

蛇行河川での溢水・越水氾濫流量と その予測に関する研究

ESTIMATION OF OVERFLOW DISCHARGES BY SIMULTANEOUS ANALYSIS OF FLOOD AND INUNDATION FLOWS IN A MEANDERING CHANNEL

秋山 壽一郎¹・重枝 未玲²・津崎 周平³

Juichiro AKIYAMA, Mirei SHIGE-EDA and Shuhei TSUZAKI

¹フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²正会員 博(工) 九州工業大学准教授 工学部建設社会工学科 (同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (同上)

The overflow discharges, under the overflow as well as submerged overflow conditions, from a meandering channel with or without retarding plantations into a flood plain are investigated experimentally and numerically. The analysis is directed toward the examination of the overflow discharges by the overflow discharge formula as well as the numerical analysis, simultaneously solving flows in a channel and inundation flows in a flood plain. The dynamic inundation analysis model used in the analysis comprises the finite volume method on unstructured grid using flux-difference splitting(FDS) technique. We found that the model is much superior to the formula in predicting the overflow discharges with or without retarding plantations.

Key Words : *inundation,overflow discharge,retarding plantations,dynamic flood simulation*

1. はじめに

近年, わが国では東海(2000年9月), 九州(2003年7月), 新潟・福島(2004年7月), 宮崎(2005年9月)など, 甚大な豪雨災害が頻発している. これらの豪雨災害は, いずれも想定を超えた降雨が要因である. 日本では地球温暖化の影響により, 豪雨が増加することも予測されている¹⁾. このような背景から, わが国の治水対策の基本方針は, “防災(洪水氾濫の防止)” から “減災(洪水氾濫による被害最小化)” へと転換されつつある²⁾.

“減災” では, 計画高水を超える洪水を危機管理として捉え, 効果的にハード・ソフト両面の減災施策を講じることになる²⁾. そのためには, 対象とする河川とその流域の特性を踏まえた上で, 事前に洪水・氾濫プロセスを正確に把握することが求められる. 特に, 氾濫箇所や氾濫流量は, 氾濫水の制御や避難行動や支援などの効果的な対策を講じる上で極めて重要になる.

これまでの氾濫流量は, 一般に越流公式などの流量式で評価されてきた³⁾. 通常, 正面越流を対象とした本間公式で評価する方法が用いられている. また, 河道

から溢れた洪水流は河道に対して横越流状態で堤外地から堤内地へ斜め越水し氾濫することを踏まえ, 本間公式に対して河床勾配と死水域に関する補正がなされた氾濫流量式⁴⁾も提案されている. さらに, 水面形状の時間変化と平面2次元非定常流解析から, 氾濫流量を算定する方法も提案されている⁴⁾. この方法の特徴は, 氾濫流量に影響を及ぼす河道特性(線形, 勾配, 河道断面形状, 樹林帯など)や堤内地の特性(地形起伏, 家屋群, 盛り土構造物, 樹林帯など)の影響を直接考慮しなくても, 水面形状の時間変化に陰的に含まれることを利用して, 氾濫流量を算定することである. この方法を用いれば水位の観測結果から, 過去の災害に対してどの区間にどれだけの氾濫流量が生じたかを算定することが可能となるが, 水位の観測結果が必要なために, 事前に氾濫流量を予測することは困難と考えられる.

著者ら⁵⁾は, これまでに事前に氾濫流量を予測するツールとして, 洪水流と氾濫流を一体的に解析し, 河道特性と氾濫原特性を考慮した上で, 両者間の複雑な雨水のやり取りを評価できる河道・氾濫原包括型氾濫解析を構築してきた. そして, 直線河道での氾濫流の実験結果に基づき同モデルの氾濫流量の予測精度, 堤

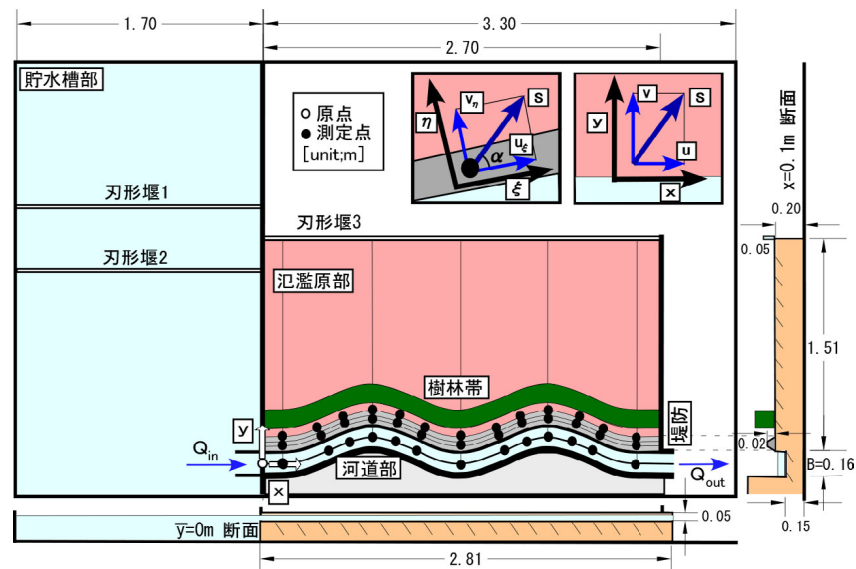


図-1 実験装置の概要

内構造物や樹林帯が氾濫流量に及ぼす影響について検討してきた⁶⁾。

本研究では、以上のような背景を踏まえ、これまでの研究⁶⁾をさらに発展させ、氾濫流量に影響を及ぼす河道特性の一つとして河道線形に着目し、本間公式と河道・氾濫原包括解析(以下、「包括解析」という)に基づき、蛇行河道での氾濫流量について検討を加えた。また、蛇行河道での堤内樹林帯(以下、「樹林帯」という)の氾濫流量抑制効果についても検討を加えた。

2. 実験の概要

実験装置は貯水槽部・河道部・氾濫原部より構成されており、河道部の一部の区間(2.70m)から氾濫原部へ氾濫するようになっている。河道部は、幅0.16mの長方形断面の蛇行水路であり、氾濫原部から0.05mだけ掘り込まれている。実験装置の概要は図-1に示す通りであり、 x , y 軸、堤防線形に沿った ζ 軸とその法線方向の η 軸を定義している。また、 x , y 軸方向の流速を u , v , ζ , η 方向の流速を u_ζ , v_η としている。また、図中の α° は氾濫流量の流向を示している。河道部の中心線形はSine-generated curveに従って蛇行しており、蛇行部は2波長設けた。その平面形状は、わが国の河川の平面形状特性の統計資料⁷⁾を踏まえ、蛇行度が1.05、水路幅と蛇行帯幅との比が0.48、水路幅と蛇行波長との比が0.133になるように設定した。なお、計測時に水深が浅くなると計測が困難となるため、右岸側は側壁となっており越流しないようにした。また、実験装置の縮尺は特定の状態を想定して設定したものではない。

実験条件を表-1にまとめて示す。氾濫流量を調べる実験では、河道状態を掘り込み河道(CASE 1)あるいは築堤河道(CASE 2)とし、CASE 2では法面勾配2割の堤防

表-1 実験条件

CASE			水路の状態	流量Q(m³/s)	刃型堰3の有無
1	O	樹林帯なし	掘り込み	0.01072	なし
		樹林帯あり		0.01350	
	S	樹林帯なし			0.01350
		樹林帯あり			
2	O	樹林帯なし	築堤	0.01108	なし
		樹林帯あり		0.01394	
	S	樹林帯なし			0.01397
		樹林帯あり			

(堤防高：0.02m、堤防敷幅：0.10m)を河道に沿って設置した。氾濫形態については、CASE 1では射流(CASE 1-O)あるいは常流(CASE 1-S)での溢水状態、CASE 2では完全越流状態(CASE 2-O)あるいは潜り越流状態(CASE 2-S)とした。

堤内樹林帯を設けた実験では、上記した各CASEについて、樹林帯を模したプラスチックの糸が絡み合った多孔体(透過係数 K ：0.64m/s)を高さ0.10m、幅0.12mで河道部と氾濫原の境界から0.16m堤内地側に河道部沿いに設置した。

実験の方法と計測内容は次のとおりである。貯水槽部から河道部へ一定流量 Q_m を通水し、氾濫流が定常状態となった時点で、河道部の水深 h_1 ならびに氾濫部での水深 h_2 と表面流速ベクトルを計測した。水深については、図-1に示す測定点においてポイントゲージで波高の最大値と最小値を測定し、それらの平均値を用いた。流速については、直径約5mmの発泡スチロール球(比重0.05)を多数投入し、測定点付近の発泡スチロール球の動きをデジタルビデオカメラで撮影・収録した後に、画像をPTV(Particle Tracer Velocimetry)解析することで、氾濫流の流向と表面流速ベクトル $\mathbf{U}_s = (u_s, v_s)$ を求め、等流実験より得られた表面流速 $\mathbf{U}_s$ と水深平均流速 $\mathbf{U}$ との関係式($\mathbf{U} = 0.90\mathbf{U}_s$)を用い、 $\mathbf{U}_s$ を水深平均流速ベクトル $\mathbf{U} = (u, v)$ に変換した。単位幅当たりの氾濫流量 $q(\text{m}^2/\text{s})$ は、CASE 2の堤防天端中央部に位置する測定点での水深(m)

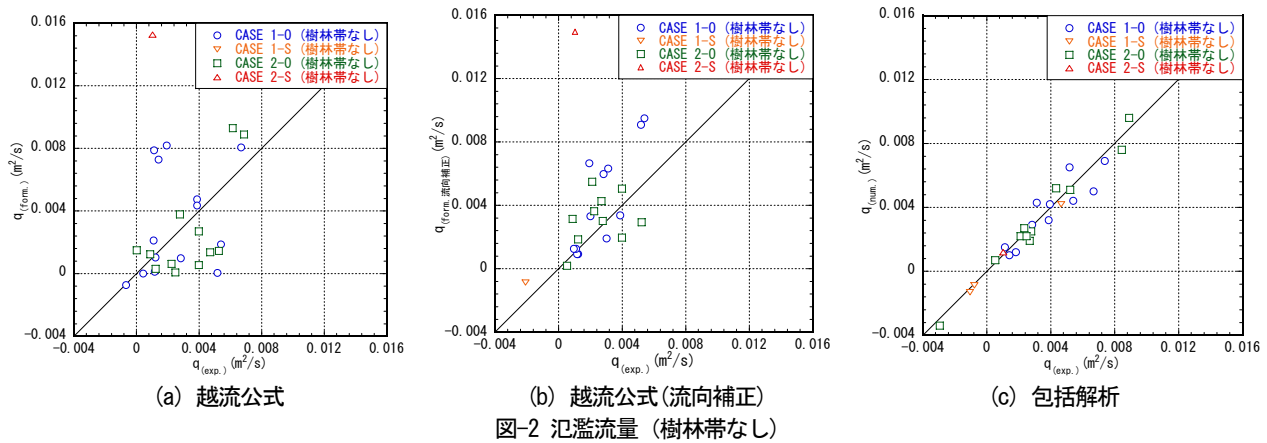


図-2 氾濫流量（樹林帯なし）

と水深平均流速 $U(\text{m/s})$ の積で評価した。CASE 1についても同様である。また、全体的な流量収支を把握する目的で、河道部下流端での流出流量 Q_{out} も測定した。

3. 氾濫流量の評価法の概要

氾濫流量の評価には、越流公式と包括解析を用いた。

(1) 越流公式に基づく氾濫流量の評価

越流公式には本間公式を用いた。本間公式では、単位幅当たりの越流氾濫流量 $q_0(\text{m}^2/\text{s})$ は式(1)で与えられる。

$$\begin{aligned} \text{完全越流: } h_2/h_1 < 2/3 \text{ では, } q_0 &= C_1 h_1 \sqrt{2gh_1} \\ \text{潜り越流: } h_2/h_1 \geq 2/3 \text{ では, } q_0 &= C_2 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 h_1 と h_2 はそれぞれ堤防天端を基準として高い方と低い方の水位(m)であり、本間公式の流量係数は堤防の法面勾配及び上流水深/堤防高に依存し、完全越流では $C_1=0.31 \sim 0.33$ 程度の値を取る。氾濫シミュレーション・マニュアル(案)³⁾では、堤防断面形を長方形としたときの流量係数が規準とされており、その値は $C_1=0.35$ と $C_2=0.91$ である。また、掘り込み河道からの溢水氾濫流量についても越流氾濫と同様に評価され、この場合、 h_1 と h_2 はそれぞれ破堤部敷高を基準として高い方と低い方の水位(m)となる。氾濫流量は、一般に正面越流公式で評価されるが、洪水流は河道に対して横越流状態で越水するため正面越流公式に対する流向補正が必要になると考えられる。ここでは、正面越流として式(1)中の水位 h_1 、 h_2 を定めた越流公式と、実験結果に基づく流向に沿って水位 h_1 、 h_2 を定めた流向補正を施した越流公式により氾濫流量を評価した。

(2) 包括解析に基づく氾濫流量の評価

包括解析では、空間平均操作された2次元浅水方程式を、非構造格子を用いた有限体積法に基づき離散化

し、空間積分に流束差分法(FDS)を用いた高精度・高解像な平面2次元不定流モデルをベースモデルとしている⁸⁾。樹木群に代表されるような計算格子より小さな物体群については、空間平均操作により生じる抗力項を基礎方程式に付加することで処理する⁹⁾。包括解析により天端位置での水深と流速を求め、それらの積により単位幅当たりの氾濫流量を求めた。

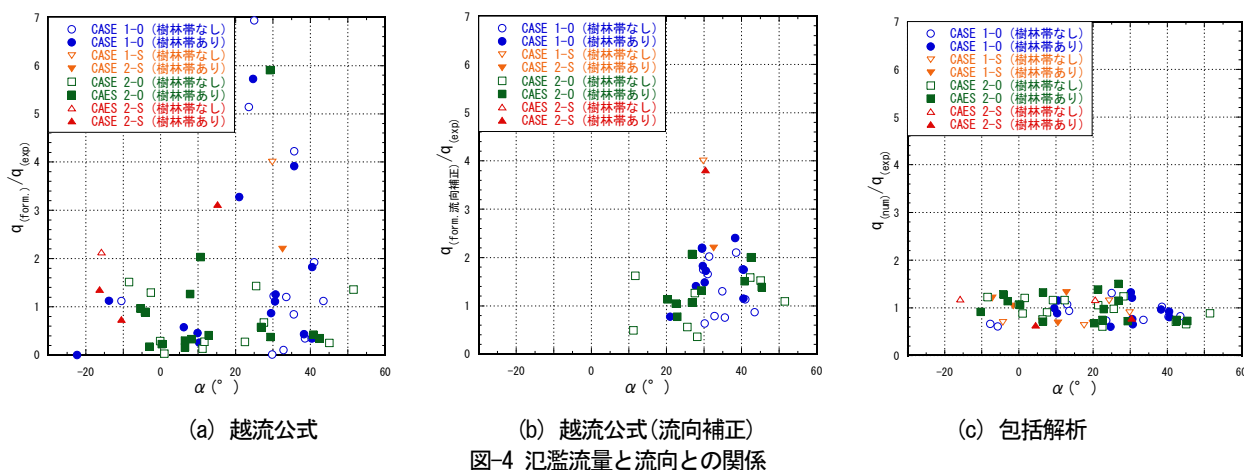
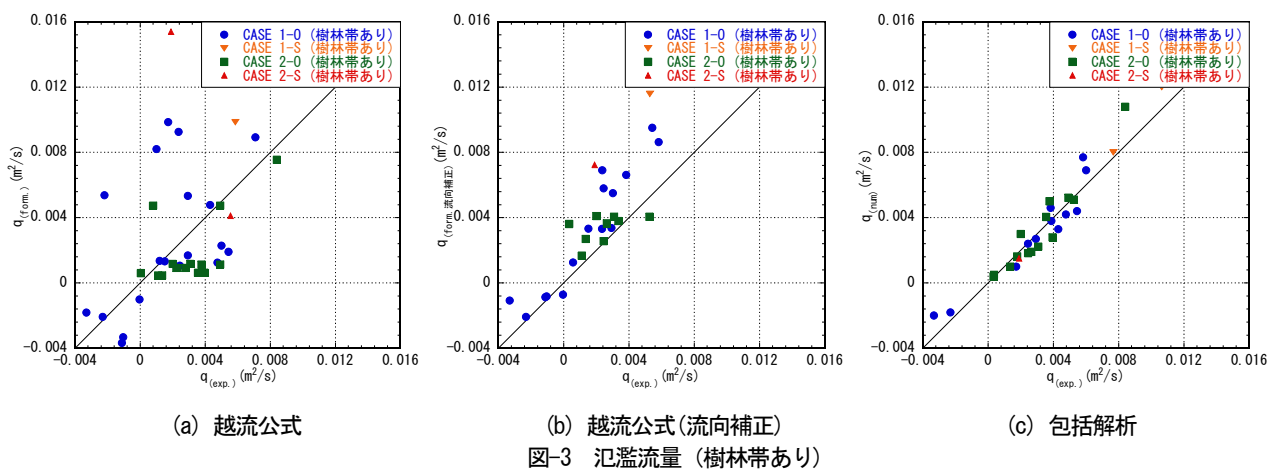
本解析に用いた計算メッシュは、河道部については0.02(m)、堤防については0.01(m)、氾濫原部については0.05(m)を基準にした三角形メッシュで、その総数は11335個であった。また、解析結果は、水深、流速のいずれも最大で1割程度の誤差があるものの概ね実験値を再現していた。なお、完全越流状態では堤防の裏法肩近傍で静水圧分布に従わない流れが生じるので、これに起因した誤差は含んでいる。また、本モデルは2次流の影響を考慮していないため、本実験よりも蛇行度の大きな条件下では予測精度が低下する可能性がある。本モデルがどの程度の蛇行度までなら十分な精度を有するかは、既存の実験結果との比較により、今後検討したいと考えている。

4. 結果と考察

以下では、堤内地に何も設けられていない状況、堤内地に構造物群が設けられた状況、および堤内地に樹林帯が設けられた状況での氾濫流量について検討を加える。

越流公式については、標準とされる流量係数($C_1=0.35$ 、 $C_2=0.91$)を用いて単位幅当たりの氾濫流量を評価した。水位の取り方は、堤外地では河道中央、堤内地では堤防の裏法肩の水深とした。

図-2は、実験結果と各手法での予測結果との比較を示したものである。図-2(a)が越流公式、図-2(b)が越流公式に流向補正を施したもの、および図-2(c)が包括解析の結果である。これより、河道の形態、溢水・越水の状態にかかわらず、包括解析は高い精度で氾濫流量を算定できることが確認できる。



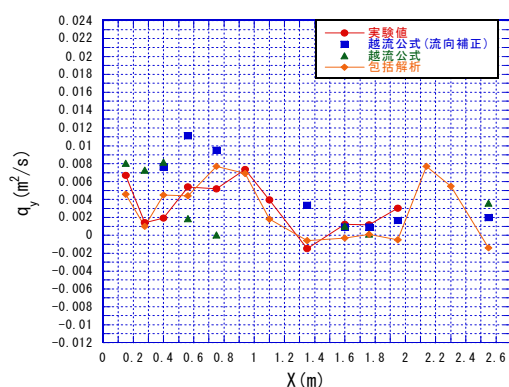
越流公式では、射流状態において流量が過小評価されている区間や、図では省略しているが、常流あるいは潜り状態で氾濫する場合に最大で15倍程度、射流状態や完全越流状態(CASE 1-O, CASE 2-O)では最大で5倍程度過大に評価されていた区間もあった。これは、蛇行河道部の湾曲部外側から溢水、越水する際に、湾曲部付近における河道の流れが、内側から外側に向かって集中するために、河道中央部の水位が低くなるために越流量が過小評価されているものと考えられる。氾濫流量が過大に評価された区間を確認すると、いずれも氾濫が発生する区間の境界付近であった。このことは、後で検討するように、越流公式では溢水あるいは越流区間を予測できないことを示唆している。

流向補正を行った越流公式では、予測値は全体的には改善されるが、やや過大評価される傾向がみられる。直線水路では、射流状態で氾濫する場合には流向補正を施すことで概ね改善されていた⁶⁾が、蛇行水路においては全ての予測値が補正されるわけではない。これは、直線水路では射流状態で氾濫する場合に、氾濫流量は堤外地水位だけで決まるので流向補正を施すことで予測値の改善ができるが、今回対象とした蛇行河川においては、河道特性により、河道水位が一樣になり難いので、堤外地水位が特定し難く、結果として予測値に誤差が含まれるものと考えられる。常流状態において

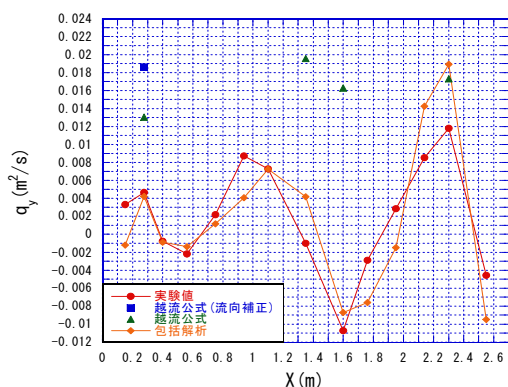
は、堤内地と堤外地の両水位により氾濫流量が決定されるので、その分子測定の精度は低くなる。また、河道線形との関係によっては、堤外地水位を測定することができない箇所もあり、全ての断面で流向補正をできるわけではない。従って、図中のプロット数は、越流公式に比べ減少している。

図-3は、堤内地に樹林帯が設けられた状況について、実験結果と予測結果との比較を示したものである。図-3(a)が越流公式、図-3(b)が越流公式に流向補正を施したものの、および図-3(c)が包括解析の結果である。

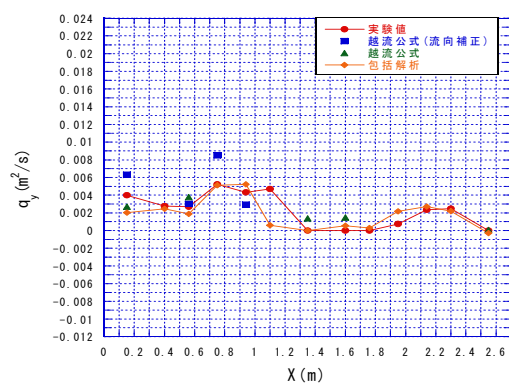
これより、包括解析は樹林帯が設置された状況に対しても氾濫流量をほぼ正確に評価できること、一方、越流公式による評価では、射流状態で氾濫する場合には、流向補正を施すことでほぼ正しく完全越流状態の氾濫流量を評価できること、常流状態で氾濫する場合では、やはり過大に評価する傾向が認められること、などがわかる。越流公式では実験から得られた水位を用いて評価しているため、このような誤差は樹林帯によってもたらされた堤外・堤内地水位の変化に起因したものではない。また、流向補正では予測値が大幅に改善されていることが確認できる。これは樹林帯無設置の場合と比べ、樹林帯により水位が空間的に一樣化されるため、堤内地水位の取り方の影響がより少なくなっているためである。以上のようなことから、



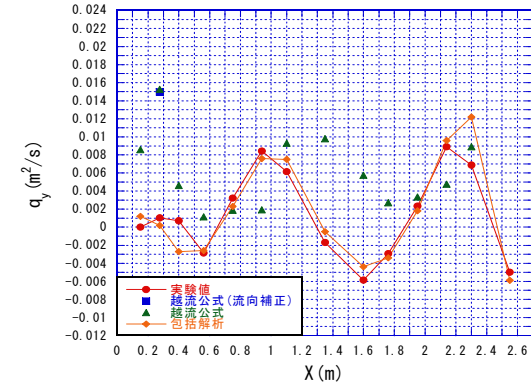
(a) 掘り込み河道(樹林帯なし, 堰なし)



(b) 掘り込み河道(樹林帯なし, 堰あり)



(c) 築堤河道(樹林帯なし, 堰なし)



(d) 築堤河道(樹林帯なし, 堰あり)

図-5 氾濫流量の空間分布

樹林帯が流向に影響を及ぼす可能性も含めて、誤差を生む主因はやはり流向であると考えられる。

図-4は、氾濫流量比(=予測値/実験値)と流向 $\alpha(^{\circ})$ との関係を示したものである。図-4(a)が越流公式、図-4(b)が越流公式に流向補正を施したもの、および図-4(c)が包括解析の結果である。

包括解析では、流向にかかわらず、氾濫流量比 ≈ 1.0 周辺の値を取っている。一方、越流公式では、全体的に大きくばらついている。また、流向補正を施すと改善がみられるがあまり改善されない場合もある。これは、河道線形によって、流向が大きい場合には氾濫流量を規定する適切な堤外地水位を設定することができないことを示唆している。これが、射流状態で流向補正を行っても予測値が改善されない理由だと考えられる。また、流向 $\approx 20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 以外の角度においては、データを収集できなかった。これは、河道が蛇行形状を持っているため、流向が小さい場合には河道内水位の特定が出来なくなることによる。

図-5は、氾濫流量の空間分布を示したものである。図-5(a)が掘り込み河道(樹林帯なし, 堰なし)における氾濫流量空間分布、図-5(b)が掘り込み河道(樹林帯なし, 堰あり)における氾濫流量空間分布、図-5(c)が築堤河道(樹林帯なし, 堰なし)における氾濫流量空間分布、図-5(d)が築堤河道(樹林帯なし, 堰あり)における氾濫流量空間分布の結果である。

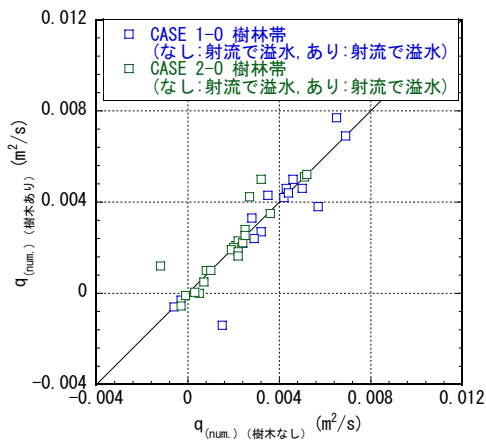
これらより、次のことがわかる。包括解析は、氾濫流量の空間分布をほぼ正確に評価できている。一方、越流公式による評価では値がばらついていて、流向補正を施すことで改善がみられるがあまり改善されない場合もある。このことから、包括解析では氾濫流量の空間分布つまり氾濫箇所の特定が可能であることに対して、越流公式ではそれが難しいことを示唆している。また、流向補正を施しても同様である。

このように、越流公式を用いた場合、流向補正を施すことで予測値がかなり改善されるが、流向は対象とする堤内外地の特性により決まるもので一般化することは難しい。また、蛇行河川では河道線形によっては、流向補正後の堤内・堤外水位の設定ができない場合がある。従って、越流公式で氾濫流量を予測することは困難であると考えられる。このようなことから、氾濫の状態や堤外・堤内地の状態にかかわらず、氾濫流量を的確に評価できる包括解析は有効な水理解析法と考えられる。

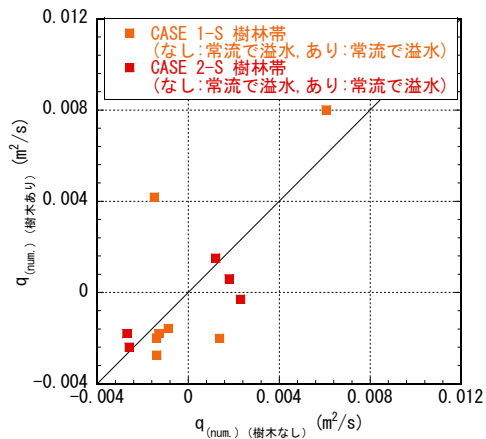
最後に、蛇行水路における樹林帯の設置による氾濫流量の制御効果について解析結果に基づき検討する。

図-6は、樹林帯の設置による氾濫流量の変化について調べたものであり、図-6(a)と図-6(b)はそれぞれ射流状態と常流状態での溢水・越水を示している。

これより、射流状態の溢水・越水については支配断面の水理から明らかなように、樹林帯は氾濫流量に何



(a) 射流状態での氾濫



(b) 常流状態での氾濫

図-6 樹林帯の有無と越水・溢水氾濫流量

ら影響を及ぼすことはない。しかし、常流で溢水・越水する場合では、河道上流で氾濫流量の増加が、河道下流で氾濫流量の低減が認められた。その理由としては、次のようなことが考えられる。築堤河道から潜り越流する場合に氾濫流量が低減しているのは、樹林帯が流水抵抗として作用し、堤内地水位が上昇するためである。逆に増加しているのは、樹林帯の設置により河道部の中下流での氾濫流量が抑制され、河道内の流れは常流であるので上流側での堤外地水位が上昇するためである。また、掘り込み河道から射流で溢水する場合に氾濫流量が低減しているのは、樹林帯無設置の状況では射流状態で溢水していたものが、樹林帯により氾濫流が堰上げられ常流状態になるためである。逆に増加しているのは、築堤河道から潜り越流する場合と同様に、樹林帯の設置により上流側での堤外地水位が上昇するためである。

5. おわりに

本研究では、河道・氾濫原包括解析と、本間の越流公式とに基づき、単断面蛇行水路における溢水・越水

流量の検討を行った。さらに、堤内地樹林帯の設置における氾濫流量の抑制効果についての検討も加えた。その結果、蛇行河川は、形状特性により河道内水位に偏りが生じるので、本間の越流公式で流量の検討を行う事が困難であることが確認された。しかし、そのような河川においても、河道特性と氾濫原特性を考慮した上で両者間の複雑な雨水のやり取りを評価できる河道・氾濫原包括解析モデルでは、河道と氾濫原の境界に位置する樹林帯の取扱いも含め、いくつかの氾濫状況に対して氾濫流量をほぼ正確に算定できることが示された。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金 基盤研究B(課題番号：17360237、研究代表者：秋山壽一郎)の助成を受け実施したものである。また、実験にご協力いただいた本学学部生の青柳太朗氏および梅木雄大氏に謝意を表す。

参考文献

- 1) 環境省：地球シミュレータによる最新の地球温暖化予測計算が完了 一温暖化により日本の猛暑と豪雨は増加一、<http://www.env.go.jp/earth/earthsimulator/>, 2004.
- 2) 社会資本整備審議会河川分科会、豪雨災害対策総合政策委員会：総合的な豪雨災害対策の推進について(提言)、http://www.mlit.go.jp/river/link/link_kanren/index.html.
- 3) 栗城 稔、末次忠司、海野 仁、田中義人、小林裕明：氾濫シミュレーション・マニュアル(案)ーシミュレーションの手引き及び新モデルの検証一、土研資料第3400号, 1996.
- 4) 福岡捷二、山崎憲人、黒田勇一、井内拓馬、渡邊明英：急流河川の河床変動機構と破堤による氾濫流量算定法の調査研究、河川技術論文集、第12巻, pp.55-60, 2006.
- 5) 秋山壽一郎・重枝末玲：河道特性と市街地構造を考慮した越水・破堤氾濫シミュレーション、水工学論文集、第50巻, pp.691-696, 2006.
- 6) 秋山壽一郎、重枝末玲、津崎周平：氾濫流量の評価と堤内物体群の影響、水工学論文集、第51巻, pp.523-528, 2007.
- 7) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法 治水と環境の調和した川づくり、森北出版, 2005.
- 8) 秋山壽一郎、重枝末玲、浦 勝：非構造格子を用いた有限体積法に基づく1次および2次精度平面2次元洪水流数値モデル、土木学会論文集、No.705/II-59, pp.31-43, 2002.
- 9) 重枝末玲・秋山壽一郎：市街地構造を考慮した氾濫解析モデルの総合的な検証、水工学論文集、第48巻, pp.577-582, 2004.

(2007. 9. 30受付)