

$f(x - u\Delta t, t)$ を推定する方法としては、図-2の●の2点間で f が急激に変化している場合や、1度増加して減少する場合などを考慮できるためには3次関数で表すのが妥当である。図-3に示すように x 方向に i 、 t 方向に n で離散量を表し、A点及びB点における f を $f(i-1, n)$ 、 $f(i, n)$ とする。AB間における f の分布を3次関数で、 X をBからAに向かった距離として表すと、(2)式のようになり、 $a_1 \sim a_4$ の4個のパラメータを含む3次式となる。

$$F = a_1 X^3 + a_2 X^2 + a_3 X + a_4 \quad (2)$$

これらのパラメータを決定するためには4つの条件が必要となり、このうち2つは、AおよびB点の既知点の条件より決定され、あと2つについてはCIP法では、AおよびB点の f の x 軸方向の勾配を用いる。従って、 i と $i-1$ の情報のみでAB間の f の分布 F が推定できることになり、これはCIP法のメリットの1つである。

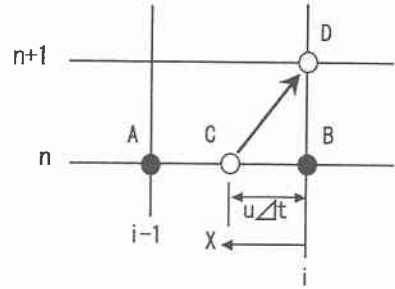


図-3 CIP法の説明模式図

3. 基礎式

3.1 1次元の非定常流れの基礎式

1次元の非定常流れの連続式(3)式に、運動方程式を(4)式に示す。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{\partial A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{gA} \frac{\partial (Au^2)}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial x} + I_f = 0 \quad (4)$$

ここで、 t は時間、 x は流下方向距離、 A は断面積、 Q は流量、 g は重力加速度、 u は断面平均流速、 H は水位、 I_f はエネルギー勾配である。上式は任意の断面形に適用可能な式であるが、1次元の河床変動計算に対応するため断面は矩形断面として扱うこととし、以降は

$$A = Bh, \quad Q = Au = Bhu \quad (5)$$

の関係が成り立つこととする。ここで、 B は川幅、 h は水深である。

(1) 不等流計算の場合

不等流計算の場合は、定常流れ (u 及び h が時間的には変化しない) とするため、流れの連続式 $Q = Bhu$ とエネルギー勾配 I_f は Manning 則を用い、広矩形断面を仮定して $u = \frac{1}{n} h^{2/3} I_f^{1/2}$ の関係を用いることにより (4) 式は (6) 式のように変形される。ここで、 n は Manning の粗度係数である。また後述するモデルケースの場合、小規模河床形態の領域は平坦河床に分類されるため、岸・黒木³⁾ の平坦河床及び砂州の抵抗則から Manning の粗度係数を換算して用いる。不等流計算では、(6) 式を差分化し、与えられた流量、河道形状・条件 (粗度係数など) のもとで下流端水位を境界条件として標準逐次計算を適用して水位や流速などの水理量縦断形を得る。また勾配や断面の急変点などで射流が現れる場合は、限界水深に置き換えて計算を進めることとする。

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{2g} \frac{u^2}{\partial x} + I_f = 0 \quad (6)$$

(2) CIP 法の場合

一方の CIP 法の場合は、(5)式の関係を用い、 h は x と t の関数、 B は x のみの関数 (B は時間的に変化しない)であることを考慮し、エネルギー勾配 I_f は Manning 則を用いることによって、(2)および(3)式は以下のようになる。これらの式に CIP 法を適用し流れの計算を進める。ここで、 η は河床高である。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial (uBh)}{\partial x} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial (h + \eta)}{\partial x} - \frac{gn^2 u^2}{h^{3/2}} \tag{8}$$

3.2 掃流量および浮遊砂量の基礎式

掃流量式は、次式の芦田・道上⁴⁾の式を用いる。

$$\frac{q_{Bi}}{\sqrt{sgd_i^3}} = p_i 17 \tau_{*i}^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{\tau_{*ci}}{\tau_{*i}} \right) \left(1 - \frac{u_{*ci}}{u_*} \right) \tag{9}$$

ここで、 d_i は砂粒子の粒径、下付添え字 i は混合における粒径 d_i の粒子に対する物理量であることを示す。さらに、 q_{Bi} は粒径別単位幅掃流量、 s は砂の水中比重、 p_i は粒径 d_i の粒子が河床に存在する割合、 τ_{*i} は粒径別無次元有効掃流量、 τ_{*i} は粒径別無次元掃流量、 τ_{*ci} は粒径別無次元限界掃流量、 u_* は摩擦速度、 u_{*ci} は粒径別限界摩擦速度である。

浮遊砂の河床からの浮上量は板倉・岸⁵⁾の式で求める。粒径別浮遊砂濃度の連続式は次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} (< c_i > h) + \frac{1}{B} \frac{\partial (Q < c_i >)}{\partial x} = q_{sui} - w_{fi} c_{bi} \tag{10}$$

ここで、 $< c_i >$ は水深平均の粒径別浮遊砂濃度、 q_{sui} は粒径別浮遊砂の単位面積当りの河床からの浮上量、 w_{fi} は粒径別浮遊砂の沈降速度、 c_{bi} は河床付近の粒径別浮遊砂濃度である。

全流砂の連続式は全ての粒径の流砂の交換を考慮し次式で表される。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1 - \lambda} \left[\frac{1}{B} \frac{\partial \sum_i (q_{Bi} B)}{\partial x} - \sum_i (q_{sui} - w_{fi} c_{bi}) \right] = 0 \tag{11}$$

ここで、 λ は河床材料の空隙率であり、 \sum_i は粒径別の量を合計した量であることを示す。

4. 計算条件

表-1 河道条件 (2パターン)

計算格子は、全河道延長 2,150m の区間を 50m 間隔に 44 分割して行う。モデル河道としては、河床勾配を 1/300 とし全区間の川幅を 30m の一定幅とするパターンを CASE1、同じく河床勾配を 1/300 とし、上流端から 1,000m までの川幅を 30m の一定幅とし、ここから 150m の区間で徐々に 60m まで拡幅し、さらにここから下流端までの 1,000m を川幅 60m の一定幅とする CASE2 の 2 パターンとする (表-1、図-4 参照)。

この 2 パターンの形状を初期河道として流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ を 24 時間流す計算を行い、不等流と CIP 法での流れと河床変動の計算結果について

項目	CASE1	CASE2
河道延長	2,150m	2,150m
断面間隔	50m ピッチ	50m ピッチ
河床勾配	1/300	1/300
川幅	全区間 B=30m (一定幅)	上流から 1000m 区間 : B=30m そこから下流 1,000m の区間 : B=60m
河床材料 (全区間同一)	10% 粒径 : 0.5mm, 50% 粒径 : 8.0mm 90% 粒径 : 30mm, 平均粒径 : 11mm	

て検討する。

下流端水位は等流水深とし、また *Bed Material Load* (浮遊砂、掃流砂) は上流端で動的平衡状態であると仮定し、計算区内では河床材料から計算されるものとする。ここで初期河床材料の存在割合は、10%粒径が0.5mm、50%粒径が8.0mm、90%粒径が30mm、平均粒径が11mmとし全区間同一の河床材料であると仮定し、粒径を最小0.1mmから最大40mmまで9粒径に分割し計算を行う。計算の時間刻み幅 (Δt) は不等流計算の場合は黒木⁶⁾らの方法より Δt を600秒とし、CIP法では Δt を10秒とする。

またCIP法による流れの計算方法は、時間的変動を考慮した非定常流であるため計算範囲の流速・水位が安定した段階で(今回の計算では24時間流した後)、河床変動の計算を開始することとした。

表-2 計算条件

項目	不等流計算	CIP法
計算流量	$Q=300\text{m}^3/\text{s}$	$Q=300\text{m}^3/\text{s}$
計算時間	24時間	24時間
計算時間刻み幅	600秒	10秒
粗度係数	$n=0.022$	$n=0.022$
下流端条件	等流水深(河床高変化あり)	
上流端条件	動的平衡条件(河床高変化なし)	

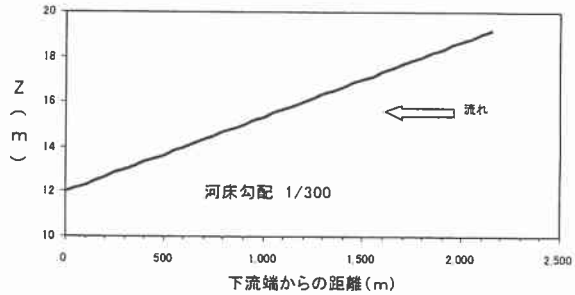


図-4 (1) 初期河道条件(河床縦断面)

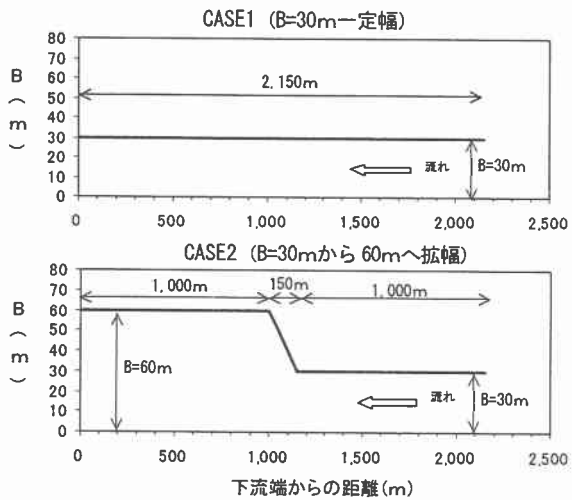


図-4 (2) 初期河道条件(川幅)上: CASE1, 下: CASE2

5. 計算結果

以上の条件で一定流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ を24時間流す計算を行いこの結果について述べる。ここで、この2つの手法で用いている河床変動計算の部分は同一の混合粒径モデルある。

5.1 CASE1の計算結果

CASE1の河道形状は、河床勾配が1/300、川幅が30mと全区間において一様断面としている。図-5は初期河道条件および流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ を用いて河床変動計算を実施した結果の水位および河床縦断面図である(①: CIP法, ②: 不等流計算)。

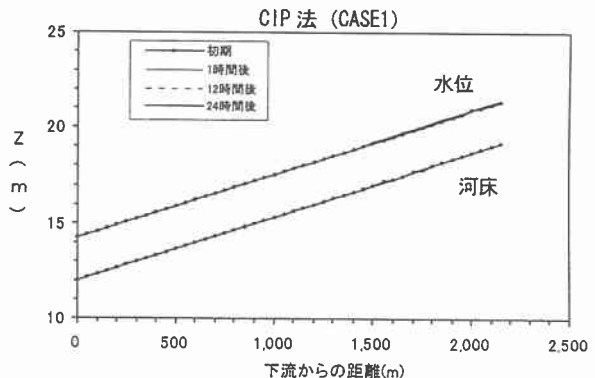


図-5 (1) 計算結果水位・河床縦断面図(CIP法)

河床変動を行う前の初期河床形状での水面形に着目してみると両計算結果に差が見られず、ほぼ等流状態で流れている。しかし、時間の経過とともに不等流計算の方が水面の振動が大きくなり河床にその影響が伝わっているのがわかる。これは初期の状態で限界水深 ($h_c=2.17\text{m}$) と擬似等流水深 ($h_o=2.23\text{m}$) との差が非常に小さい状態が全区間で続き流れがフルード数 $Fr=1$ (今回の計算結果では $Fr=0.95$ 前後で推移しており射流とはなっていない) 付近であることに起因する計算の不安定性が現れているものと考えられる。この不安定な状態が河床変動に影響したため時間が経過するにつれて変化が大きくなり24時間後でも定常状態にならない。

一方CIP法による計算結果からは計算の不安定性は見られず、時間の経過とともに若干の河床変動があるものの上流から下流までほぼ一定の状態で行われている。

5.2 CASE2の計算結果

CASE2の初期河道形状は、河床勾配を1/300とし、上流端から1,000mまでの区間は川幅30mで一定、ここから下流に向かい150mの区間で川幅を60mに拡幅し、ここから下流端までの1,000m区間の川幅を60m一定としている。

図-6は初期河道条件および流量 $300\text{m}^3/\text{s}$ を用いて河床変動計算を実施した結果の水位および河床縦断面図である(1):CIP法、(2):不等流計算)。

初期河床状態での流れの特徴としては、下流から1,150m地点の川幅が30mから60mへ拡幅する地点の直下流において支配断面が現れ常流から射流への遷移点付近において跳水が生じることである。したがってこのように跳水現象を含む流れを的確に表現できる手法が必要と考えられる。CIP法による計算結果では、常流から射流へと移行する遷移域においても水面形(流れ)はスムーズに計算されており、それに伴う河床変動も縦断的に滑らかな形状に計算されている。また時間の経過に伴い河床変動が徐々に進み拡幅部の上流側で洗掘、その下流側に堆積する傾向がみられる。

一方不等流計算の場合、縦断的に不安定な流れとなっており、特に拡幅部から上流の川幅30

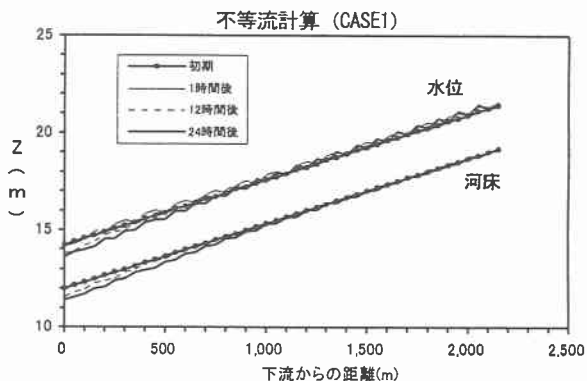


図-5 (2) 計算結果水位・河床縦断面図 (不等流計算)

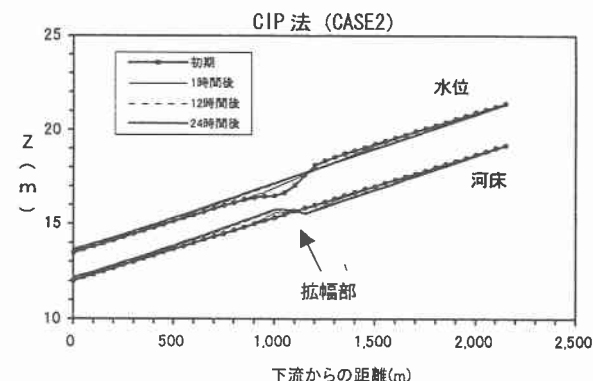


図-6 (1) 計算結果水位・河床縦断面図 (CIP法)

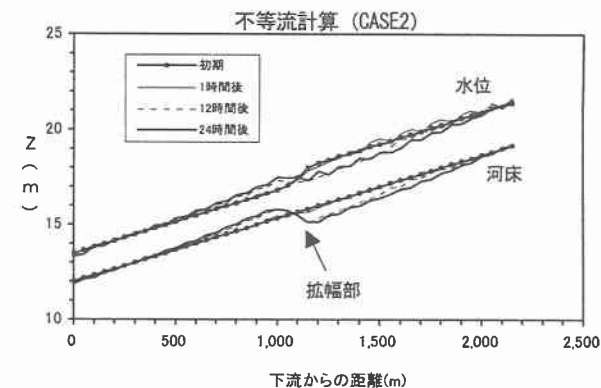


図-6 (2) 計算結果水位・河床縦断面図 (不等流計算)

mの区間において上下流間での水位変動が大きく不安定な流れに計算されている。また拡幅部付近の河床変動量は、CIP法のそれよりも大きくなっている。

図-7はCASE1およびCASE2の初期河道条件におけるCIP法により流れを計算した時のフルード数($Fr = u / \sqrt{gh}$)の縦断面図である。CASE2の初期の計算結果(実線で示す)では、下流からの流れが常流から射流に推移し、さらにそこから上流では常流に移行するスムーズな流れが計算されている。本研究で対象とした2パターンのモデル河道のようにフルード数が0.9から1.5を越えるような高速流の計算においてCIP法は有効な手段と考える。

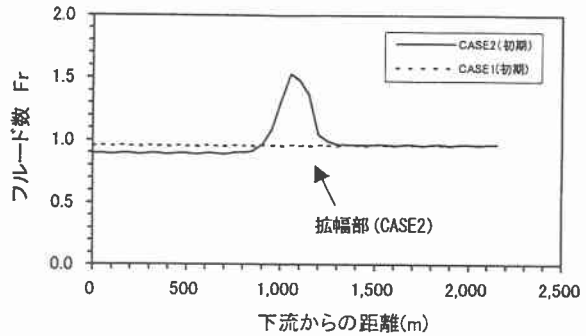


図-7 初期計算結果フルード数縦断面図 (CIP法)

6. おわりに

今回の研究を通じて、CIP法により流れと河床変動の計算を行った結果、常射流が混在する複雑な現象においても非常に安定した状態で計算が可能であることが分かった。しかしながら、不等流計算との比較のみでは実現現象を再現しているとは言い難く、今後はこのモデルを用いて移動床模型実験などの実現現象の検証および実河川への適用を試み、常射流が混在する流れの計算手法の1つとしてモデルの有効性を確かめていきたい。

また、急流河川では河道の安定化対策のひとつである床止め工(落差工)が設置されていることが多く、縦断的に連続する土砂移動現象を解明するにあたっては、これらの境界条件を取り入れた計算が必要と考えられる。

中長期にわたる急流河川の土砂移動現象を解明するにあたり本研究で提案するCIP法は、流れの計算に関して有効な手段となることが期待される。

参考文献

- 1) (財)北海道河川防災研究センター：第4章縦断面形の予測，河道設計論(案)，平成元年3月。
- 2) 清水康行，藤田陸博，平野道夫：連続床止め工を有する複断面河道における流れと河床変動の計算，水工学論文集第43巻，1999.2月。
- 3) 岸力，黒木幹男：移動床における河床形状と流体抵抗(1)，北大工学部研究報告，第67号，1973。
- 4) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，1972。
- 5) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, Proc. of ASCE, HY8, 1980.
- 6) 黒木幹男，岸力，清水康行：河床変動の数値計算法に関する研究，第17回自然災害総合シンポジウム講演論文集，1980。