

超過洪水の河道管理・計画・設計には、高度な
数値解析技術は必要である
— 目的に応じた多様な解析法の必要性

1. はじめに

近年，異常な洪水が全国の河川流域で起こっており，これまでの河川の計画，設計，管理では考えられて来なかった河道の水理現象が見られた．

この水理現象は，図-1に示すように洪水流量の大きさと低水路の蛇行，高水敷の平面配置，高水敷の面積割合等と関係して起こり，大流量時の河道構造と堤防の関係を論ずる上で重要な現象である．

この水理現象は治水のみならず河川環境，河川利用からも重要で，今後の総合的な川づくりに結び付く課題であり，この現象を取り込んだ河道計画，設計技術の開発に向けて高精度な洪水流解析技術が必要とされる．

本論文は，**最初に**超過洪水に対して，洪水防御計画，特に堤防と河道の設計の課題をどのように解決していくべきかについて論じている．**次に**，洪水流の三次元エネルギー分布解析の必要性とその解析法を提示し，これを用いた堤防と河道の一体的設計法の考え方を提言し論じている．

複断面蛇行河道の高い水位時の洪水流 における第一種二次流と逆向きに回転 する二次流

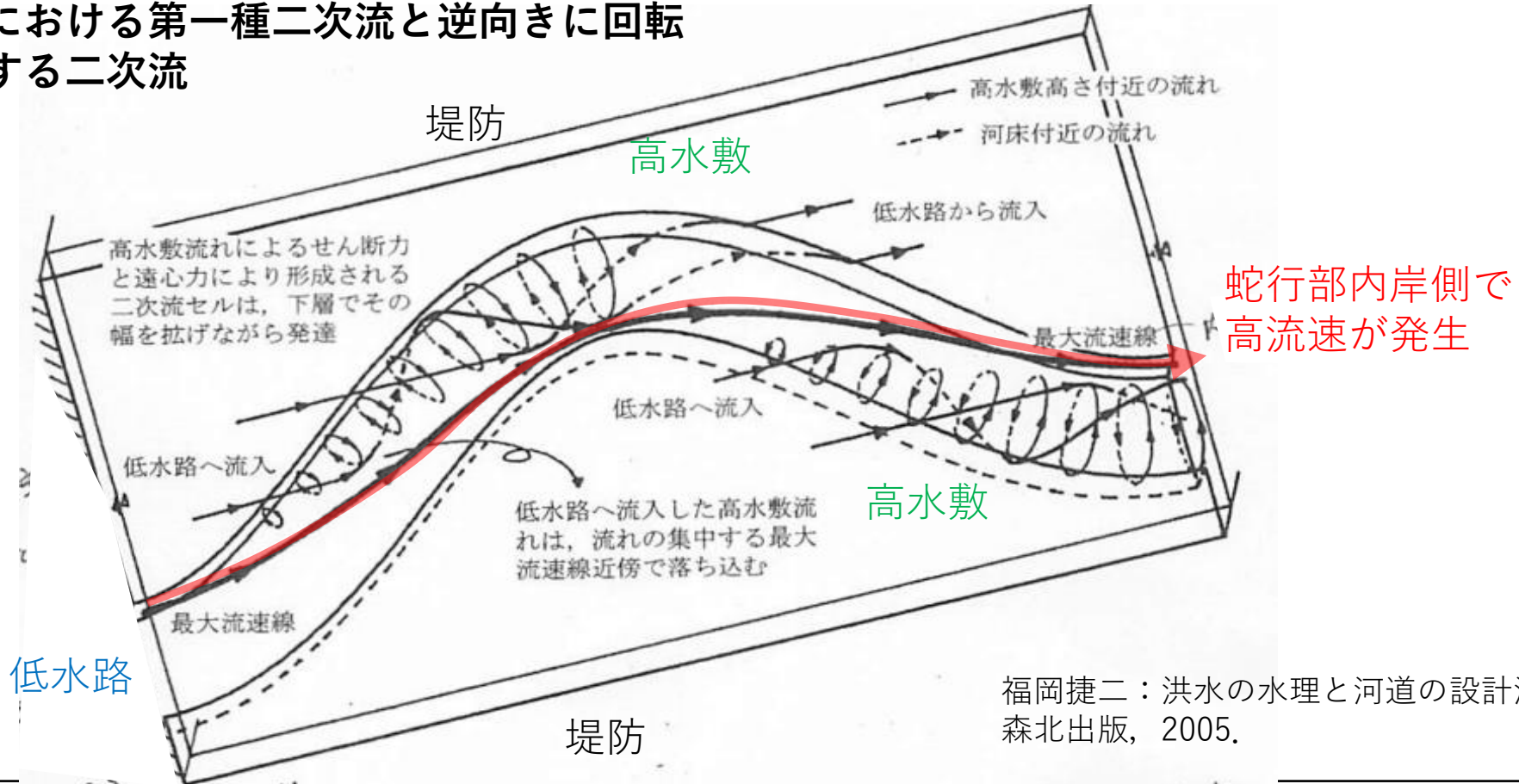


図-1. 複断面蛇行河道の洪水流の高い水位時における第一種二次流と逆向きに回転する二次流の発生

2. 洪水流の三次元エネルギー分布に基づく河道・堤防の一体的設計の必要性和洪水流の三次元エネルギー方程式の河道設計への適用を考える

これまで河道設計と関係する洗掘や堆積などの解析は、運動方程式に基づきその場所の流速、せん断力、乱れエネルギー等局所的な水理量に基づいて検討されて来たが、河床変動解析を除いては有力な方法になり得ていない。

洪水時の河床の洗掘、堆積等河床面の変動については、重力の作用による局所的なせん断力が卓越しており、運動方程式に基づき流速分布等からせん断力を求め河床変動解析を行っており、工学的に有効な解析法である。

堤防等河川構造物の侵食破壊は、洪水外力に対する構造物の耐力との大小関係で決まるが、どこに、どのような力が作用し、これに対して耐力がどのような状態になって危険になるかを判断するのは容易ではない。

図-2に示すように洪水流には、私たちが見ている水面の上に運動のエネルギーを水頭換算した速度水頭が乗った全エネルギー水頭の面がある。洪水流は、重力の作用下で全エネルギー水頭の勾配で流れており、この物理機構は、HWL 付近の水位で生じている水理現象にとって支配的である。

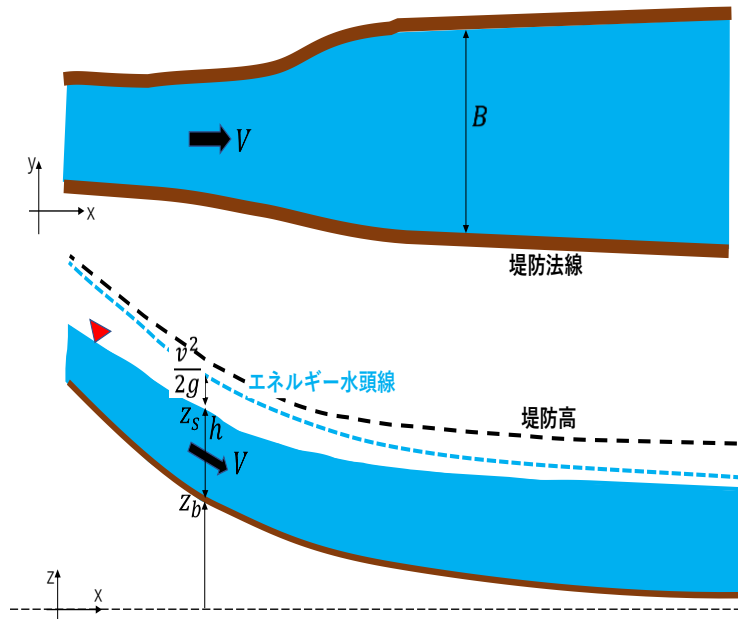


図-2a 洪水流の断面平均された水位・エネルギー水頭の縦断分布

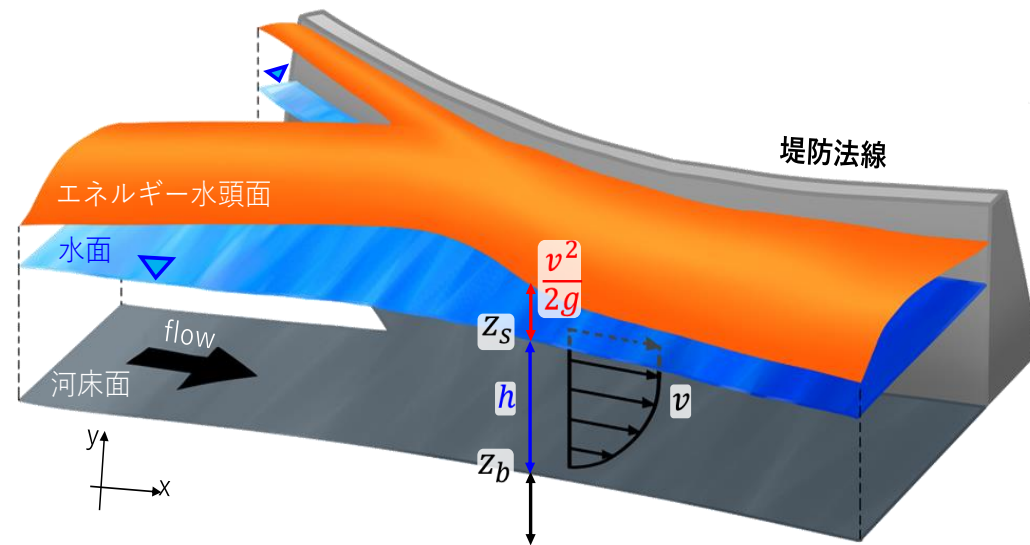


図-2b 本川と支川の合流点付近の三次元的なエネルギー水頭分布，水位分布

複雑な河道平面形，河床形状を持つ河川の大洪水は，時間・空間的に変化する三次元流れとなり，エネルギー分布の違いが流速分布，水面の変動や水面高さの変化になって表れる．

このことは堤防と河道は水理的に一体なものであり，洪水水位だけでなく洪水流の持つ三次元エネルギー分布を考え堤防と河道の設計を検討する必要性を示している．

今日の観測技術や問題個所の多くの実例や高精度な洪水流の解析から，河道の危険個所となり得る場所の絞り込みがかなりの程度可能になりつつある．

河岸や堤防と河道の設計や危険個所の対応には，両者を一体として考慮した解析が不可欠である．これには局所的なせんだん力が卓越する河床変動と異なり，河川の縦横断面形や流れの状態と関係する連続する壁面に作用する洪水流の圧力勾配，慣性力，重力等すべての力を考慮した三次元的な流れのエネルギー分布に基づき議論することが重要である．

これはまた，堤防や河道等の河川構造物は大きな広がりを持つ構造体であり，局所的な外力よりも堤防，河道の構造に起因する洪水流の三次元的エネルギー分布が，構造体の耐力に勝るようになった場所付近で破壊に至ると考え検討するのがよいと思う．

このような河岸や堤防の洗掘，堆積箇所を含む河道の危険区間について，まずは非静水圧準三次元運動方程式より求まる時空間的な三次元水理量を求め，次にこれらの水理量を用いて洪水流のエネルギー分布を求め，構造物の破壊との関係を調べることになる．

堤防の越流破壊や侵食破壊を洪水流のエネルギー分布の視点から論じるため、式(1)、式(2)の洪水流の連続方程式と非静水圧分布を考慮した準三次元運動方程式とエネルギー水頭を示す式(6)を用いて洪水流の三次元エネルギー分布の算定を行う。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$h \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j h \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -gh \frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \bar{p}'}{\partial x_i} - \frac{p'_b}{\rho} \frac{\partial z_b}{\partial x_i} - \frac{\partial h \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial h \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} - \frac{\tau_{bi}}{\rho} \quad (2)$$

流速 u , v , w は、それぞれ次式で与えられる。

$$u_i = (u_{si} - U_i) \cdot (12\eta^3 - 12\eta^2 + 1) + (u_{si} - u_{bi}) \cdot (-4\eta^3 + 3\eta^2) + U_i \quad (3)$$

$$w = \frac{\partial z_s}{\partial t} + u_i \left(\frac{\partial z_s}{\partial x_i} - \eta \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(h \int_0^\eta u_i d\eta \right) \quad (4)$$

$$\eta = \frac{z_s - z}{h} \quad (5)$$

次に、洪水流の持つエネルギーの大きさについて考察する。
流速の3成分を u, v, w とすると、河道でのエネルギー水頭 H_0 は、位置水頭 z と圧力水頭 $p/\rho g$ と速度水頭 $(u^2 + v^2 + w^2)/2g$ の和となり、式(6)で表現される。

$$H_0 = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{(u^2 + v^2 + w^2)}{2g} \quad (6)$$

エネルギー水頭は、その時間、場所でのエネルギーの高さを示しており、式(1)のエネルギー水頭の流れ方向の勾配で洪水は流れる。

複雑な形状を有する河道の洪水流は三次元的な流れとなり、このとき式(6)の p は、もはや静水圧分布とはならず非静水圧分布となる。三次元的なエネルギー式(6)に各位置の流速を乗じ、さらにこれらを流水断面積 A 内で断面平均とると一次元的なエネルギーフラックス E_0 を得る

$$E_0 = \frac{1}{Q} \int_A \left\{ z + \frac{p}{\rho g} + \frac{(u^2 + v^2 + w^2)}{2g} \right\} u \, dA \quad (7)$$

河道断面形の縦断変化が大きく，そのため流速が縦断的に大きく変化する場合や合流点，水衝部等では，HWL付近の水位内にあったとしても，エネルギー水頭が堤防天端の高さに達することは起こり得る．同様に，洪水流の持つエネルギーに対して，それを受ける河道の河積が広くなければ，また，狭窄部や河川構造物により下流へのエネルギーの輸送が滑らかに行われない河道区間や洪水中に流下障害が起こり局所的に大きなエネルギー上昇が起こる河道では，越流氾濫が起こることも考えられる．

以上の議論から，洪水流の三次元的なエネルギーの変化を解析に取り込んだ河道と堤防の一体設計の考え方を図-3，図-4に示す．

本講は，理念を中心に以下のようなことを論じている．

1. 超過洪水に対する堤防と河道の設計法の課題を示し，一体的設計法の必要性を論じた．
2. 一体的設計のために，非静水圧分布を有する準三次元運動方程式，連続方程式から洪水流の三次元エネルギー分布を求める方法を提示し，新しい解析法の必要性を論じた．
3. 堤防と河道の一体的設計に関して水位を指標とする現在の技術基準と洪水のエネルギー水頭を指標とする堤防高さの決め方を論じ，今後のさらなる検討の必要性を論じた．

3. エネルギー的考え方による堤防高さ（余裕高）の見積もりの提案

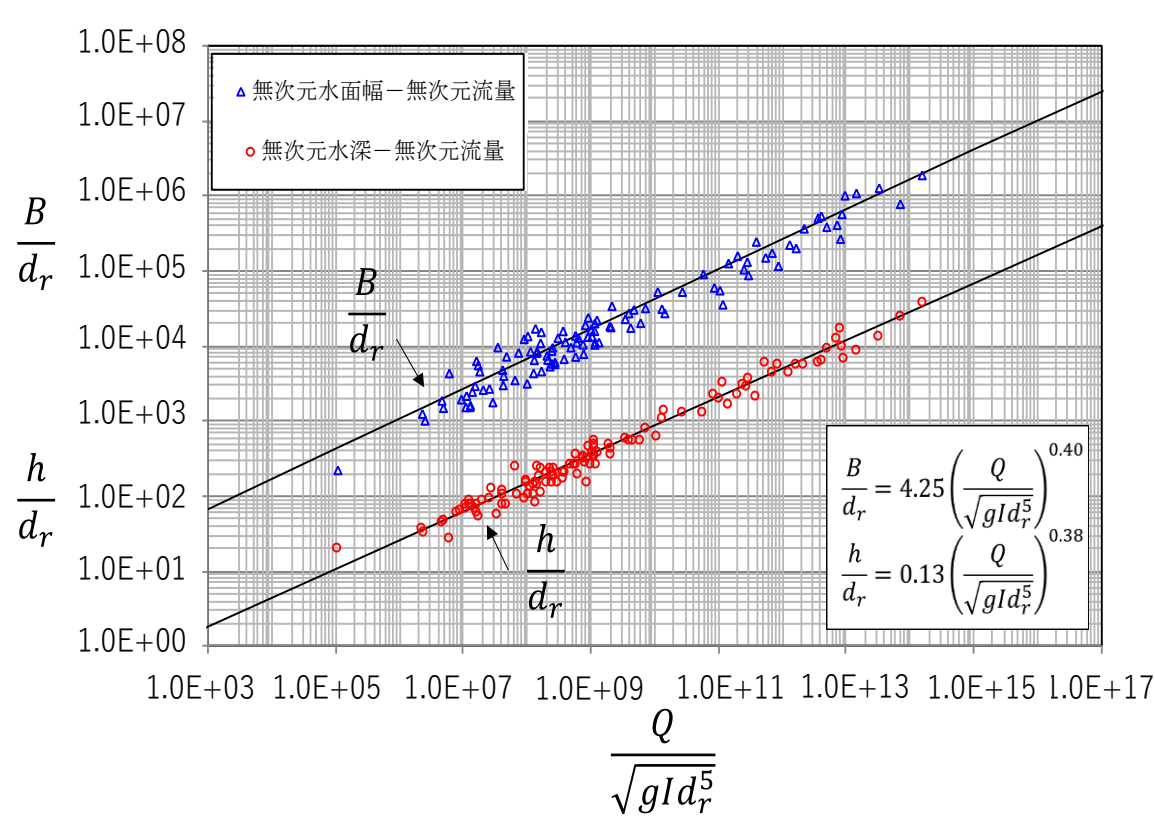


図-3 計画河道における無次元計画流量と無次元水面幅，無次元水深の関係⁶⁾⁷⁾

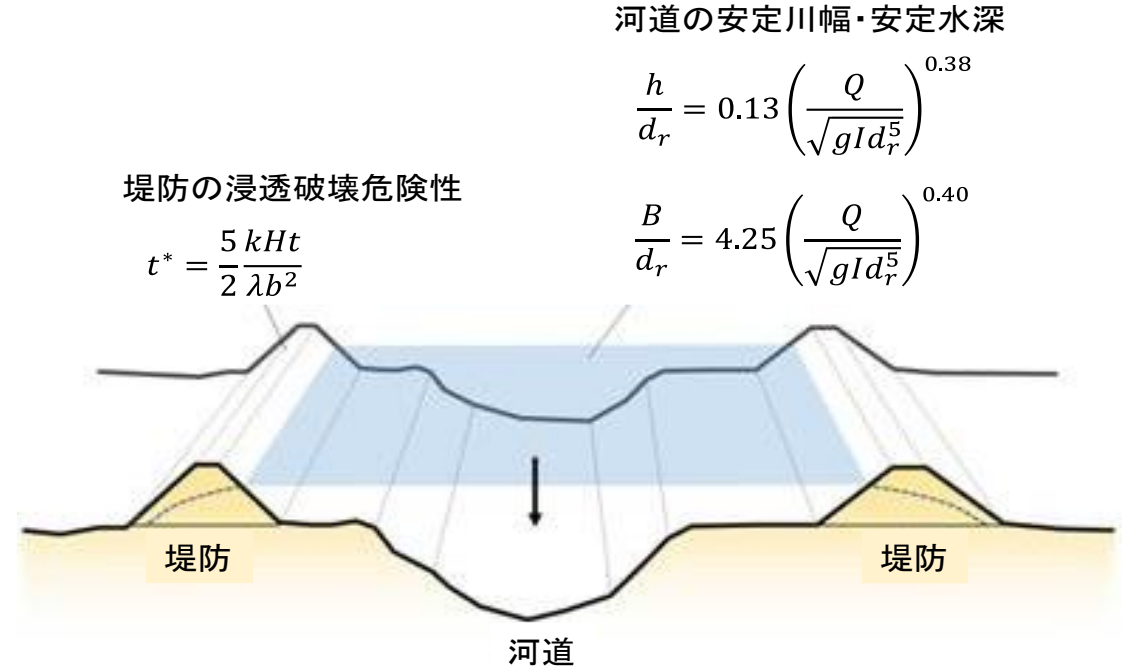


図-4 堤防と河道の一体的設計の考え方