

掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法の開発と現地河川への適用

Development Of Quasi-Three-Dimensional Flood Flow And Riverbed Variation Analysis Method That Can Calculate Bed Load And Suspended Load Integrally And Application To Real River

21N3100046C 長谷部 夏希 (河川工学研究室)

Natsuki HASEBE / River Engineering Lab.

Key Words : Quasi-3D flow and bed variation analysis, non-equilibrium sediment motions, suspended sediment, compound meandering channel flow, secondary flow

1. 序論

堤防線形に対して低水路線形が蛇行し、広い高水敷を有する複断面蛇行河道では、大規模洪水時に相対水深(高水敷水深/低水路水深)がおよそ0.3を超えると主流が内岸側を走る複断面的蛇行流れが生じる¹⁾。その際、内岸側の河床・河岸の洗掘により河川の流下能力の変化が生じる他、内岸側の高水敷や堤防・構造物などに被害を及ぼす危険性がある。そのため、河道設計や管理を考える上で、複断面的蛇行流れの影響を考慮することは重要である。複断面的蛇行流れは三次元性の強い流れ場であり、それに伴い流砂運動の非平衡性も強くなる。従って本研究では、掃流砂と浮遊砂それぞれの連続式と運動方程式を計算することで非平衡流砂運動を考慮し、掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法²⁾を開発した。そして、複断面蛇行区間を有し、洪水時に浮遊砂が卓越した昭和56年8月石狩川洪水に適用することで本解析法の妥当性を示した。また、実際に内岸側で橋台の被災や樹木群の倒伏・流出が生じた令和2年7月球磨川豪雨³⁾に本解析法を適用し、複断面蛇行河道において低水路線形が及ぼす洪水流の流れ構造と河道被害との関係について分析を行い、本研究成果の、今後の河道づくりや河川管理への活用を示している。

2. 掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法

図-1は本解析における洪水流解析法の枠組みと、用いた流速と乱れエネルギーの鉛直分布を示す。本解析では、水深積分モデルの枠組みで非静水圧の三次元流れを解析出来る準三次元解析法(Q3D-FEBS法)⁴⁾を用いる。さらに、乱流場の評価が重要な浮遊砂に対して、水面と底面、水深積分の乱れエネルギーの輸送方程式を導入し、乱れエネルギーの鉛直分布を考慮することにより、浮遊砂の新しい解析法を提示する。

図-2は本解析における河床変動解析法の枠組みを示す。掃流砂の運動については、掃流砂量を流砂体積と粒子

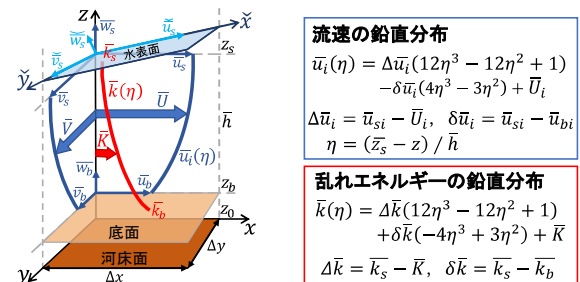


図-1 流速と乱れエネルギーの鉛直分布

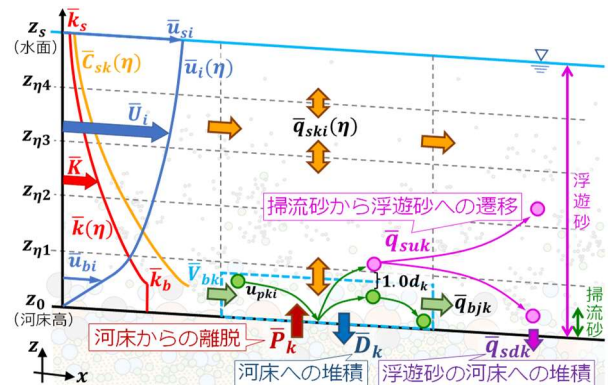


図-2 河床変動解析法の枠組み

速度の積で表現し、跳躍運動に基づく粒子の運動方程式より平均粒子速度を解析する。そして、新たに掃流砂から浮遊砂への遷移を考慮した掃流砂の連続式より流砂体積を計算し、掃流砂と浮遊砂を一体的に解析する。浮遊砂の運動については、各高さで流れの乱れ成分を考慮した粒子の運動方程式を解くことで各瞬間の粒子速度と浮遊砂の輸送フラックスを算定する。そして、これを時間平均した浮遊砂の輸送フラックスにより、時間平均の浮遊砂の三次元連続式を解く。

3. 昭和56年8月石狩川洪水における洪水流・河床変動解析への適用

石狩川河口部は、河床材料が細かく洪水時に掃流砂・浮遊砂が卓越する。また、複断面蛇行区間を有しており流れの三次元性と流砂運動の非平衡性が強くなる。従って、非静水圧と非平衡流砂運動を考慮した本解析法を昭和56年8月石狩川洪水に適用し、本解析法の妥当性について検討する。

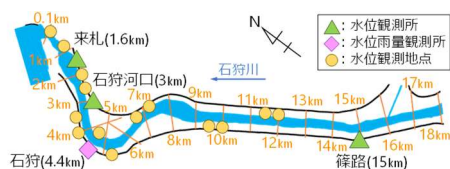


図-3 洪水観測体制と解析区間

(1) 解析条件

図-3は本研究の解析区間を示し、検討区間は石狩川の15kmから河口沖-2kmとした。上流端境界条件には篠路観測所(15km)の観測水位ハイドログラフを与え、下流端境界条件には小樽港の観測潮位時系列データを与えた。また、河岸には締固度が高い泥炭が露出している。

(2) 解析結果と考察

図-4は5.0km地点の解析水位ハイドログラフを示す。また、図-5は洪水ピーク時の水深平均流速分布を示し、図-6,7は5.0km地点の主流速分布と浮遊砂濃度分布、二次流の解析結果の時間変化を示す。図-6(a)より、水位が低く単断面的蛇行流れとなる時間帯では、流れの遠心力による第一種二次流が生じている。一方、洪水ピーク付近では、流速の遅い高水敷上の流れが5.5km付近の外岸側から低水路に流入し(図-5)流れが混合することで、低水路で第一種二次流とは逆回りの発達した二次流が発生する。それにより、主流が内岸側を走る複断面的蛇行流れが生じる。この際、単断面的蛇行流れの時とは異なり内岸側の河床・河岸の洗掘が進行している。さらに、逆回りの二次流により浮遊砂が外岸側の水面付近まで輸送され(図-7(b))発達した浮遊砂濃度分布を形成する。そして、洪水減水期には再び単断面的蛇行流れとなり第一種二次流が生じる。図-7は5.0kmの横断面形状の複断面的蛇行流れによる洗掘位置の時間変化を示す。本解析では、8月5日6時以降は複断面的蛇行流れとなり、8月7日6時頃から単断面的蛇行流れに遷移し始めている(図-4)。複断面的蛇行流れでは、主流が内岸側を走るため中水敷の前面肩付近が洗掘され(図-7(a))、7日6時以降に単断面的蛇行流れに戻ると外岸側の洗掘が進行する(図-7(b))。洪水後の解析結果は、内岸側の洗掘がやや小さいものの実測の外岸側の深掘れを説明している。

4. 複断面蛇行河道における低水路河道線形が及ぼす洪水流の流れ構造と河道被害の関係

本節では石狩川での知見を基に、甚大な被害が生じた令和2年7月球磨川豪雨を対象とし、複断面蛇行河道における低水路線形が及ぼす洪水流の流れ構造と低水路・堤防線形、これらと河道被災状況との関係を分析する。

(1) 内岸側の橋梁の被災状況・樹木の倒伏状況

図-9(a)に示す天狗橋(56km)では、内岸側の堤防付近に位置する橋台背面の盛土が流出する被害が生じた。ま

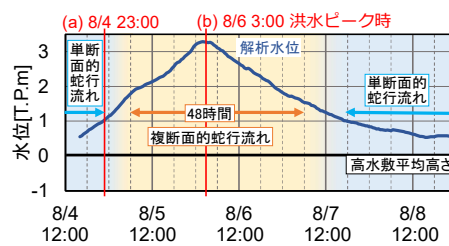


図-4 5.0km地点の解析水位ハイドログラフ

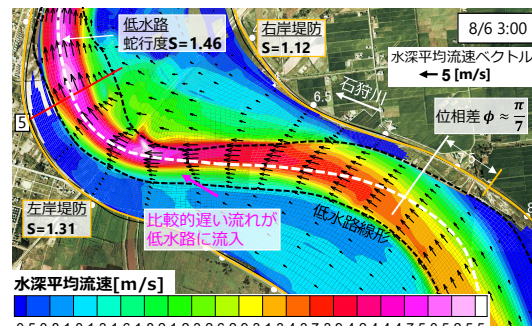


図-5 複断面蛇行区間の水深平均流速分布(洪水ピーク時)

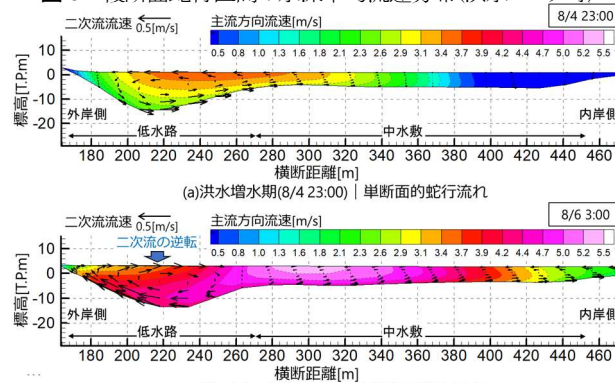


図-6 5.0km地点の主流方向流速分布と二次流の時間変化

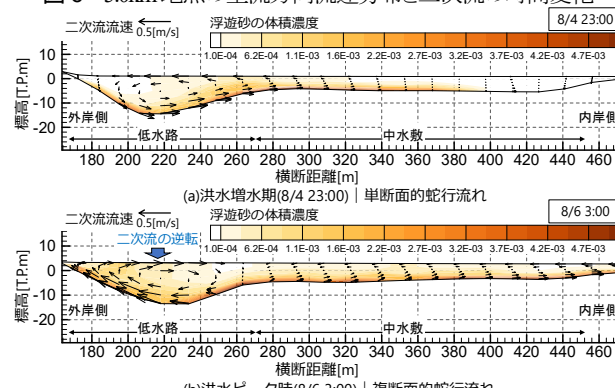


図-7 5.0km地点の浮遊砂濃度分布と二次流の時間変化

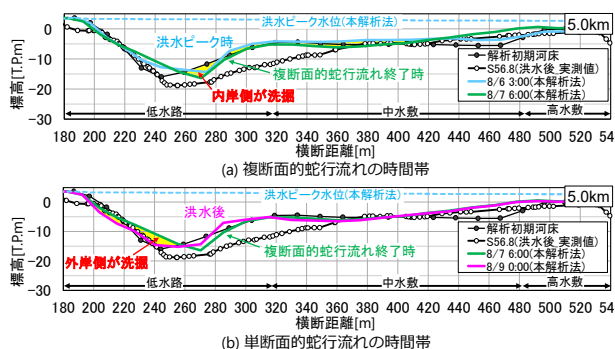
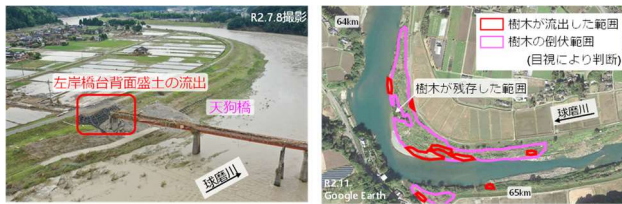


図-8 複断面的蛇行流れによる洗掘位置の時間変化



(a)天狗橋(56km)の左岸背面盛土の流出状況
(b)樹木群(64-66km)の倒伏・流出状況
図-9 令和2年7月球磨川豪雨による河道被災状況

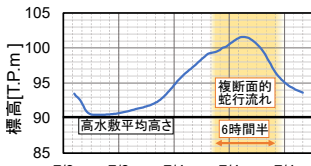


図-10 56km地点の解析水位ハイドログラフ

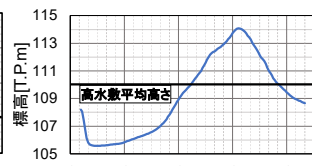


図-11 64.6km地点の解析水位ハイドログラフ

た、図-9(b)に示す64km-66km区間では、内岸側の高水敷に繁茂していた樹木群が全体的に倒伏し、赤枠で示す河岸際の樹木は流出した。

(2) 洪水時の流れ場と河道被害の関係の分析

図-10は56km地点の解析水位ハイドログラフを示し、図-12は天狗橋(56km)付近の洪水ピーク時の水深平均流速分布、図-13,14は56kmと56.6km地点の洪水ピーク時の主流と二次流の解析結果を示す。解析結果より、洪水の初期段階では通常の第一種二次流が生じていたが、堤内地への氾濫が生じ、上流側の56.6km地点の氾濫域と河川区域との相対水深が約0.3を超える時間帯では、氾濫域の遅い流れが56km付近の外岸側に流入し、激しい流れの混合が生じることで、56km地点で二次流の向きが逆転している。これにより、主流が内岸側を走る複断面的蛇行流れが生じ、被災橋台付近で高速流が発生し、内岸橋台の背面盛土が流出したものと考えられる。図-11は64.6km地点の解析水位ハイドログラフを示す。また、図-15は樹木群の倒伏・流出が生じた64km-66km区間の洪水ピーク時の水深平均流速分布を示し、図-16は64.4km地点の洪水ピーク時の主流と二次流の解析結果を示す。図-15より、この区間の上流側の左岸側は山付堤のため低水路への流れの流入が制限され、相対水深が0.3を超えても二次流の逆転は生じなかった。しかし、最大流速は内岸側に生じており、このことが樹木群の倒伏及び流出に繋がったものと考えられる。なお、更に水深が増し相対水深が増大した場合には、二次流の向きの逆転が生じたものと思われる。

5. 複断面的蛇行流れの生じる機構と低水路・堤防線形の関係

石狩川と球磨川の例を基に作成した模式図(図-17)を用いて、複断面的蛇行流れに伴う二次流の逆転が生じる機構と河道条件との関係を考察する。図-17-①は、低水路が蛇行し両岸に広い高水敷を有する河道であり、

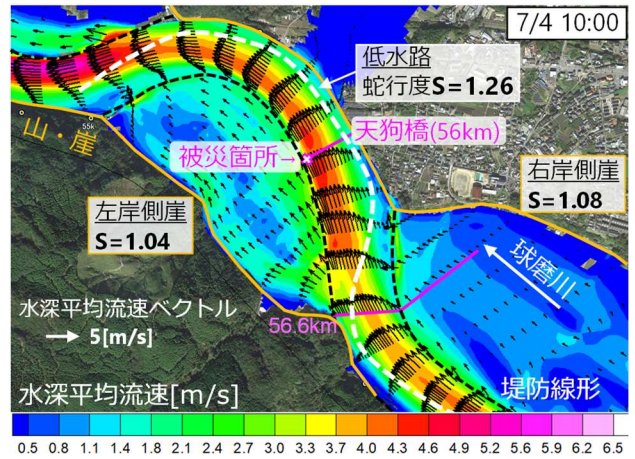


図-12 天狗橋(56km)付近の水深平均流速分布(洪水ピーク時)

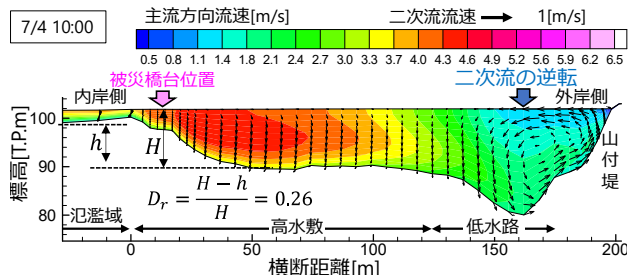


図-13 56km地点の主流・二次流の解析結果(洪水ピーク時)

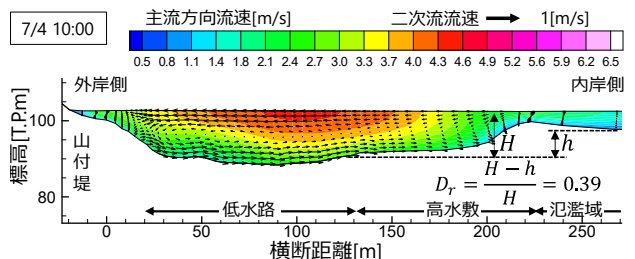


図-14 56.6km地点の主流・二次流の解析結果(洪水ピーク時)

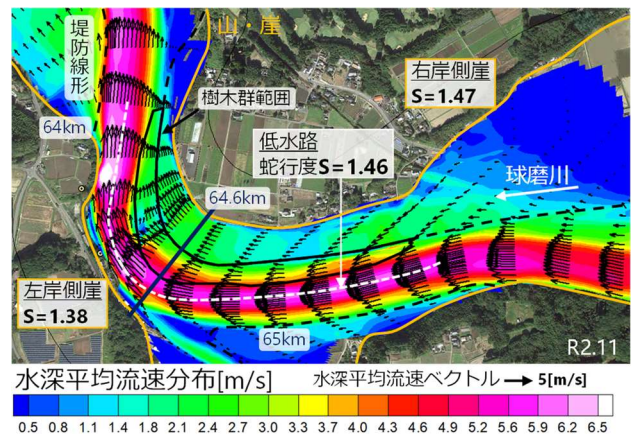


図-15 64-66km区間の水深平均流速分布(洪水ピーク時)

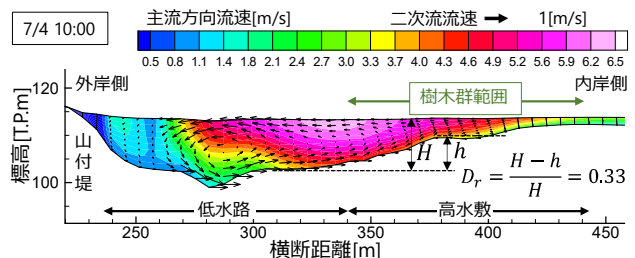


図-16 64.6km地点の主流・二次流の解析結果(洪水ピーク時)

石狩川蛇行部の流れ場と対応する。このような区間では、相対水深が約 0.3 以上になると高水敷上の比較的遅い流れと低水路の速い流れが激しく混合するようになり、複断面的蛇行流れ特有の二次流の逆転が生じる。図-17-②は片側の堤防の一部が山付堤の河道であり、氾濫域が高水敷のようになった球磨川天狗橋付近の流れ場と対応する。このような区間では、対象断面を見ると左岸側が山付堤のため流れの混合が生じにくいように見える。しかし、上流側に広い高水敷を有するため、上流側で相対水深が約 0.3 以上になると、そこからの遅い流れと低水路の流れが混合するようになり、二次流の逆転が生じる。図-17-③は、片側の堤防全体が山付堤の河道であり、球磨川の 64km-66km 区間に対応する。このような区間では、上流側に広い高水敷が無く低水路への遅い流れの流入が制限されるため、相対水深が 0.3 を超えてもなお通常の第一種二次流が生じているが、最大流速は内岸側に生じている。従って、複断面的蛇行流れ特有の逆回りの二次流が生じるためには、対象となる断面の上流側に広い高水敷を有している必要がある。よって、図-18 に示すように低水路線形と堤防線形の蛇行度 S または位相に差がある河道区間では、それらの差により広い高水敷が存在し、流れの混合が生じやすく二次流の逆転が生じると考えられる。実際に、低水路と堤防線形の蛇行度が異なる球磨川天狗橋付近(低水路: $S=1.26$, 左岸: $S=1.04$, 右岸: $S=1.08$)や(図-12), 蛇行度と位相のどちらも異なる石狩川蛇行部(低水路: $S=1.46$, 左岸: $S=1.31$, 右岸: $S=1.12$, 位相差: $\phi \approx \pi/7$)では(図-5), 図-18(a),(b)に示すように蛇行頂部付近の上流側に広い高水敷を有し、そこからの流れの流入により二次流の向きの逆転を伴う複断面的蛇行流れが生じていた。

6. 結論

本研究では、掃流砂と浮遊砂のそれぞれについて連続式と運動方程式を解くことで流砂の非平衡運動を考慮し、掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法を構築した。そして、浮遊砂の卓越する昭和56年8月石狩川洪水に適用し、本解析法の妥当性を示した。また、令和2年7月球磨川豪雨に本解析法を適用し、複断面蛇行河道における洪水の流れ構造と低水路・堤防線形、河道被害との関係について分析を行った。結果、昭和56年8月石狩川洪水では、洪水ピーク付近で高水敷より比較的遅い流れが低水路に流入し、流れの混合が生じることで第一種二次流と逆回転する二次流を有する複断面的蛇行流れが発生した。それにより、主流が走る内岸側河床・河岸が洗掘され、発達した逆回りの二次流が浮遊砂を水面付近まで輸送し、発達した浮遊砂濃度分布を形成することを示した。そして、非静水圧と非平衡流砂運動を考慮した本解析法

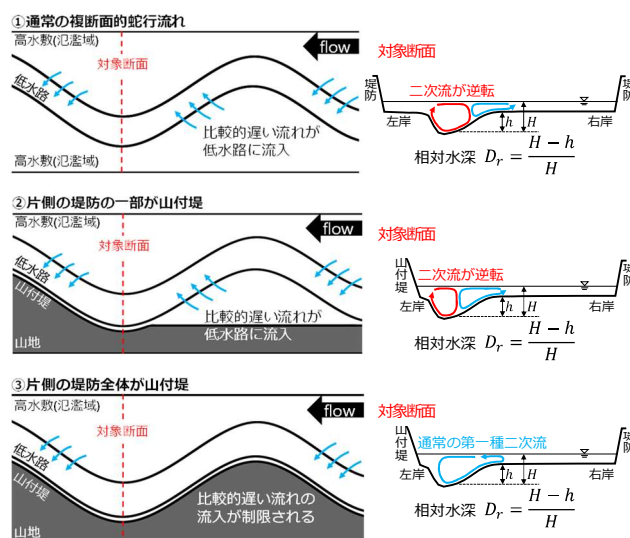


図-17 複断面的蛇行流れの発生機構と河道条件

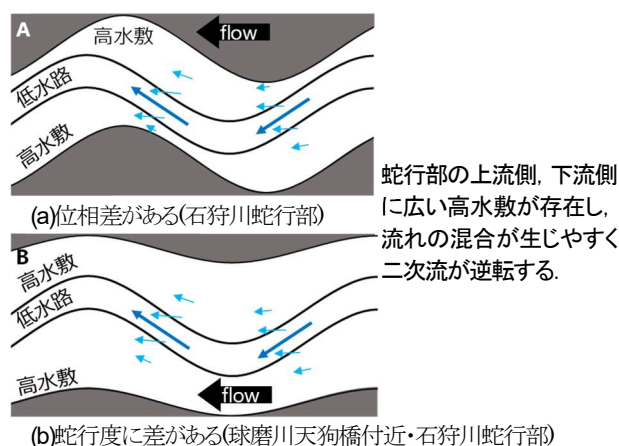


図-18 複断面蛇行区間における低水路線形と堤防線

を用いることで複断面的蛇行流れのような三次元性の強い流れ場や、それに伴う非平衡流砂運動を解析することが可能であることを示した。また、令和2年7月球磨川豪雨では、複断面蛇行河道区間において、低水路線形と堤防線形の蛇行度または位相に差があり、蛇行頂部付近の上流側に広い高水敷がある場合には、大規模洪水時に高水敷と低水路の流れの混合が生じ、複断面的蛇行流れが発生し得ることを示した。本研究の成果として複断面的蛇行流れが生じ得る区間の特徴を示すことにより、対策が必要な構造物の推定や、今後の河道づくり、特に治水・環境・利用の総合的管理の面で大きな活用が期待される。

参考文献

- 福岡:洪水の水理と河道の設計法,森北出版,2005.
- 長谷部,後藤,福岡,榊井:掃流砂と浮遊砂を一体的に扱う準三次元洪水流・河床変動解析法の開発と昭和56年8月石狩川洪水への適用,土木学会論文集 B1(水工学),2022.
- 田端,後藤,竹村,酒匂,福岡:令和2年7月球磨川豪雨における洪水流と氾濫流の一体解析による人吉市街地と狹隘区間の集落の被害分析,河川技術論文集,2021.
- 竹村,福岡: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),2019.