

浅水格子乱流に関する実験的研究

Experiment on shallow grid turbulence

北海道大学工学部 水工水文学研究室
北海道大学准教授 工学研究科北方圏環境政策工学専攻
北海道大学教授 工学研究科北方圏環境政策工学専攻

○学生員 齊藤真治(Shinji Saitou)
正会員 木村一郎(Ichiro Kimura)
正会員 清水康行(Yasuyuki Shimizu)

1. はじめに

我が国の都市部の多くは河川と共に発展してきた。都市部において河川は治水や利水、環境保全などの面で大きな役割を担っている。しかし同時に河川の氾濫区域に都市部が位置し、常に氾濫の危険がそばに存在するということである。都市部には人口や資産、中枢管理機能が集積していて、国土の10%にすぎない河川の氾濫の可能性のある区域には総人口の約50%、資産の約75%が集中している。一度河川が氾濫すると生命、財産、経済に甚大な被害を及ぼすことは容易に予想できる。実際に全国で集中豪雨や台風による洪水氾濫は多発しており、甚大な被害が出ている地域は多く存在している。

これに対し、洪水の氾濫を防ぐために堤防を設けられているが、予測値を大きく超える外力によって破堤氾濫がおこる可能性は十分にある。近年の地球温暖化や異常気象により予測を超えた大規模な氾濫が起こる可能性は大きくなっており、氾濫地域の危機管理対策が強く求められている。破堤による人的被害、物的被害を最小限にするために、洪水ハザードマップなどを一般住民に公表するケースが増えており、洪水時の適確な避難体制など、ソフト面で高い予測精度が要求されている。特に密集市街地では、避難計画を検討する上で氾濫域内の家屋などの抵抗を建物や道路などを適切にモデル化しなくてはならない。従来の氾濫シミュレーションの研究では、中川りは家屋密集度に応じた粗度係数や、模型実験により算出した抗力係数で計算し、福岡ら²⁾は建物占有率に応じた粗度係数を適用することにより氾濫流の挙動を計算している。ところが、粗度係数は広い領域の平均的な氾濫流の挙動を表すのには適しているが、建物や道路配置を考慮できないため、建物群背後などの水深や流速が急激に変化し、流速や圧力、水深分布も変化している領域の局所的な流速や水深を考慮することが出来ず、最適な避難経路の検討することが出来ない。急速な都市化により高層ビルなどが多く建ち都市部の形態が大きく変化していることも考慮していかなければならない。

また、堤防やダム、樹林帯などの施設設備により氾濫流を制御することで家屋などの構造物への被害の軽減を図るハード面の対策も求められている。特に樹林帯の設置効果は過去の調査結果でも被害軽減効果が確認されている。多自然川づくりの方針の面でも樹林帯による氾濫流制御効果への期待は高まっている。しかし、破堤氾濫は突発的で実績データが乏しいこともあり、樹林帯が氾

濫流に及ぼす影響や建物に作用する流体力の軽減効果は未だに把握されていない。

氾濫域の建物群や河川内の樹木を単純化したモデルとして、本研究では浅水格子乱流を考える。浅水格子乱流とは開水路浅水流中に等間隔で設置された格子群の下流側に形成される乱流場を指し、二次元格子乱流としての特徴に、底面と水面の影響といった三次元性が加わった複雑な乱流場である(図-1 参照)。

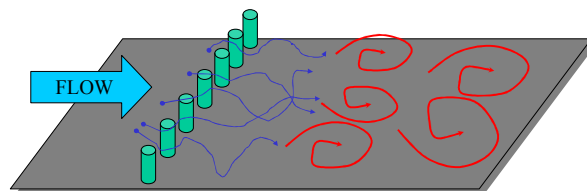


図-1 浅水格子乱流

一般に二次元流れにおける格子乱流は等間隔のスリット後方の乱流場のことを指し、三次元流れの格子乱流とは一様な網目状の格子を通過させ背後に生じる乱流場のことを指す。二次元流れにおける格子乱流と三次元流れにおける格子乱流とでは、乱流場の統計的性質において大きな違いが表れる特質がある。最も大きな違いは乱れカスケード現象に現れ、二次元乱流場では小スケールの渦から大スケールの渦へと向かうアップカスケディングが卓越するのに対し、三次元乱流場では大スケールの渦から小スケールの渦へと向かうダウンカスケディングが卓越する。そのほかにもスペクトル分布や乱れの減衰過程にも明確な相違点が見られる。

本研究では、氾濫流のシミュレーションモデルの評価や、河川内に存在する抗水制や植生群、樹木群による流れへの影響を再現したモデルの評価の第一段階として横断方向のスケールが限られた開水路内での浅水格子乱流の基本的な性質について、実験的に検討を行ったものである。特にアップカスケディングに及ぼす格子スケールに着目して検討を実施する。

2. 浅水格子乱流に関する既往の研究

2.1 Uijtewaal らの研究

Uijtewaal & Jirka (2003)³⁾は、幅 5.4m、長さ 10.5m の開水路の上流端から 3.0m の位置に、水路幅方向に等間隔で円柱群あるいは角柱群を設置して、一連の実験を行った。実際に使用されたのは、直径 63mm の円柱と直径

125mm の円柱、一辺 115mm の角柱の 3 種類であり、主に格子の間隔を変えることで、合計 13 ケースで実験を行った。主流方向を x 軸、格子横断方向を y 軸とし、水路中央を原点とする。格子間($y=0$)と格子背後($y=d/2$)とで主流方向 u 、横断方向 v の流速を計測した。

一連の実験の結果、最も顕著に特徴が表れたのは両対数でプロットした無次元乱れエネルギーの減衰過程である。図-2 は、異なる条件の下で行われた実験における乱れエネルギーの空間的減衰を両対数紙にプロットしたものである。実験条件によらず広い範囲での勾配が -1.3 となっている。

また、図-3 は格子間($y=0$)と格子背後($y=d/2$)の乱れ強さ u, v の主流方向の分布を示したものである。乱れ強さは格子のすぐ背後で最大となり、 y 方向の位置には関係ないことがわかる。 $x/D < 30$ の範囲では u, v とともに同じ値を取り乱れは等方的であるのに対し、 $x/D > 30$ では v よりも u のほうが大きくなっている。これは下流に行くほど壁乱流の影響をうけ、非等方性が表れるためと考えられている。

三次元流れの格子乱流場では低波数の大スケールの渦がより大きな波数の渦と相互作用を繰り返し、小スケールの渦へとエネルギーを輸送していき、次第に等方化するとともに、普遍的な構造に近づいていく性質が知られている。このような過程はダウンカスケードと呼ばれる。このとき、エネルギースペクトル中には $-5/3$ の勾配を有する慣性小領域が存在する。これに対し、浅水格子乱流場では格子間から形成される小スケールの渦が相互作用を受け、合体を繰り返すことにより低波数の大スケールの渦を形成していくアップカスケードが卓越する。エネルギースペクトルの勾配が -3 となることが知られている。このような特性も Uijttewaals らの実験においても確認されている。

2.2 木村らの研究

木村⁴⁾らは Uijttewaals らの実験で扱った、一辺が 11.5cm 角柱のケース XII を取り上げて、二次元モデルと三次元モデルで計算を行い、実験結果との比較をおこなった。三次元解析モデルでは修正非線形 $k-\varepsilon$ モデルが用いられている。上流端に人工的な擾乱を与えることで不規則な渦の合体とそれに伴うアップカスケードが再現されることを示した。しかし、人工的な擾乱を与えなかった場合は、渦が同期発生し、アップカスケードは再現されなかった。図-4 は乱れ強さの分布を示したものであり、 $x/D > 10$ の範囲では実験結果と同じく乱れの非等方性が再現され、実験結果と似通った結果となっている。また、図-5 は乱れエネルギーの減衰過程を両対数でプロットしたものである。擾乱を加えない計算結果では、乱れエネルギーの減衰は図-5(a)に示すように -1.3 より急となる。一方、擾乱を加えた計算結果では実験と同様に勾配がほぼ -1.3 となっている。これより、浅水格子乱流における乱れエネルギーの減衰過程はアップカスケードと密接に関係することがわかる。

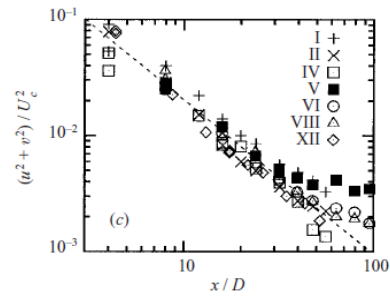


図-2 実験結果における乱れエネルギーの減衰過程

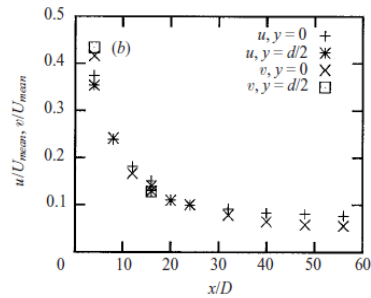


図-3 実験結果における乱れ強さの分布

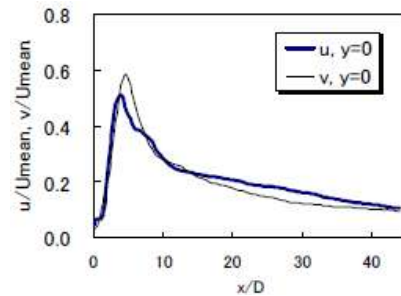
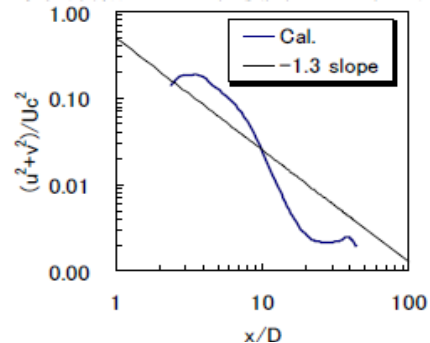
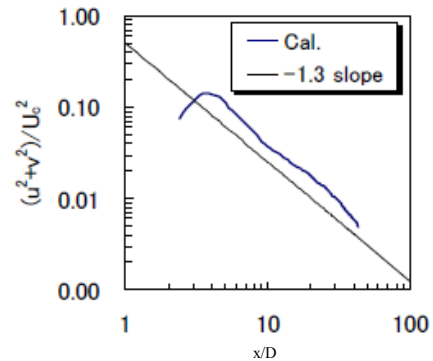


図-4 三次元モデルによる乱れ強さ分布



(a) 擾乱無しの場合(渦が同期発生)



(b) 擾乱添加の場合(アップカスケード発生)

図-5 三次元モデルによる乱れエネルギー減衰過程

3. 本研究で行った実験の概要

本研究の実験水路の平面図を図-6に示す。水路幅は30cmで水路幅方向に等間隔で格子を設置した。水路は水平勾配である。流速は格子直後では流れの変化が大きいことを考慮し細かい間隔で計測し、下流に進むにつれ間隔を大きくしていき、格子間(y=0)では合計23ヶ所、x=1.5mまで計測した。同様に格子背後(y=d/2)ではx=0.25mまで8ヶ所計測した。各ポイント0.1秒間隔で1048回計測した。流速の計測にはALEC電子製二軸電磁流速計を使用し、二軸方向の流速を同時に計測した。水深は格子の上流部、下流部それぞれ5点ずつ計り、その平均水深を計算に用いた。

使用した格子は一辺10mm(CASE1)、15mm(CASE2)、20mm(CASE3)角柱の3種類で、透過率(D/d)は全て50%とした。格子間から発生した小スケールの渦が合体を繰り返す様子(アップカスケーディング)を、上流からアルミニウム粉末を散布することによって可視化した写真を図-7に示す。水理条件は以下の通りである。

流量 $Q=2.30 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

平均水深 $h_{\text{mean}}=0.032\text{m}$

平均流速 $U_{\text{mean}}=0.388\text{m/s}$

4. 実験結果

4.1 乱れ強さの分布物性

それぞれのCASEについて乱れ強さの分布の検証をおこなう。図-8のグラフに結果を示す。ここに、乱れ強さ、u, v は次の式で計算される。

$$u = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - U_{\text{mean}})^2} \quad (1)$$

$$v = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - V_{\text{mean}})^2} \quad (2)$$

いずれの結果においても、格子直後ではu, v両方ともほぼ同じ値をとっており、等方性が表れている。x/D>30ではuよりもvの方が大きくなり、非等方性になっている。しかし、図-3に示すUijtewaalらの実験結果では、x/D>30の下流側ではvよりもuの値のほうが大きく本研究の実験結果とは異なる。本研究で用いた水路の幅が30cmと小さいことが一因と考えられるが、今後さらに検討を要すると考える。

4.2 乱れエネルギーの減衰過程

乱れエネルギーの減衰過程を取り上げる。図-9は実験値を両対数グラフにプロットしたものであり、図中の直線は-1.3の勾配を表している。図中のUcは格子間平均流速であり、次式で求められる。

$$U_c = U_{\text{mean}} / (1 - D/d) \quad (3)$$

CASE1, CASE2では乱れエネルギーの減衰過程の勾配が-1.3に近い値で、浅水格子乱流の特徴が表れている

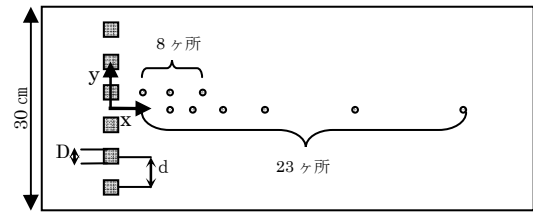
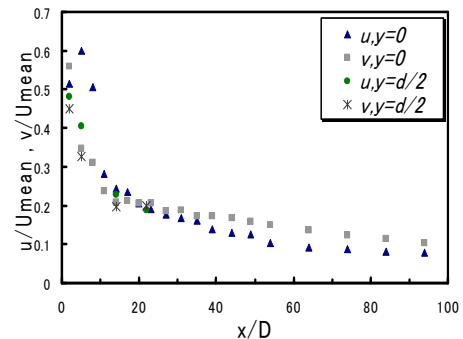


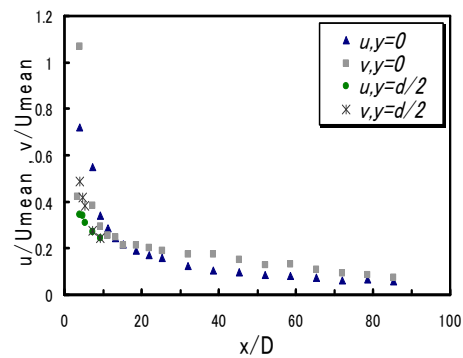
図-6 実験水路の平面図



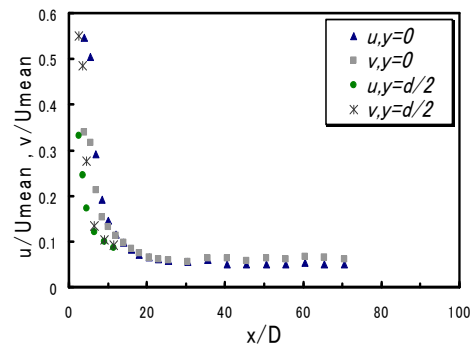
図-7 アップカスケーディングの様子 (CASE1)



(a) CASE1



(b) CASE2



(c) CASE3

図-8 乱れ強さの分布

ことが見てわかる(図-9)。CASE3 をみると、乱れエネルギーは -1.3 よりも急な勾配で減衰し、下流にいくと緩やかになっている。これは、図-5(a)で示した木村らの擾乱を加えないシミュレーション結果(アップカスケディングが再現されていない結果)の減衰過程と一致し、アップカスケディングが再現されない点でも一致した。この結果から、格子のスケールが水路幅に対してある程度大きくなったら浅水格子乱流としての統計的普遍性は失われると考えられる。

3.3 水面形の変化について

水面形の縦断方向の変化を比較したグラフを図-10に示す。図の左側が上流である。いずれのCASEでも、測定断面は格子間の中点を通る線上でポイントゲージにより計測された。格子付近は支配断面となり、常流から射流へと変化し、その後跳水が生じることは各CASEで共通している。しかし、水深の最小値や跳水位置が異なる。すなわち、格子スケールが大きいほど水深の落ち込みが大きく、跳水位置が下流側にシフトすることがわかる。これは、透過率が同じであっても、格子スケールが大きいほど流れに対する抵抗が大きくなることを意味している。

4. まとめ

本研究では有限な水路幅における浅水格子乱流の基本的な性質について格子スケールが及ぼす影響を、実験的に検討をおこなった。主な成果は以下の通りである。

- 1)有限幅の開水路における実験においても、水路幅に対して格子スケールが比較的小さい場合には浅水格子乱流としての普遍的性質、すなわち、アップカスケディングや乱れエネルギー勾配が -1.3 となる現象などが現れることが確認された。
- 2)格子スケールが水路幅に比べて大きい条件では、アップカスケディングの要因となる渦の多段階の合体が十分現れず、乱れエネルギーの減衰が急激に進むことが確認された。
- 3)格子の下流側における乱れ強さの分布は、浅水格子乱流の場合とは逆の性質($v < u$)が現れた。この原因は不明であり、さらに検討を要する。
- 4)透過率が同じでも格子スケールが大きいほど、格子近傍の水面の低下が大きくなり、跳水位置が下流側にずれ込むことが示された。

今後、さらに多くの条件で実験を実施し、格子背後の統計的性質に及ぼす格子スケールや透過率の影響などについて検討を行っていきたい。また実験結果の数値シミュレーションによる再現等についても進めていきたい。

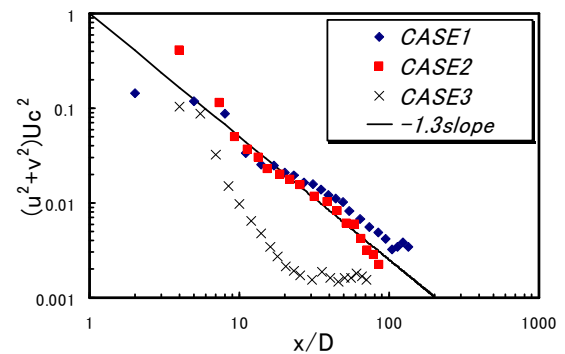


図-9 乱れエネルギーの減衰過程

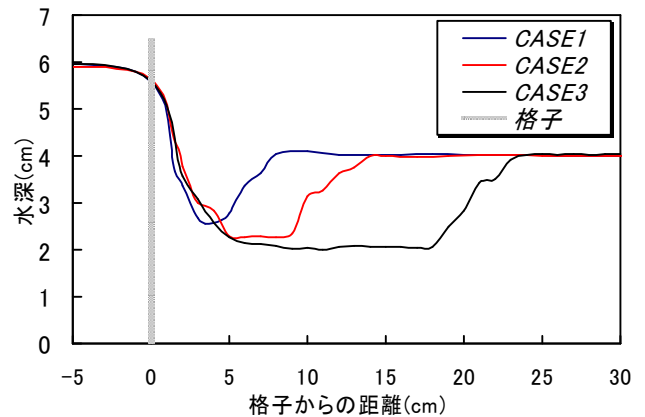


図-10 水面形の変化

参考文献

- 1)中川一：洪水および土砂氾濫災害の危険度評価に関する研究，京都大学博士論文，1989。
- 2)福岡捷二，川島幹夫，松永宣夫，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。
- 3)Uijtewaal, W.S.J. and Jirka, G.H.: Grid turbulence in shallow flows, J. Fluid Mech., Vol. 489, pp. 325-344, 2003。
- 4)木村一郎，W.S.J. Uijtewaal，細田尚：二次元及び三次元 RANS モデルによる浅水格子乱流の数値解析，水工学論文集，第 51 巻，pp.799-804, 2007。