

# 洪水流の三次元エネルギー分布から見た河道と堤防の設計の考え方

三次元エネルギー分布 非静水圧準三次元解析 河道設計

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 フェロー会員 福岡 捷二

## 1. 序論

堤防や横断構造物等の河川構造物付近の流れの三次元性の程度は、河道線形や断面形との関係で異なり、複雑な流速分布を生ずる場合には、特に構造物にとって危険なせん断力分布や、圧力分布が発生する。河川構造物の設計にはこれら大きな外力を考慮した検討が望まれている。特に、堤防等の河川構造物については破壊に至る大きな損傷は避けなければならない、破壊が起こる可能性が高い箇所を事前に把握する技術の開発と設計法の確立が急務である。

福岡は、このような観点から現在の堤防設計、管理を行う上で特に水理学的な観点からの課題を提示し、洪水流の三次元的な流れのエネルギー分布に基づく堤防設計、管理の必要性を論じ、実河川での検討が喫緊の課題であることを2023年の河川シンポジウムで強調している<sup>1)</sup>。

本研究では、福岡の考えを令和元年の多摩川洪水に適用し、複雑な河道線形と堤防等構造物の位置関係による三次元洪水エネルギー分布の重要性を非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS)<sup>2)</sup>により見える化し、河道断面形と堤防の線形の相互関係や設計に対する三次元エネルギー分布の導入の必要性を強調している。

## 2. 三次元エネルギー分布の評価

非静水圧準三次元解析法(Q3D-FEBS)の詳細は文献<sup>1)2)</sup>を参照されたい。Q3D-FEBS解析により、三次元流速分布や圧力分布等が得られ、これらの局所的な値を式(1)に代入することにより、洪水流の全エネルギー水頭の三次元分布を得る。

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

ここで、 $H$ は全エネルギー水頭、 $u, v, w$ はそれぞれ $x, y, z$ 方向の局所流速、 $p$ は非静水圧成分を含む圧力、 $\rho$ は水の密度、 $g$ は重力加速度、 $z$ は基準からの高さである。全エネルギー水頭は、 $u, v, w$ の水深平均流速を用いるのではなく、Q3D-FEBSによって直接解かれた局所的な流速や圧力の値であることに注意が必要である。

## 3. 多摩川中流部における三次元エネルギー分布

多摩川中流部全域の洪水時の全エネルギー水頭の時空間分布に基づいて、河道の構造物設計の重要性を論じることが必要であるが、紙数の関係上ここでは、特に被害が大きかった日野橋周辺区間と稲城大橋区間について検討する。

### 3.1 日野橋周辺区間



図-1 令和元年洪水前における日野橋周辺区間の航空写真

図-1に、令和元年洪水前における日野橋周辺区間の航空写真を示す。令和元年洪水では図-2に示すように、日野橋 P5 橋脚背面が約 4.7m 洗掘され、橋梁が約 70cm 沈下する被害が生じた<sup>3)</sup>。図-3に、日野橋周辺区間の水深平均流速コンター図を示し、図-4には、日野橋上流の 40.0k 地点における横断面図を示す。コンターは流下方向流速を示し、断面上部の黒線は全エネルギー水頭を示している。図-3、図-4より、日野橋上流の



図-2 日野橋 P5 橋脚背面の洗掘<sup>3)</sup>

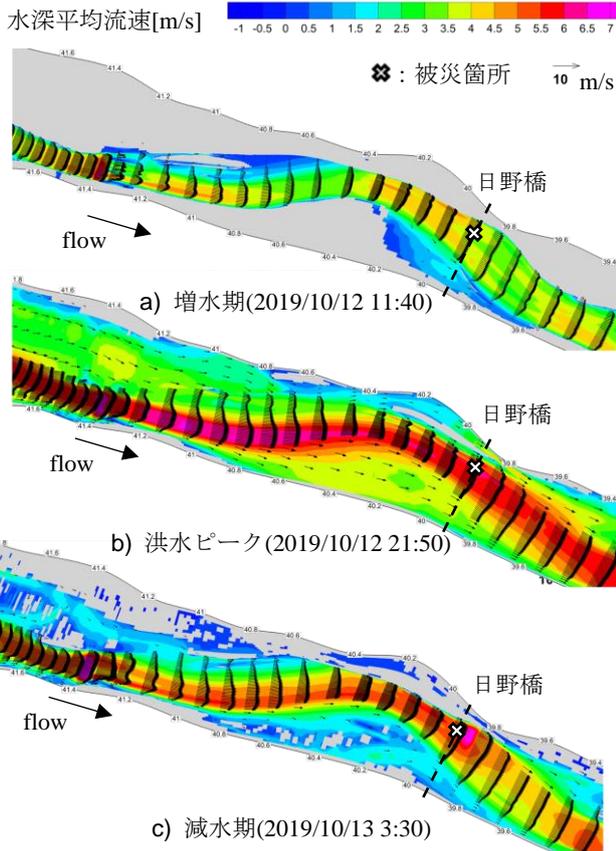


図-3 日野橋周辺区間の水深平均流速カウンター

湾曲において、増水期(2019年10月12日11:40)では、外岸側が速くなっているのに対して洪水ピーク(2019年10月12日21:50)においては内岸側が速くなっている。上流側の高水敷上の遅い流れが流入し低水路の高速流と混合することによる複断面的蛇行流れとなっている。その後の減水期(2019年10月13日03:30)では、再び外岸側が速い流れとなるとともに、日野橋下流で水深平均流速が大きい状態が続いている。また、図-4より、洪水ピークや減水期において、日野橋P5橋脚付近では全エネルギー水頭も大きくなっていることがわかる。

図-5には、日野橋周辺区間の全エネルギー水頭の時間変化を示す。洪水時の全エネルギー水頭が横断的に大きくなっている箇所が増水期では外岸側から内岸側、減水期では内岸側から外岸側へと変化している。また、減水期(2019年10月12日11:40)では、日野橋被災箇所下流で流下方向のエネルギー勾配が大きくなっており、大きな力が周辺構造物に作用していると思われる、これらにより、図-2の橋脚背後の洗掘、橋梁の沈下が発生したと考えられる。

### 3.2. 稲城大橋周辺区間

図-6に、令和元年洪水前における稲城大橋周辺区間の航空写真を示す。図-7に示すように、稲城大橋下流29.2kの右岸周辺では、河岸侵食及び河床洗掘を受け、サイクリングロード舗装の崩落も発生した<sup>4)</sup>。

図-8に、29.2k横断面での洪水前後の河床の変化と被災

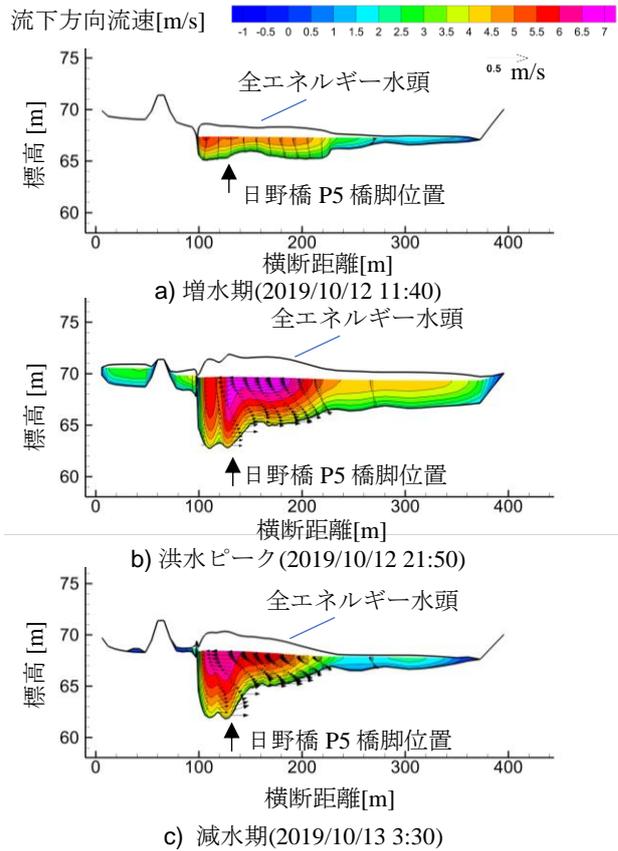


図-4 日野橋上流(40.0k)地点の横断面分布図

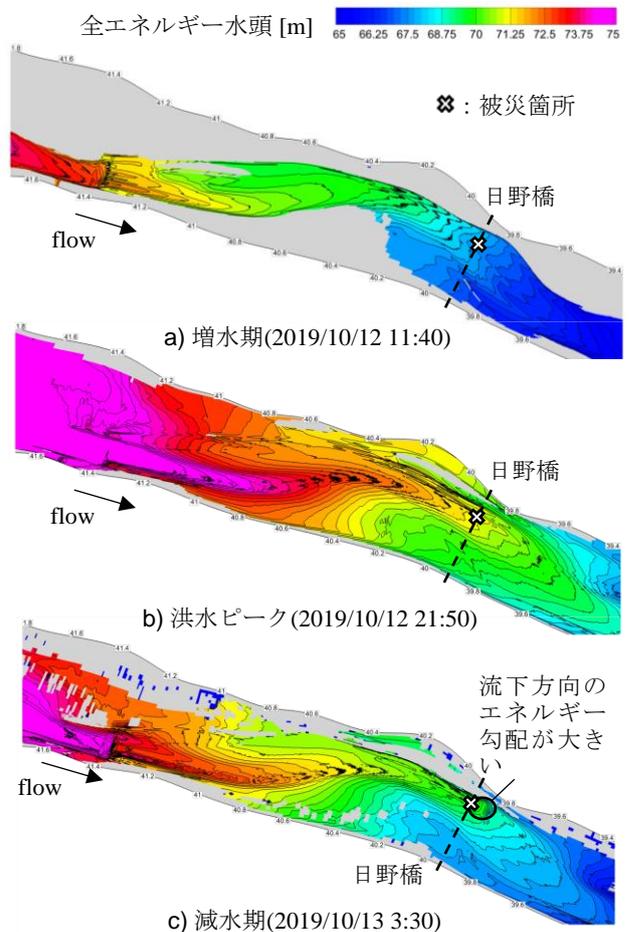


図-5 日野橋周辺区間の全エネルギー水頭分布



図-6 令和元年洪水前における稲城大橋周辺区間の航空写真



図-7 29.2k 付近での河岸侵食とサイクリングロードの舗装崩落<sup>4)</sup>

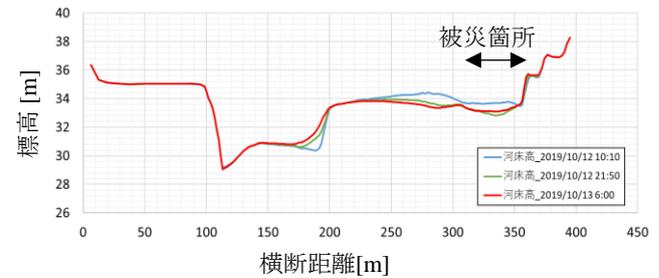


図-8 29.2k 地点における河床の変化と被災箇所

箇所を示す。被災箇所は、洪水初期(2019年10月12日10:10)から洪水ピーク(2019年10月12日21:50)にかけて大きく洗掘されており、この地点での被災はこの間に発生したと推察される。また、洪水前のこの断面では左岸側の高水敷に対して右岸側の高水敷の高さが約1.0m低くなっており、右岸側の被災と関係しているものと思われる。

図-9 に、稲城大橋周辺区間の水深平均流速の時間変化を示す。図-10 には、稲城大橋下流(29.2k)地点における横断面図を示し、全エネルギー水頭の横断面分布も示している。増水期(2019年10月12日11:40)では、滞筋に沿って流速が発達し、29.2k地点では外岸側が速い流れとなっている。一方で、洪水ピーク時では内岸側が速くなっている。40.2k地点と同様に、複断面的蛇行流れとなり、内岸側が速くなったと考えられる。一方、図-10 より、全エネルギー水頭の横断面分布は、洪水ピーク時において被災箇所でも横断方向の全エネルギー水頭が大きくなっているものの、全エネルギー水頭の大きさはそれほど大きくなっておらず、断面全体でエネルギーが分布している。右岸側の砂州や高水敷の高さが左岸側の高水敷高さに比べて低いため、複断面的蛇行流れとなった際に、堤防近くに最大流速位置が発生していると考えられる。また、減水期(2019年10月13日03:30)においても未だ外岸側が速い流れとなっている。

図-11 に、洪水ピーク時(2019年10月12日21:50)における稲城大橋周辺区間の全エネルギー水頭分布を示している。ここで、図-11 は  $x:y:z = 1:1:50$  の比率で表示しているため、起伏や勾配といった高さ関係は誇張されて見えることに注意する必要がある。図-11 より、洪水ピーク時において上流から輸送されてきたエネルギーは滞筋に沿って外岸側に向かうものもあるが、多くが被災箇

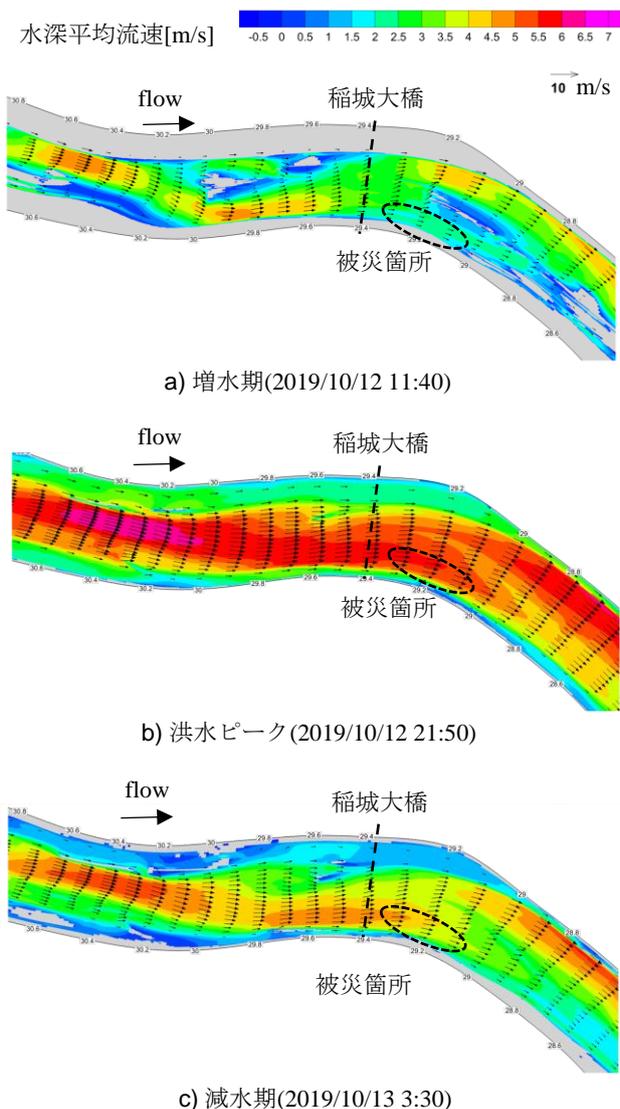


図-9 稲城大橋周辺区間の水深平均流速

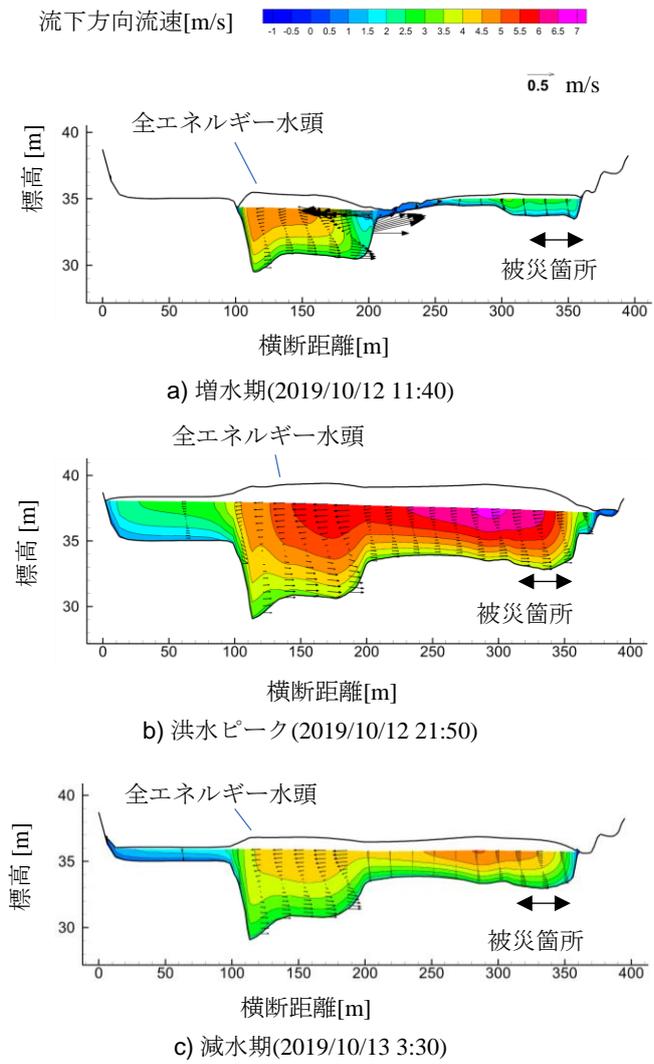


図-10 稲城大橋下流 (29.2k)地点の横断面分布図

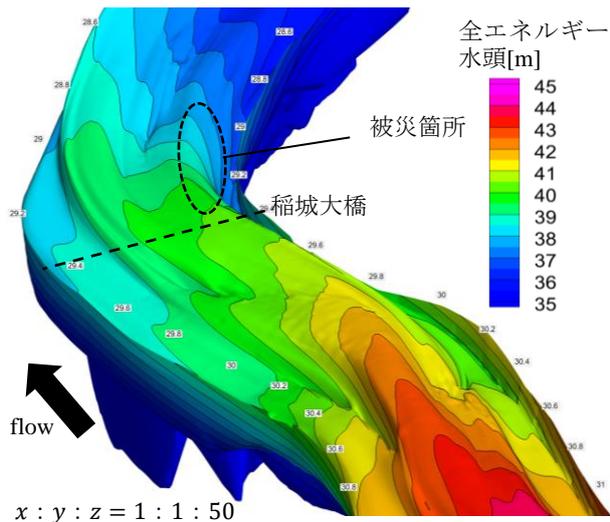


図-11 洪水ピーク時(2019年10月12日21:50)における稲城大橋周辺区間の全エネルギー水頭分布

所付近の内岸側に向かっている。その結果、被災箇所では大きなエネルギーが縦断的に輸送される流れ場となっており、危険な状態であったといえる。このようなことから、29.2k 付近右岸では河床洗掘や河岸侵食が発生したと考えられる。このような被災との関係は、図-10に示す横断分布だけではわからず、図-11に示したような縦横断的な三次元のエネルギー分布をみることが重要である。すなわち、河道全体として洪水流の持つ巨大なエネルギーを分布させ、流下させるかが課題である。

#### 4. 結論

本研究では、Q3D-FEBS を用いた数値解析結果から、令和元年洪水における多摩川中流域で発生した被災箇所(日野橋と稲城大橋下流)について、河道縦横断形に対する流れ場に加え、三次元エネルギー分布の分析から検討を行った。

日野橋 P5 橋脚の被災箇所について、流速が大きくなっているとともに、流下方向の局所的なエネルギー勾配が大きくなっていた。稲城大橋下流(29.2k)右岸側の被災箇所については、複断面的蛇行流れとなることで内岸側の流速が大きくなった結果、全エネルギー水頭の縦横断分布が被災箇所に向かって大きくなる三次元分布となっていた。

本論文で示したように、洪水時に全エネルギー水頭が大きくなるような箇所では被災が起こりやすいといえる。しかし、洪水流はそのエネルギーフラックスの規模に応じ河床や河岸を洗掘・侵食し、エネルギー的に望ましい縦横断的な河道形状になろうとしている。そのため、令和元年洪水で被災した箇所を新たに護ると、エネルギーを逃がすことができなくなり、周辺の他の箇所でも河岸や堤防侵食が発生することが想定できる。堤防などの河川構造物の設計を従来のように水位中心で行うだけでなくエネルギー分布の視点で見直すことが必要であり、また、河道線形、縦横断面形の面から水理的に検討し、適切な河道形状によってエネルギーを分布させ、高いエネルギーを有する洪水流をうまく流下させるような川づくりをしていくことも今後の川づくりの重要課題である。

#### 参考文献

- 1) 福岡：河川技術論文集，2023。
- 2) 竹村ら：土木学会論文集 B1(水工学)，2019。
- 3) 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所：侵食 WG ヒアリング 多摩川における侵食対策の取り組みについて，2022。
- 4) 国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所：第 7 回多摩川・浅川河道管理検討会 令和元年東日本台風による洪水の概要について，2020。