3D Energy Distribution of Flood flows due to the Development of Sandbars during Large-Scale Floods

T. Gotoh Research and Development Initiative, Chuo University
K. Gotoh Research and Development Initiative, Chuo University
H. Kato Faculty of Science and Engineering, Chuo University
S. Fukuoka Research and Development Initiative, Chuo University

の遷移量 q_{sdk} を考慮して掃流砂と浮遊砂を一体的に解析している．ここで、 V_{bk} は単位面積当たりの掃流砂体積、 $\hat{q}_{bkj}$ は河床斜面に沿う方向の単位幅掃流砂量であり、 k は粒径階、 z_0 は各計算格子の河床高を示し、 $\alpha_2 = \pi/4$ 、 $\alpha_3 = \pi/6$ である．

$$\frac{\partial V_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{q}_{bkj}}{\partial x_j} = (P_k - D_k - q_{suk} - q_{sdk})\delta \quad (3)$$

$$\frac{\partial z_0}{\partial t} = -\frac{\alpha_2}{\alpha_3} \sum_{k_{max}} (P_k - D_k) \quad (4)$$

これまでの著者らが用いてきた河床変動解析法²⁶⁾では、沈降する浮遊砂の量 q_{sdk} は掃流砂に遷移せず、直接河床に堆積するものと仮定して式(4)に考慮していたが、この仮定を用いると浮遊砂の再浮上が生じにくく、その結果として多摩川の洪水時の砂州の移動量および堆積量が十分再現出来なかった．本研究では、沈降した浮遊砂 q_{sdk} は一旦掃流砂に取り込まれるものとして式(3)で評価することにより、大規模洪水時の砂州の移動・変形・発達を適切に解析出来るように改良している．

本研究における解析区間は、多摩川の日野用水堰の上流(46km)から二ヶ領上河原堰の上流(26km)の区間であり、この区間において洪水時に観測された水位時系列データを用いて解析を行った．初期の河床形状には JR 中央線より下流区間は平成 29 年の定期横断測量データを用い、JR 中央線より上流区間は ALB 測量データを用いた．初期の河床材料には砂州領域では細粒土砂が多く含まれていること、深い層には比較的粗い粒径が多く存在することを考慮している²⁶⁾．

3. 日野橋付近の洪水時の砂州の挙動・発達とそれに伴う洪水エネルギー水頭分布の変化、橋脚の被災機構

図-2は日野橋付近の洪水前後の砂州の移動・発達状況と日野橋の被災状況を示す．洪水前には日野橋右岸上流(39.8~40.8km)付近に砂州が形成され、洪水後には砂州が発達しながら約 200~300m 下流に移動している．沈下した橋脚は左岸深掘れ部に位置している．図-3は日野橋付近の洪水前後の河床変動高コンターの実測値と解析結果の比較を示しており、解析結果は実測と同様の砂州の移動状況、日野橋上流の土砂堆積状況を説明している．ここで、本洪水における水面形時系列の観測結果と解析結果の比較、洪水全エネルギー水頭と堤防高の縦断分布の関係については、既往論文²⁷⁾を参考とされたい．

図-4 は流量ヒドログラフと後述の解析で着目している時刻を示し、図-5 は解析結果における河床高コンターの時間変化を用いて日野橋付近の砂州の移動状況を示し、図-6 は同時刻の洪水全エネルギー水頭分布とその輸送フラックスを示す．解析結果より、10/12 18:00 頃には砂州の蛇行頂部が 40.2km 付近に位置していたが、10/12 22:00 頃には 40.05km 付近まで移動していることが分かる．これにより、砂州上流で高まった洪水エネルギーが、砂州の蛇行頂部付近の左岸深掘れ部に向かって集中して流れ込み、それが砂州の流下に伴い下流に移動している．図-7 は洪水減水期(10/13 0:00)の日野橋周辺の洪水全エネルギー水頭分布の拡大図を示しており、洪水減水期にさらに砂州が流下することにより、洪水全エネルギー水頭が被災した P5 橋脚付近に集中している．日野橋は古い橋梁(大正 15 年竣工)のため径間長が約 15m と短く、洪水時の流れと砂州の移動が妨げられたため、日野橋上流の砂州の発達とそれに伴う洪水全エネルギーの高まりと深掘れ部への集中が橋脚被災をもたらしたものと考えられる．

4. 京王線橋梁付近の洪水時の砂州の挙動・発達とそれに伴う洪水エネルギー水頭分布の変化、左岸高水敷の被災機構

図-8 は京王線橋梁付近の洪水前後の砂州の移動・発達状況と、京王線左岸高水敷下流の被災状況を示す．洪水前には

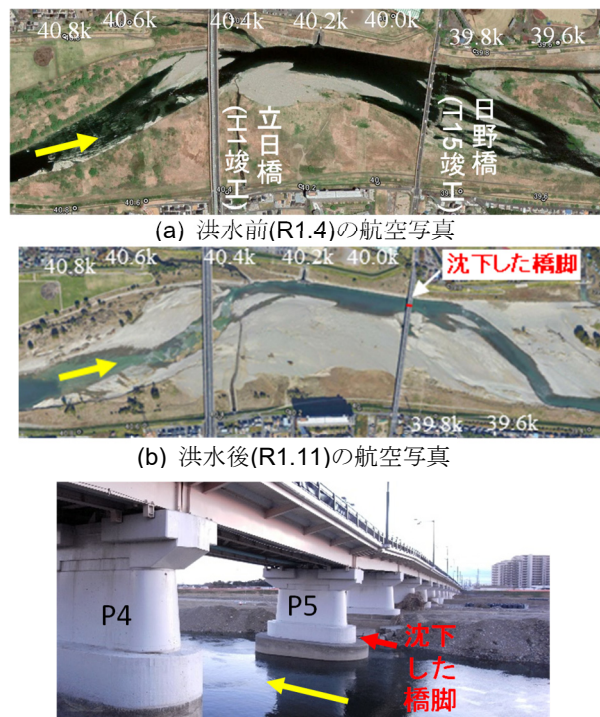


図-2 令和元年 10 月洪水前後の日野橋周辺の砂州の変形と被災の状況

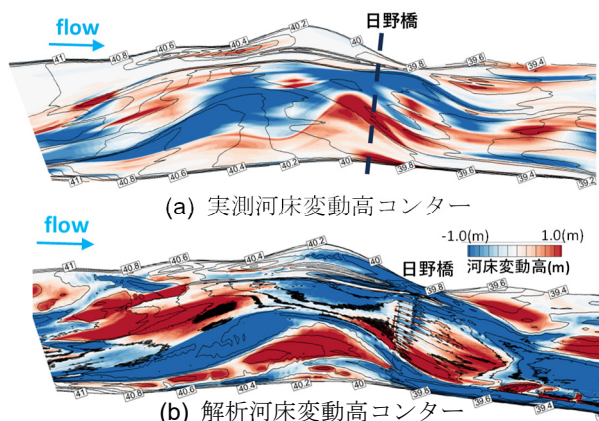


図-3 洪水前後の実測と解析の河床変動高コンターの比較 (日野橋周辺)

京王線橋梁上流(35.0~35.6km)に河道中央に砂州が形成され、さらに上流の(35.6m~36.6km 付近)の左岸に砂州が形成されている。洪水後にはこれらの砂州が合体し、35.2~35.4km 左岸まで砂州が発達している。図-9は京王線橋梁付近の洪水前後の河床変動高コンターの実測値と解析結果の比較を示しており、解析結果は実測に見られるように、35.6m~36.6km 付近の左岸砂州が河道中央部の砂州と合体しながら、35.2~35.4km 左岸まで砂州が発達している現象をほぼ説明している。

図-10は京王線橋梁付近の解析結果における河床高コンターの時間変化と砂州の移動状況を示し、図-11は京王線直下

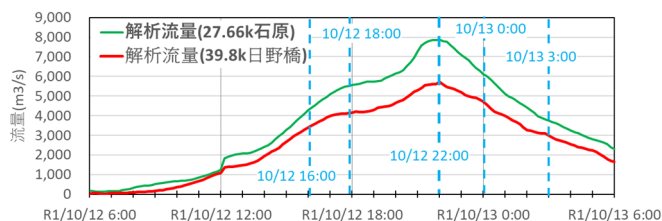
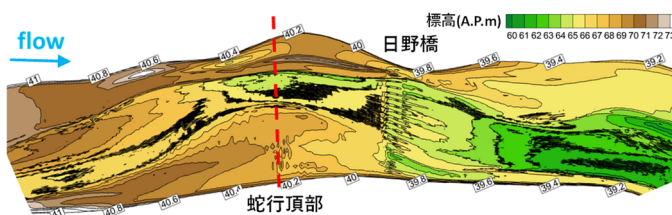
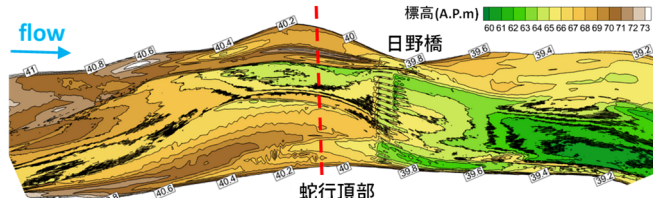


図-4 流量ハイドログラフ

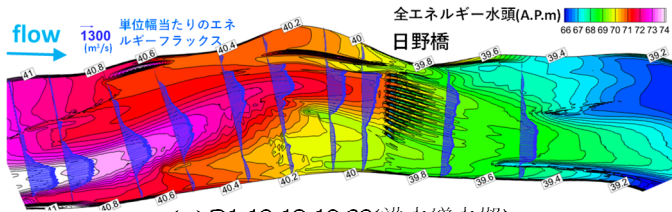


(a) R1.10.12 18:00(洪水増水期)

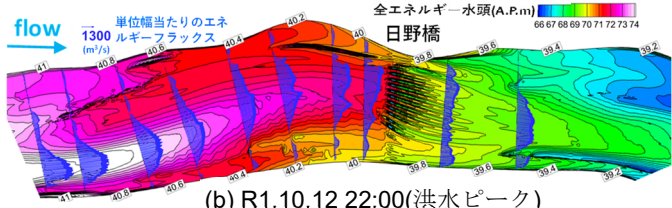


(b) R1.10.12 22:00(洪水ピーク)

図-5 日野橋周辺の洪水時の砂州の移動状況



(a) R1.10.12 18:00(洪水増水期)



(b) R1.10.12 22:00(洪水ピーク)

図-6 砂州の移動に伴う洪水全エネルギー水頭の変化と洪水全エネルギーの輸送フラックス(日野橋周辺)

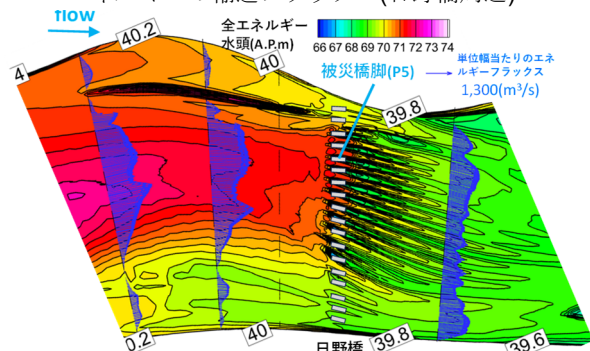


図-7 洪水減水期(10/13 0:00)の日野橋周辺の洪水全エネルギー水頭分布と洪水全エネルギーの輸送フラックス

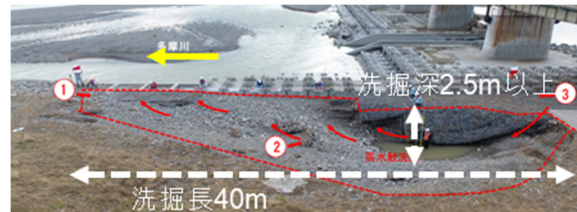
流左岸高水敷が洗掘し始めた 10/12 16:00 頃の河床変動高コンターを示す。また、図-12は洪水全エネルギー水頭分布とその輸送フラックスを時系列的に示す。京王線橋梁も大正14年竣工と古く径間長が約20mと短いことから、洪水流と砂州の移動に対して阻害要因となっており、京王線橋梁の直上流には洪水前から大規模な砂州が河道中央部に形成されている。このため、京王線橋梁付近では、洪水増水期から砂州上流で洪水エネルギーが高まり、左右岸の深掘れに向かって洪水



(a) 洪水前(R1.4)の航空写真

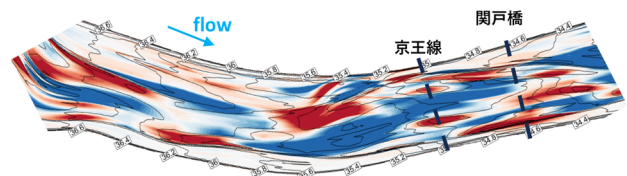


(b) 洪水後(R1.11)の航空写真

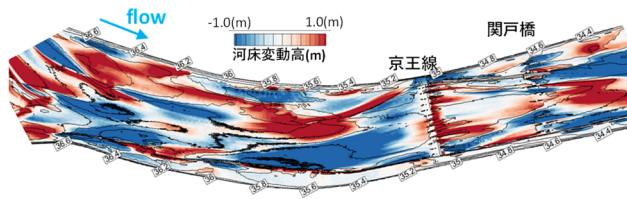


(c) 京王線橋梁左岸高水敷の被災状況

図-8 令和元年10月洪水前後の京王線橋梁周辺の砂州の変形と左岸高水敷の被災の状況



(a) 実測河床変動高コンター



(b) 解析河床変動高コンター

図-9 京王線橋梁周辺の洪水前後の実測と解析の河床変動高コンターの比較

エネルギーが集中して輸送されている。これにより、洪水増水期に京王線橋梁直下流の左岸高水敷上の洗掘が生じ(図-11)、さらに洪水ピーク時にも同様な傾向が継続し、減水期には上流側の砂州が 35.2~35.4km 付近まで流下・発達することにより、橋梁直下流の左岸高水敷上の洗掘被災が進行し、左岸堤防が長時間危険な状況に晒されていたことを示した。

5. 結論

本研究では、令和元年 10 月多摩川大洪水について、改良した準三次元洪水流・河床変動解析法を用いて大洪水における砂州の変形・発達とそれに伴う洪水全エネルギー水頭分布の時空間変化を明らかにし、京王線直下流左岸高水敷上の洗掘被災、日野橋橋脚被災機構を分析した。

砂州の存在はその上流で洪水全エネルギー水頭を高め、砂州の深掘れ部に向かって洪水エネルギーが集中して輸送されていた。京王線橋梁・日野橋ともに大正年間に建設された古い橋梁であるため、径間長が短く洪水時の流れと土砂移動の阻害要因となっており、橋梁上流で砂州が変形・発達することにより、砂州上流で高まった洪水エネルギーが被災箇所集中して輸送され、被災をもたらしたことを示した。京王線橋梁の被災箇所は堤防に近接していたことから、堤防が長時間危険な状況にあったことが分かった。

参考文献

- 1) 福岡捷二：超過洪水時の三次元エネルギー分布に基づく河道・堤防の一体設計の考え方，河川技術論文集，第 29 巻，pp.209-214，2023。
- 2) 福岡捷二，加藤宏季：超過洪水流の時空間三次元エネルギー分布に基づく河道計画・設計法，河川技術論文集，第 30 巻，pp.411-416，2024。
- 3) 竹村吉晴，福岡捷二：波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面（水面・底面）上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析（Q3D-FEBS），土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.75，No.1，pp.61-80，2019。
- 4) 長田健吾，福岡捷二：石礫河川の河床変動機構と表層石礫の凹凸分布に着目した二次元河床変動解析法，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.68，No.1，pp.1-20，2012。
- 5) 竹村吉晴，久保宜之，岡田将治，福岡捷二：洪水流による物部川河口礫州の開口と変形機構に関する研究，河川技術論文集，第 26 巻，pp.669-674，2020。
- 6) 後藤勝洋，後藤岳久，瀬尾敬介，福岡捷二：大規模洪水による高水敷化した砂州河岸の洗掘に伴う船底形断面形の形成，河川技術論文集，第 29 巻，pp.329-334，2023。

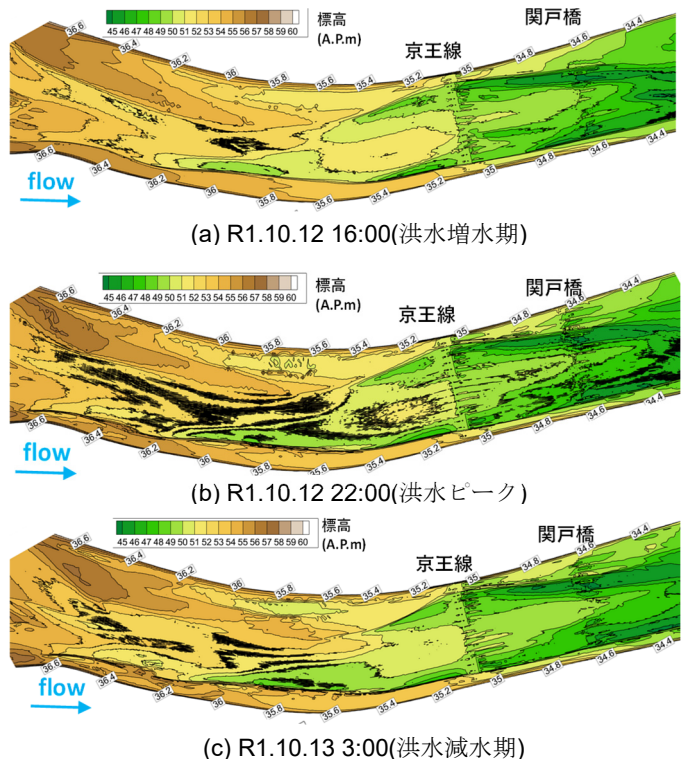


図-10 京王線橋梁周辺の洪水時の砂州の移動状況

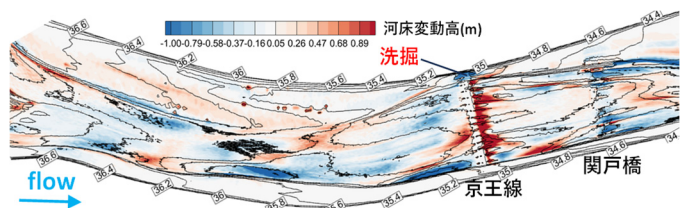


図-11 京王線橋梁周辺の増水期の河床変動高(10/12 16:00)

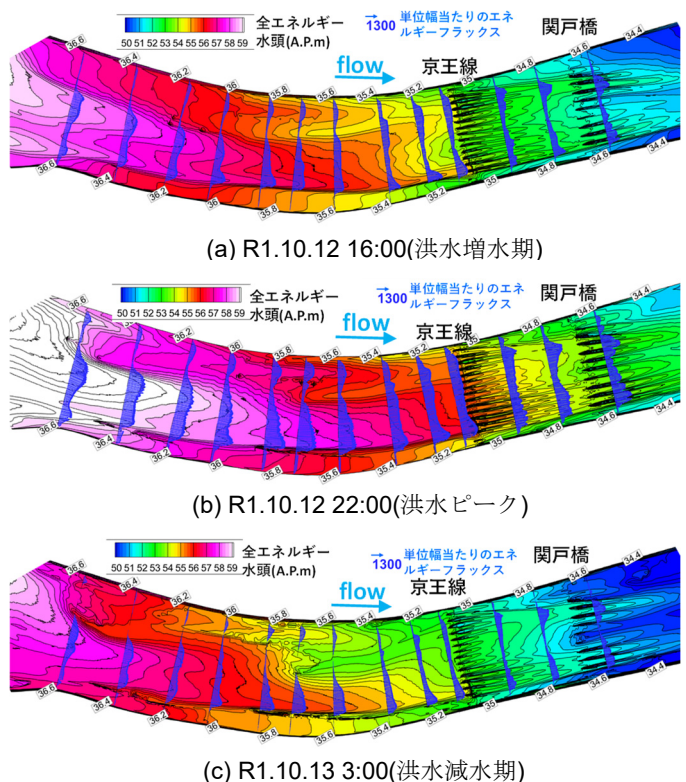


図-12 砂州の移動に伴う洪水全エネルギー水頭の変化と洪水全エネルギーの輸送フラックス(京王線橋梁周辺)