

棧粗度中を進行する氾濫流先端部のモデリング

MODELING OF FLOOD FLOW FRONT ON STRIP ROUGHNESS

多田毅¹・富岡秀吉²

Tsuyoshi TADA and Hideyoshi TOMIOKA

¹正会員 博士(工学) 防衛大学校 建設環境工学科 (〒239-8686 横須賀市走水1-10-20)

²修士(工学) 陸上自衛隊 第4施設群第303水際障害中隊 (〒321-0145 都宮市茂原1-5-45)

The speed of flood front under dry-bed condition with strip roughness is measured and investigated with experiment and numerical simulation. The influences of the roughness spacing and its height and on the flow conditions are especially investigated. It is shown that the factors affecting the speed are backwater effect by the head strip and flow restraint effect by other strips. One dimensional numerical model for flood flows simulation on strip roughness is developed. The model employs both effects and improves accuracy of shallow flow on large roughness.

Key Words : flood flow, front speed, strip roughness, 1-D numerical model

1. はじめに

近年, 計算機の発達やGISの普及にともない様々な洪水氾濫のシミュレーション手法が提案され, 実用に供されている. 一方で, ハザードマップに求められる内容も年々高度になっており, 交通障害や歩行障害などは50cm程度の浸水でも生じるため, 都市部における内水氾濫, 高潮, 津波の遡上など複雑な地表面を持つ低平地でのシミュレーションの精度向上が望まれている.

都市部の洪水を考えた場合, 建物などの障害物や微細な地形が洪水流に与える影響を考慮することが不可欠であり, その手法は多岐に渡っている. たとえば非構造格子¹⁾や一般曲線座標系²⁾の採用, 街路ネットワークモデル³⁾など, 計算格子自体の形状を工夫するものなどが提案されているが, 精度向上のためには一般的な計算格子サイズ以下であっても無視し得ない凹凸が問題となる可能性がある. 他方, 土地利用や建物の占有率などから, 格子内の平均的な抗力や等価粗度として扱う方法など(たとえばAkiyama et al.⁴⁾, 福岡ら⁵⁾など)があるが, 複雑な地表面の状態に対応した等価粗度係数を経験的に決めなければならないといった問題がある. また, 洪水流の先端部の進行速度に着目した研究は少なく, たとえば平井⁶⁾のものなどがあるが, 複雑な地表面上の障害物と進行速度の関係について詳細な議論は行われていない.

本研究は, 一般的な氾濫計算で用いられるグリッドスケール以下の凹凸の中で, 特に流れに対する抵抗が最も大きいと思われる棧粗度が氾濫流の先端部の進行速度に与える影響について検討し, その再現モデルの開発を目的とする.

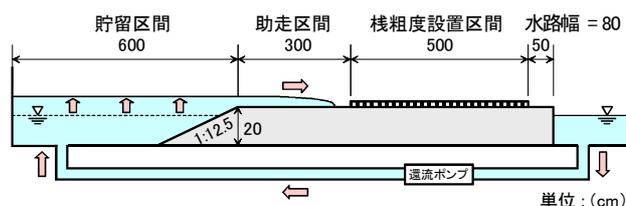


図-1 実験装置

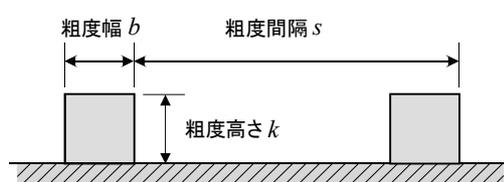


図-2 棧粗度の形状

2. 水理実験

(1) 実験の概要

棧粗度中を進行する氾濫流を再現するために, 図-1に示す実験装置を用いて水理実験を行った. 水路幅はXXcmである. ドライベッド状態の水路に棧型の粗度を配置し, 上流から進行してくる水の前線部が棧粗度群の中で減速され, 完全に通過するまでの様子を計測する. 粗度として, 水路の長さ約5mの区間にアルミニウム製の棧を一定間隔で複数本設置した(図-2). 棧の大きさは $b=2\text{cm}$, $k=2\text{cm}$ である. 粗度の間隔は $s=20, 40, 60\text{cm}$ の3ケースと棧粗度が無い場合の計4ケースの実験を行った. 水路に水が無い状態で還流ポンプを起動することにより上流から氾濫流を想定した水

を棧粗度区間に到達させた。流量は助走区間への侵入開始から約30秒間をかけて最大単位幅流量 $0.012\text{m}^2/\text{s}$ に達する。また、定常流の状態で様々な水深における棧に働く抗力の測定を行った。この結果は数値計算で用いる抗力係数として利用した。

(2) 計測方法

氾濫流先端部の進行を詳細に計測するために、ビデオカメラと波高計を使用した。水路上部から2台、側面から1台のビデオカメラで流れを撮影し、上部のビデオで各棧への到達時刻を計測することで先端部の移動速度を、側面のビデオで水深分布の時間変化を計測することで流量を数値化した。同時に、棧粗度区間直前に1本、棧粗度設置区間内に4本の容量線式波高計を設置し、得られた波形の時間差からビデオによる結果を検証した。また、助走区間の上流端にプロペラ流速計と超音波波高計を設置し、上流端からの流入流量を算定した。

また、棧粗度区間が完全に水没した定常状態において、棧粗度区間中央付近の1本の棧粗度に設置した力計を用いて棧粗度に働く抗力を直接計測し、様々な水深における抗力を測定した。同時に波高計から得られる水面勾配からも抗力係数を算定し、分力計の結果と合わせて利用した。

(3) 実験結果と考察

先端部が時間と共に進行する様子を図-3に示す。ここで、 t は最初の棧に水が到達してからの経過時間、 x は最初の棧からの距離である。一定時間棧の手前で停滞するため走時曲線は階段状になるが、図中では棧の手前に到達した時点での時刻と位置を表示している。この結果より、棧粗度が有る場合は無い場合に比べ、進行速度は約1/4~1/5程度まで減速すること、粗度間隔が狭いほど減速することがわかる。また、どのケースも粗度設置区間に突入した直後の曲線の傾きが全体の平均的な傾きに比べ小さいことから、突入直後は減速し、その後若干加速することがわかる。次に、これらの現象のメカニズムを定性的に考察する。

棧粗度領域内における先端部の平均進行速度は、先端部の棧とその手前の棧とで囲まれた領域が水で満たされるまでの時間に大きく支配されることが予想される。今、 n 番目の棧の手前に先端部がある場合、その区間に供給される単位幅流量は $n-1$ 番目の棧上の越流流量 q_{n-1} である。したがって、その区間に水が浸入し始めてから満たされるまでの時間を T_n とすると、その期間の平均流量 \bar{q}_{n-1} との間には次の関係がある。

$$T_n = \frac{k(s-b)}{\bar{q}_{n-1}} \quad (1)$$

したがって、その区間の平均進行速度は次式で近似することができる。

$$U_n = \frac{(s-b)}{T_n} = \frac{\bar{q}_{n-1}}{k} \quad (2)$$

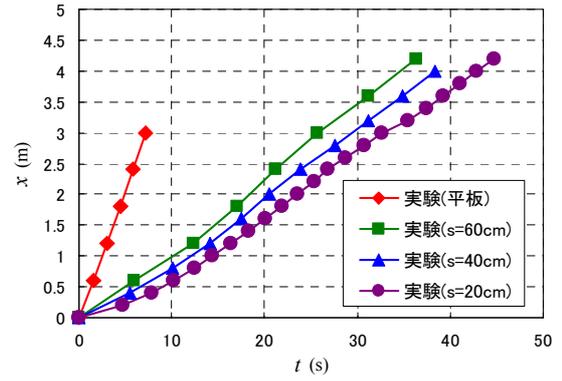


図-3 先端部の位置の時間変化

すなわち、進行速度は上流側からの平均流量に比例し粗度高さに反比例する。式(2)では粗度間隔の影響が消えているように見えるが、次式で定義される \bar{q}_{n-1} の中の T_n にその影響が現れる。

$$\bar{q}_{n-1} = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} q_{n-1} dt \quad (3)$$

ここで、 q_n は $n-1$ 番目の棧の越流開始と同時にゼロから徐々に増加することから、 T_n が長いほどその平均値も大きくなる。すなわち、粗度間隔 s が狭くなるとその区間が水で満たされるまでの時間 T_n が短くなり、流量が十分に増加しないうちに棧粗度間が水で満たされてしまうため平均流量も小さくなる。その結果、平均移動速度が遅くなると考えられる。

実験で見られた、棧粗度設置区間への突入直後の速度が小さくなる現象は、次のように理解することができる。多くの棧粗度に囲まれた区間では、 n 番目の棧の手前の空間が満たされていない間は q_{n-1} は $n-1$ 番目の棧からの段落ちであり、せき止めによる水位上昇の影響を受けない。ところが、最初の棧では、せき止めによる水位上昇が助走区間の流量 q_0 を一時的に減少させるため、速度も減少する。しかし貯留区間からの供給流量は変わらないため、助走区間の流量 q_0 はじきに回復し、速度も上昇に転じる。

これらの現象を数値計算で再現するためには、最先端の堰によるせき止め現象と、2番目以降の堰による流量の抑制現象とをモデルに反映させる必要があると考えられる。そして、せき止め現象は主として粗度高さ k の影響を考慮する必要があるが、流量抑制は粗度高さ k に加えて粗度間隔 s の影響を考慮する必要があると予想される。

3. 数値モデルによる再現計算

洪水流の振る舞いを水理実験のみで明らかにすることは困難であるため、本研究では数値実験を行う。まず、水理実験の再現計算を行い、モデルの妥当性を確認する。次に、現地スケールでの数値実験を行い、棧粗度中を進行する氾濫流の振る舞いとそのモデル化について検討する。

(1) 一次元数値モデル

本研究では、数値計算モデルの支配方程式として、以下に示す1次元浅水長波の式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{h} \right) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau}{\rho} \quad (5)$$

ここで、 h は水深、 H は水位、 M は線流量、 ρ は水の密度、 τ は抵抗力である。上式は、Staggered leap-frog法により差分化し計算に用いられる。遡上・段落ちなどによる急激な流れの変化により発散することを防ぐため、移流項は一次精度の風上差分を用いた。数値粘性による精度の低下が懸念されるが、棧粗度中においては先端部の波形の精度よりもせき止めのメカニズムの再現精度の方が支配的であり、結果に大きな影響は無いと判断した。

摩擦による抵抗力はManningの粗度係数 n を用いて式(6)で表される。

$$\tau = \frac{\rho g n^2 M |M|}{h^{7/3}} \quad (6)$$

棧粗度による抵抗力は、棧が水没している場合は、抗力係数 C_D を用いて孤立棧による抵抗力 F_D として式(7)のように表すことができる。ここで、 k は棧の高さである。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D k \frac{M |M|}{h^2} \quad (7)$$

本モデルでは、ひとつの棧の抗力をその棧の後端の格子境界が全て受け持つこととし、抗力項を式(8)で与えた。ここで、 Δx は格子サイズ、 h_{i-1} は棧後端の水深である(図-4)。

$$\tau = \frac{1}{2} \rho C_D \frac{k}{\Delta x} \frac{M_i |M_i|}{(h_{i-1} + k)^2} \quad (8)$$

後端に与えた理由は、実験の観察および水位の計測結果より、棧背後の強い渦により圧力が低下し水位も低下していることが抗力の主たる要因であると考えられるからである。棧粗度の抗力係数は粗度の大きさ、間隔、水深などの影響を強く受け一般式は存在しないため、水深を6cmから20cmまで変化させた定常流による水理実験により抗力係数の算定を行い、足立⁸⁾の既報の結果とあわせて式(9)の近似式を作成した。

$$C_D = 5.872 \left(\frac{h_i}{k} \right)^{-1.004} \left\{ 0.509 \log \left(\frac{s}{k} \right) - 0.143 \right\} \quad (9)$$

棧の形状が水路底面の標高として表現されていること、非水没時に水が棧の背後に存在することがないことから、棧が水没していない場合は特別に抗力を与えることはしていない。水流が棧上に遡上するときは本間の越流公式(10)を、棧上から背後に落下するときは段落ち公式(11)を用いた。

$$M = 0.35h\sqrt{2gh} \quad (10)$$

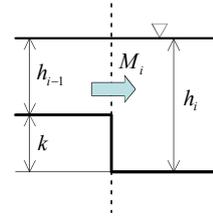


図-4 棧の抗力を与える場所

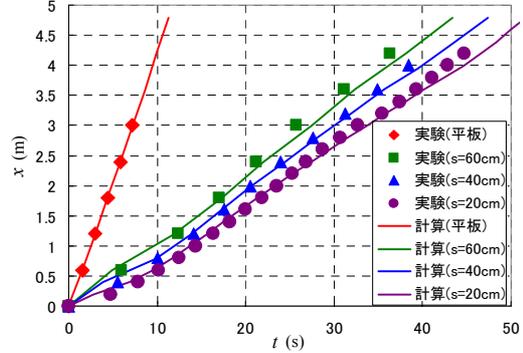


図-5 計算結果と実験結果の比較

$$M = \left(\frac{2}{3} \right)^{3/2} h \sqrt{gh} \quad (11)$$

このモデルでは Δx を棧の幅より小さく設定し、棧の形状を水路底面の標高として直接取り扱うため、最先端の堰によるせき止め現象と、2番目以降の堰による流量の抑制現象のいずれも正しくモデル化できることが期待される。

(2) 水理実験の再現計算

数値モデルの信頼性を確認するために水理実験の再現計算を行い、その再現性を確認した。水路および棧粗度の形状は水理実験と同様、助走区間3.0m、棧粗度設置区間5.0m、粗度高さ $k=2$ cm、粗度幅 $b=2$ cm、粗度間隔 $s=20$ cmとした。また、粗度を配置しない平板での計算も行った。計算条件は、 $\Delta x=1$ cm、 $\Delta t=1/200$ sとした。上流側の境界条件は水理実験で計測した流量時系列を与えた。底面の粗度係数は $n=0.006$ を、移動限界水深は武田ら⁷⁾にならない水深の1/1000程度となる1/100mmを用いた。実験時の底面の材質は無塗装のステンレスであり、粗度係数は一般に0.01～0.012であることが知られている。しかし、棧粗度が無い区間での進行速度および先端部の縦断面形状が実験と一致するのはこの値の組み合わせであったことから採用した。一般的な値と一致しない理由として、底面が完全な乾燥状態でなかったため先端部の極めて薄い水深に対する表面張力の影響が無視できなかったこと、移動限界水深の値が適切でなかったことなどが考えられる。抗力係数 C_D には近似式(9)を用いた。

再現計算の結果を図-5に示す。粗度間隔の影響および粗度設置区間最初の大きな減速が再現されており、最先端の堰によるせき止め現象と、2番目以降の堰による流量の抑制現象のいずれも正しくモデル化できているといえる。

4. 数値モデルによる現地スケールでの数値実験

(1) 計算条件

現実の氾濫流の振る舞いを検討するために、現地スケールでの数値実験を行う。地盤は水平とし、上流端から5m地点より水田のあぜ道を想定した栈粗度を一定間隔で配置した。粗度の形状は粗度高さ $k=0.5\text{m}$ 、粗度の幅 $b=0.5\text{m}$ 、粗度間隔 $s=10\text{m}$ を基本とし、 k と s を様々に変化させて計算を行った。栈の形状は底面の標高を高くすることで表現している。上流側の境界条件として、水位 h_0 のみを与え続けた場合と単位幅流量 q_0 のみを与えた場合の二種類について検討した。前者は破堤地点から離れた場所で地形に応じて主として重力により氾濫が広がるケースを、後者は破堤地点近傍で一定流量が地形にかかわらず供給され氾濫が広がるようなケースを想定している。

計算条件は $\Delta x=0.25\text{m}$ 、 $\Delta t=1/50\text{s}$ とした。また底面の粗度係数は $n=0.03$ とした。

(2) 氾濫流の進行速度の支配要因

流量を境界条件として与え、粗度高さを変えた結果を図-6に、粗度間隔と上流側流量を変えた場合をそれぞれ図-7と図-8に示す。この結果より、粗度高さの影響が非常に大きく、粗度間隔の影響は相対的に少ないことがわかる。また、底面の粗度係数は $n=0.015$ 、 $n=0.06$ と1/2倍から2倍まで変動させても到達距離の差は5%以下となった。また栈の抗力係数も極めて影響が小さいことが確認された。

上流側の境界条件を水位で与えた場合でもこれらの傾向は同様であった。そこで次に、栈粗度による進行速度の低下を等価粗度モデルで再現することを試み、栈粗度の形状と境界条件が等価粗度に与える影響について検討する。

(3) 等価粗度によるモデル化

栈粗度は氾濫流の先端部をせき止め、水没した後も水流全体への抵抗力を発生させる。これらの減速効果を等価粗度のみで再現することが可能であれば、現在すでに広く用いられている等価粗度法が適用できることとなる。そこで、前節のように栈を地盤高さで表現したモデルを地形モデルと呼び、栈粗度の無い平板上に通常より大きな粗度係数を与えることで栈粗度の減速効果を表現するモデルを等価粗度モデルと呼ぶこととし、様々な条件下での等価粗度を決定した。

等価粗度係数の決定方法は、計算開始から10分間の進行距離(すなわち10分間の平均速度)が地形モデルと一致する等価粗度係数を試行錯誤で探索することとした。10分間とした理由は、現実の氾濫として数百メートル以上の規模を想定しているためである。

粗度係数の探索例を図-9に示す。このように、最終的な到達地点が一致するような等価粗度を用いると、そこまでの経路も全て完全に一致することがわかる。したがって、適切

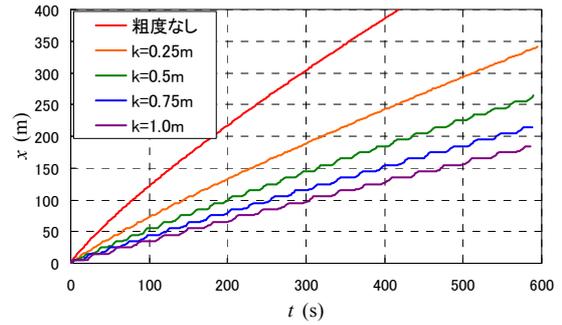


図-6 粗度高さの影響($s=10\text{m}$, $q_0=0.5\text{m}^2/\text{s}$)

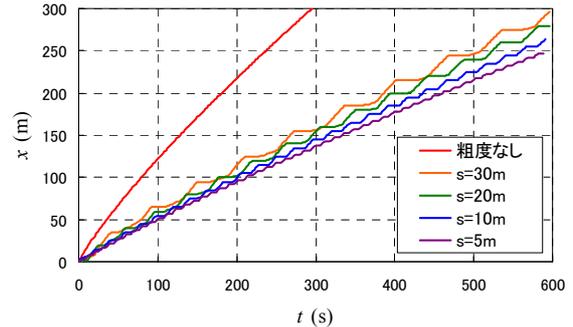


図-7 粗度間隔の影響($k=0.5\text{m}$, $q_0=0.5\text{m}^2/\text{s}$)

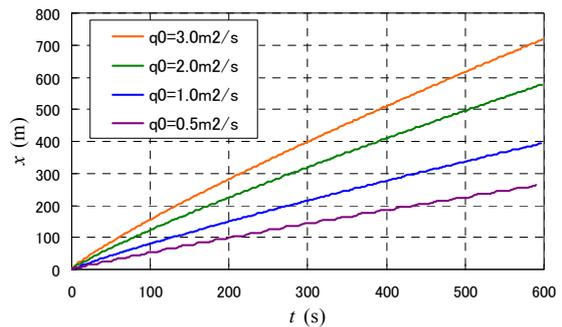


図-8 上流側流量の影響($k=0.5\text{m}$, $s=10\text{m}$)

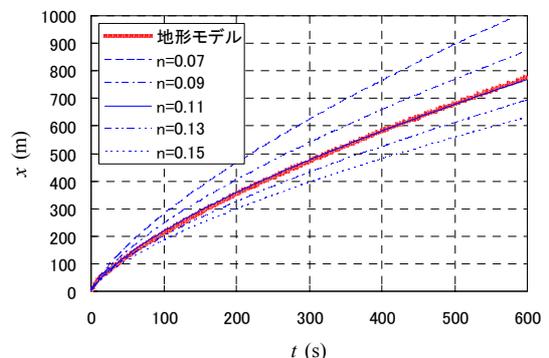


図-9 等価粗度の探索例($s=10\text{m}$, $k=0.5\text{m}$, $h_0=3.0\text{m}$)

な等価粗度を与えることでせき止め現象も含めたモデル化が可能であるといえる。

次に、上流側の境界条件として与えた水深と粗度高さ

等価粗度との関係を図-10に示す。また、上流側に流量を与え、計算時間中の最上流端の平均水深で整理したものを重ねた例を図-11に示す。これらのグラフより、水深が浅くなると急速に等価粗度係数が増大すること、粗度高さが低くなると等価粗度係数が減少することなどがわかる。また、流量を与えた場合でも上流端の平均水深で等価粗度係数を評価できることがわかる。さらに、粗度間隔を変化させた場合は間隔が狭くなるほど等価粗度係数が増加すること、またその傾向を保ったまま、水深が浅くなるにしたがい急速に等価粗度係数が増大することが確認された。以上より、等価粗度係数は粗度高さ、粗度間隔そして相対水深に応じて決定すればよいことがわかる。特に水深が浅い場合、相対水深 h_0/k の影響が支配的である。

(4) 移動限界水深によるせき止めモデルの導入

図-11に基づき等価粗度係数を水深の関数として与えても、現実の氾濫計算にそのまま適用することは難しい。良く知られているように、先端部の水深が浅くなると摩擦勾配が極めて大きくなるため計算不能になるが、特に n が大きくなるほどこの傾向は強い。また計算上粗度高さ以下の水深があり得るため、その場合の等価粗度の与え方にもあいまいさが残る。先端部の水深が粗度高さに達するまで現実の氾濫流は進行しないため、等価粗度係数が粗度高さ以下で無限大になることが問題なのである。

水深が非常に浅くなると、摩擦勾配の問題に加え差分スキーム中で水深が分母に存在するために計算不能となることもあり、水深が一定の値になるまで隣のグリッドに水が移動しないよう制限することが一般に行われている。岩佐ら⁹⁾、川池ら¹⁰⁾、戸田ら¹¹⁾はそのしきい値を移動限界水深と呼び、武田ら⁷⁾は流れの先端部の再現のためには水深の1/1000程度のオーダーにすべきであると報告している。本研究では断らない限り $1 \times 10^{-5} \text{m}$ としたが、意図的に移動限界水深を高く設定することにより栈粗度によるせき止めをモデル化することを提案し、せき止めモデルと呼ぶ。この手法は計算メッシュ間隔 Δx で栈粗度を設置したことに相当するせき止め効果が期待される。式(2)より先端部のせき止め自体は粗度間隔の影響を受けないことから、本モデルの効果も Δx の影響を受けないと予想される。先端部の水深が移動限界水深を超えた時点でそこでの抵抗はゼロとなるので、2本目以降の栈の流量抑制効果を再現するために等価粗度モデルを併せて適用する。

移動限界水深を粗度高さと同じ値に設定した状態で算出した等価粗度係数の例を図-12に示す。図-11と比較すると、低水深時の等価粗度係数が小さくなっている。これは、せき止めモデルが先端部のせき止めによる減速分を分担したためと考えられる。

(5) せき止めモデルによる精度の改善

前述したように、等価粗度モデルにおいて等価粗度係数

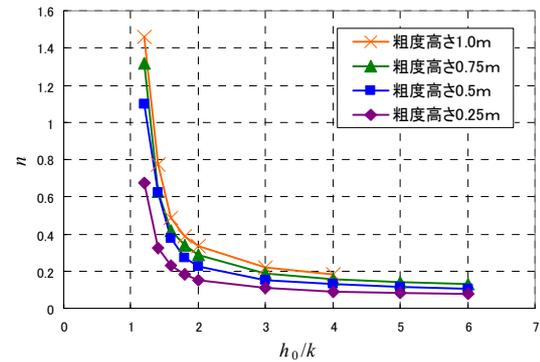


図-10 相対水深と粗度高さと等価粗度の関係(水深境界, $s=10\text{m}$)

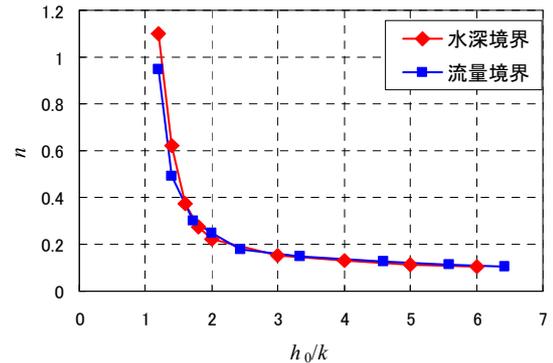


図-11 相対水深で基準化した等価粗度係数($s=10\text{m}$, $k=0.5\text{m}$)

を図-11にしたがい水深の関数とすると先端部付近で計算不能となる。そこで、大水深時の $n=0.105$ をそのまま定数として用いた場合の計算結果と、移動限界水深を k としたせき止めモデルを併用した場合、さらに、せき止めモデルと同時に等価粗度係数を図-12の流量境界の場合に合わせて水深の関数とした場合について、それぞれ精度の比較を行った。結果を図-13と図-14に示す。縦軸は、地形モデルで得られた10分間の平均進行速度 u_k と各モデルで得られた速度 u との比であり、値が大きいほど速度を過大評価していることを意味し、1.0のときに誤差ゼロである。

せき止めモデルを併用することにより、水深が浅い時の誤差が流量境界の場合はほぼゼロに(図-11)、水深境界の場合も最大1/2程度まで減少することがわかる(図-12)。一方、せき止めモデルと併用する等価粗度を水深に応じて変化させた場合、小水深時の精度はさらに改善されるが大水深時の速度を過小評価してしまう。現実の氾濫計算において大水深(すなわち大流量)の誤差は好ましくないため、等価粗度は一定値の方が適切であると考えられる。

以上より、土地利用や地表面の微地形に応じて等価粗度係数とせき止め高さ(移動限界水深)を定数で与える方法が、簡便かつ高精度な結果が得られる手法といえる。すなわちせき止め高さを現実の凹凸の高さに、等価粗度係数を大水深(大流量)の場合の等価粗度係数に設定することで、大水深時の精度を損なうことなく、低水深時の精度を改善することができる。

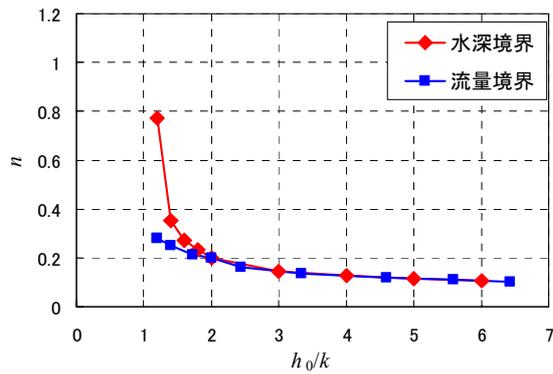


図-12 相対水深で基準化した等価粗度係数(せき止めモデル併用, $s=10\text{m}$, $k=0.5\text{m}$)

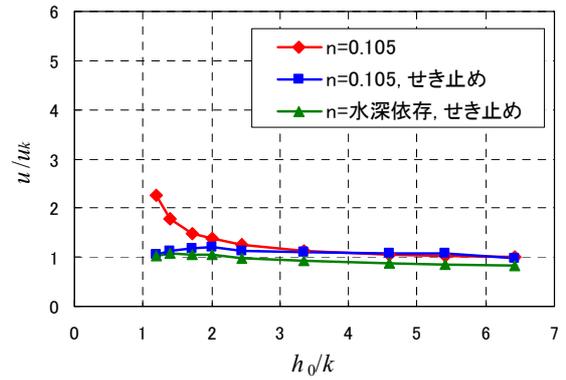


図-14 モデルによる精度の違い(流量境界, $s=10\text{m}$, $k=0.5\text{m}$)

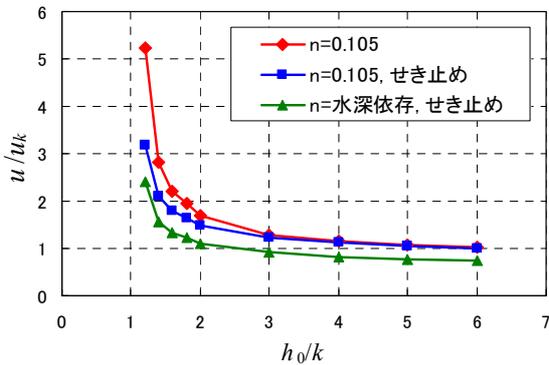


図-13 モデルによる精度の違い(水深境界, $s=10\text{m}$, $k=0.5\text{m}$)

5. おわりに

栈粗度中を進行する氾濫流の先端部の振る舞いを明らかにするために、水理実験とその結果に基づいた数値実験を行った。その結果、進行速度を支配するのは氾濫流先端部の栈によるせき止め現象と2番目以降の栈による流量の抑制との相乗効果であり、いずれも相対水深の影響が最も大きいことを明らかにした。さらに、せき止め現象を移動限界水深で、流量の抑制を等価粗度でモデル化することを提案し、等価粗度のみのモデルに比べ大幅に精度が向上することを示した。

一般に氾濫計算は平面二次元で行われる。本モデルの二次元への拡張にはさらなる検討が必要であるが、あぜ道で区画された水田などでは1次元と同様の議論が成立することが予想される。また、等価粗度係数に加え平均的なせき止め高さを土地利用毎に設定することにより、地形データに含まれない微細な道路やあぜ道のせき止め効果の影響をモデル化することが可能となる。さらに、都市の建物敷地や公園などの境界、地下街への出入り口、盛土された道路などに沿った計算格子を作成し、特定の格子境界に現実の障害物の高さに対応した移動限界水深を設定することで、局所的なせき止め現象による氾濫流の二次元的振る舞いをモデル化することが可能になると期待される。

謝辞：

本研究は、国土交通省と土木学会の共同研究、河川懇談会の援助を受けた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 井上和也, 川池建司, 戸田圭一: 非構造格子による氾濫解析モデル, 京都大学防災研究所年報, 第42号B-2, pp.339-353, 1999.
- 2) 呂福祿, 藤田裕一郎: 一般曲線座標系による開水路流れ解析へのMacCormack法の適用性に関する検討, 土木学会論文集, No.649/II-51, pp.61-66, 2000.
- 3) 川池健司, 井上和也, 林秀樹, 戸田圭一: 都市域の氾濫解析モデルの開発, 土木学会論文集, No.698/II-58, pp.1-10, 2002.
- 4) Akiyama, J., Ura, M., Shigeeda, M. and Arita, Y.: Numerical model for 2-D transient free surface flows with obstructions, *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, JSCE, Vol. 18, No. 1, pp.85-95, 2000.
- 5) 福岡捷二, 川島幹雄, 松永宜夫, 前内永敏: 密集市街地の氾濫流に関する研究, 土木学会論文集, No.491/II-27, pp.51-60, 1994
- 6) 平井真砂郎, 道上正規, 檜谷治: 都市域における浸水氾濫解析に関する基礎的研究, 水工学論文集, 第40巻, pp.405-412, 1996.
- 7) 武田誠, 松尾直規: 氾濫水に与える下水道システムの影響に関する数値解析的検討, 水工学論文集, 第44巻, pp.467-472, 2000.
- 8) 足立昭平: 人工粗度の実験的研究, 土木学会論文集, 第104号, pp.33-44, 1964.
- 9) 岩佐義朗, 井上和也, 水鳥雅文: 氾濫水の水利の数値解析法, 京都大学防災研究所年報, 第23号B-2, pp.305-317, 1980.
- 10) 川池健司, 井上和也, 戸田圭一: 非構造格子の都市氾濫解析への適用, 水工学論文集, 第44巻, pp.461-466, 2000.
- 11) 戸田圭一, 井上和也, 村瀬賢, 市川温, 横尾英男: 豪雨による都市域の洪水氾濫解析, 土木学会論文集, No.663/II-53, pp.1-10, 2000.

(2006. 9. 30受付)