

河道内貯留量推算のための水位観測法と粗度係数に与える流れの非定常性の影響

A WATER LEVEL OBSERVATION FOR A FLOOD STORAGE ESTIMATION IN RIVERS AND INFLUENCE OF UNSTEADINESS OF FLOW ON ROUGHNESS COEFFICIENTS

福岡捷二¹・渡邊明英²・永井慎也³

Shoji FUKUOKA, Akihide WATANABE and Shinya NAGAI

¹ 正会員 工博, Ph. D 広島大学大学院教授 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

² 正会員 博士(工学) 広島大学大学院助教授 工学研究科 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

³ 学生会員 広島大学大学院工学研究科博士課程前期 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

In a compound meandering channel, the peak discharge is reduced due to the storage of flood flow. When the unsteadiness of flood flow is large, roughness obtained from peak discharge in steady flood flow analysis has errors because of the change of discharge in the downstream direction and water surface profiles in time. It is shown that the roughness coefficient in a steady flow analysis is smaller than that in unsteady flow analysis from the comparison of roughness coefficients in steady and unsteady flow analysis. The intervals for the water level observation are examined to estimate the water storage in river. It is shown that 2km interval is sufficient for evaluating the water storage because of the large change in water level with time.

Key Words: observation of flood flow, water storage, unsteady flow, roughness coefficient

1. はじめに

複断面河道では、水位の上昇・下降に伴う高水敷上への洪水流の貯留や複断面蛇行に伴う抵抗に起因して、流下と共に流量ハイドログラフが変形し、ピーク流量の逡減が生じる¹⁾⁷⁾。しかし、現在の河川計画手法ではこれらの非定常性の影響、すなわち、流下に伴うピーク流量の減少については必ずしも明確に位置付けられていない。これは、ピーク流量減少量や河道内貯留量がどのような河道において重要になるかについて、観測に基づいて評価できなかったことが主要な原因である。著者らは、江戸川²⁾・円山川⁷⁾⁸⁾の洪水観測で得られた流量と水位縦断分布の時間変化を非定常二次元解析に基づいて解析することにより、河道内貯留量とピーク流量逡減を明らかにすると共に、浮子による流量観測誤差や洪水流量を高精度に推算する手法を提言している²⁾。

江戸川観測では250 m(一部500 m)間隔、円山川観測では200 m間隔と密な縦断間隔で水位が計測されている。このように綿密な計測が行われた理由は、目的に応じてどのような間隔で水位縦断形を計測すれば良いのかが現段階では十分な知見がなかったためである。しかし、このような間隔で水位観測を行うと、労力とコストがかかりすぎ、河道内貯留量を全川にわたって評価するためには、河川における水の体積変化量を正確に得るために適切かつ経済的な

観測間隔を見積もることが必要となる。

洪水流の非定常性が大きいと流量は流下と共に変化し、水面勾配も時間と共に変化する。このため、通常行われる定常流解析ではピーク流量と痕跡水位から逆算される粗度係数にはこれらに起因した不確かさ、すなわち、流量の流下逡減による誤差と水面形の緩勾配化による誤差が含まれることになり¹⁾²⁾、この2つの要因が粗度係数に与える影響を評価する必要がある。

以上の事から、以下の2つを本研究の目的とする。第一は、定常流解析及び非定常流解析から得られた粗度係数を比較することにより、洪水流の非定常性が逆算粗度係数の精度に与える影響について検討を行う。第二は、非定常性が緩やかな江戸川と非定常性が大きい円山川を対象として、水位観測の縦断間隔と河道内貯留量の精度の関係について検討を行う。

2. 江戸川と円山川の観測区間特性及び非定常二次元流解析に基づいて得られた粗度係数

図-1, 2に検討対象区間である江戸川(46 km - 39 km 区間)及び円山川(10.6 km - 15.6 km 区間)の平面形状を示す。河川形状はどちらも緩やかな複断面蛇行流路である。江戸川の堤間幅は400 m程度、円山川の堤間幅は250 m程度である。江戸川、円山川において高水敷に冠水が生じてから洪水観測が行われて

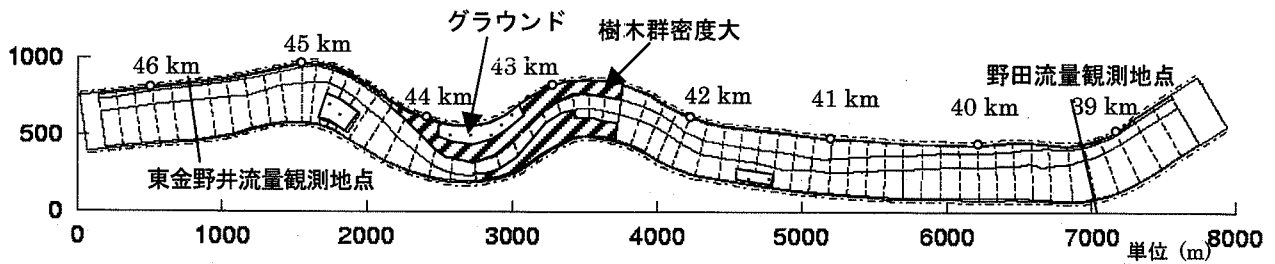


図-1 江戸川対象区間平面形状 (46.0km ~ 39.0 km)

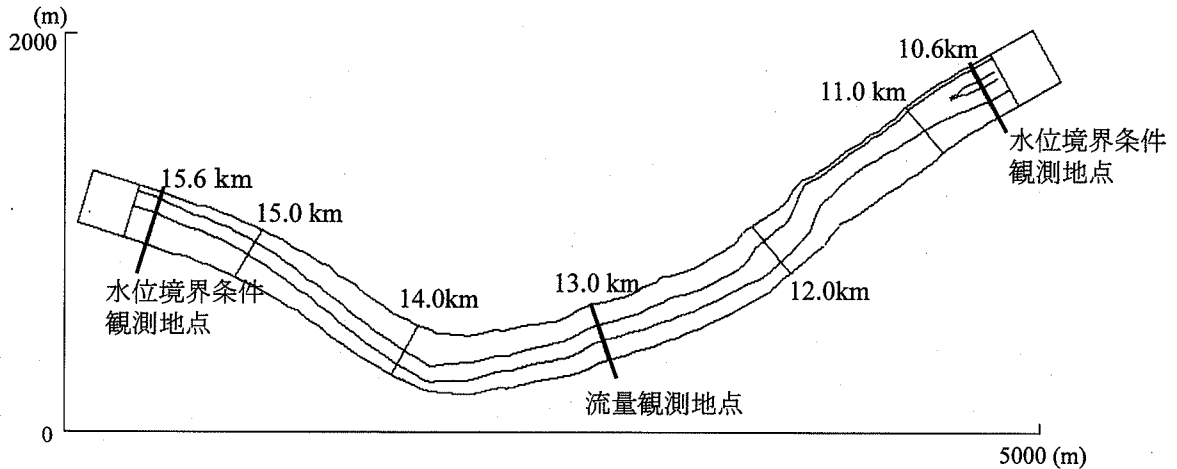


図-2 円山川対象区間平面形状 (15.6 km ~ 10.6 km)

おり、ピーク時の冠水深は3 m - 4 m 程度である。観測における水位観測は、江戸川で250 m 間隔、円山川で200 m 間隔となっており、堤間幅よりも狭い非常に密な間隔で行われている。

図-3, 4 に江戸川及び円山川における流量ハイドログラフを示す。江戸川では観測された流量ハイドログラフの精度を見積もるために、図-1 の様に観測区間上流端及び下流端で流量が観測されている。江戸川の出水期間は長く、非定常性は緩やかである。江戸川では観測開始 20-24 時間後にピークとなっており、この時間帯ではほぼ定常状態である。円山川の出水は10 数時間のスケールで生じており、観測開始後 120-240 分後がピークである。図-2 に示される様に円山川流量は観測区間の中央部で観測されている。解析流量ハイドログラフの場所的変化から流下に伴うピーク流量の減少が確認できる。

江戸川では植生の繁茂が顕著である。非定常二次元流解析で得られた粗度係数と樹木群透過係数の値¹⁾を表-1, 2 に示す。解析における流速は、一般座標系物理成分表示形における運動方程式及び連続式で求められ、計算方法は渡辺・福岡らの方法²⁾⁷⁾と同様である。非定常二次元流解析では、一般座標系における流れの抵抗 $(\tau_{z\xi}, \tau_{z\eta})$ を式(1)に示すマンニングの粗度係数 n と樹木群透過係数 K ⁹⁾¹⁰⁾で評価している。

$$(\tau_{z\xi}, \tau_{z\eta}) = \left(\frac{gn^2}{h^{1/3}} + \frac{gh_a}{K^2} \right) \sqrt{u^2 + v^2} (\tilde{U}, \tilde{V}), \quad (1)$$

$$h_a = \min(h, h_{tree}),$$

ここで、 g :重力加速度、 h :水深、 h_{tree} :植生高、 $\sqrt{u^2 + v^2}$:

絶対流速、 (\tilde{U}, \tilde{V}) :一般座標系反変流速ベクトル物理成分である。式(1)に示されるように流れの抵抗特性は、粗度係数と透過係数の組合せによって水深と共に変化している。

表-1 江戸川粗度係数及び樹木群透過係数

場所	粗度係数 n ($m^{1/3}s$)	
低水路全区間	0.029	
高水敷グラウンド	0.034	
46.0~43.0 右岸左岸	0.048	0.042
43.0~42.0 右岸左岸	0.054	0.054
42.0~40.5 右岸左岸	0.048	0.048
40.5~39.0 右岸左岸	0.042	0.042
場所	樹木群透過係数 (m/s)	
46.0~43.5 右岸	53.5	
43.5~42.5 右岸	32.5	
42.5~42.0 右岸	37.5	
42.0~40.5 右岸	53.5	
44.5~43.0 左岸	40.0	
43.0~42.0 左岸	46.0	
42.0~41.0 左岸	53.5	

表-2 円山川粗度係数、植生透過係数、植生高

場所	粗度係数 n ($m^{1/3}s$)	
低水路全区間	0.028	
高水敷 15.6km-13.2km	0.035	
高水敷 13.2km-11.6km	0.054	
高水敷 11.6km-10.6km	0.051	
高水敷	透過係数 $K(m/s)$	植生高 $h_{tree}(m)$
13.2km-12.6km	34.5	1.5
12.6km-12.2km	24.0	1.5
12.2km-11.6km	25.0	1.5

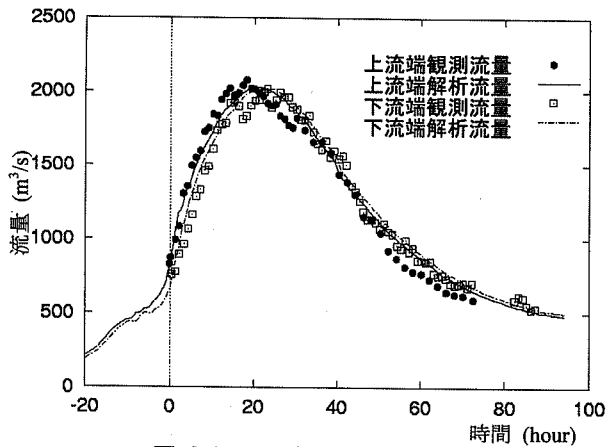


図-3 江戸川流量ハイドログラフ

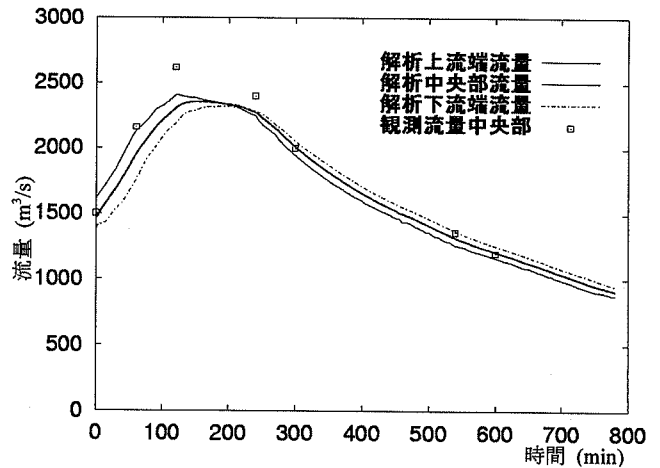


図-4 円山川流量ハイドログラフ

表-3 二次元定常流解析ケース一覧

江戸川 Case	粗度係数条件	上流端 境界条件	円山川 Case	粗度係数条件	上流端 境界条件
E0	表-1の粗度係数	ピーク水位	M0	表-2の粗度係数	ピーク水位
E1	表-1の粗度係数	ピーク流量	M1	表-2の粗度係数	ピーク流量
E2	E-1高水敷粗度係数 両岸 x1.1	ピーク流量	M2	M1粗度係数 x 0.9	ピーク流量
E3	E-1高水敷粗度係数 左岸 x1.2	ピーク流量	M3	M1粗度係数 x 0.95	ピーク流量
E4	E-1高水敷粗度係数 上流部右岸 x1.25, 左岸 x1.5	ピーク流量	M4	M1粗度係数 x 1.05	ピーク流量

3. 定常流解析における粗度係数

通常の二次元洪水流解析では一定のピーク流量に対して痕跡水位を表現する粗度係数が求められる。ここでは、江戸川観測開始 20-24 時間後、円山川観測開始後 120-240 分後における最高水位の包絡線として痕跡水位を定義し、非定常流解析から得られた上流端ピーク流量を用いて定常流解析による水面形や粗度係数の検討を行う。解析ケースを表-3に示す。まず、非定常流解析で得られた粗度係数分布²⁾を基準として与え、上流端及び下流端における水位を観測時の最高水位に固定して定常流解析を行い、定常流解析による流量と非定常流解析によるピーク流量の差異を調べた。次に非定常解析による上流端ピーク流量を境界条件として与え、定常流解析における水面形が痕跡水位と一致する粗度係数の値を求めた。ただし、樹木群の透過係数は表-1, 2に示された基準値のまま一定であるとしている。

図-5に江戸川洪水ピーク期における20時, 22時, 24時の左右岸観測水面形と上流端水位固定時の定常流解析水面形を示す。江戸川における解析ピーク流量は2020-2030 (m³/s)であり、定常流解析における流量は2010-2020 (m³/s)と同程度であった。左岸側上流部(44km-46km)において水位が一致していないが、これは非定常流解析においても同様であった。粗度係数を変化させ、このような水面形が可能かどうかを検討した。粗度係数の値を変えた解析水面形を図

-6に示す。高水敷粗度係数の値を全体的に1.1倍(Case E2)すると左岸側は一致するが右岸側が一致しない。左岸側のみの高水敷粗度係数の値を大きくした場合(Case E3)や上流部のみの粗度係数値を大きくすると全体的に一致してくるが、右岸側水位は外れてゆく。したがって、このような横断面水面勾配は解析上得られない。この場合、左右岸水位のどちら側かの値に系統的な誤差があると考えられるが、流量や水位の時間変化の連続性から考えると22時間後左岸上流部の水位が高い様である²⁾。したがって、この区間における水面形の違いは、粗度係数等の与え方の問題ではなく、観測上の問題であったと思われる。したがって、江戸川では定常流解析における粗度係数値は、観測誤差を考慮すると非定常解析時の値と大きな違いはないと考えられる。

一方、円山川の定常流解析では図-7に示す様に、上流端水位固定時の解析で非定常解析の粗度係数に対して上流端流量が2420 (m³/s)から2320 (m³/s)に減少した。これは痕跡水位を用いたことによる水面形の緩勾配化に起因するものと考えられる。解析ピーク流量に対して水面形が一致するように全体的に粗度係数を変化させた結果を図-8に示す。粗度係数値を5%~10%小さく(Case M2, M3)すると定常流解析水位が痕跡水位(最高水面形)を表わしている。非定常性が大きい場合には定常流解析で粗度係数を低く見積もる可能性が示されたが、実際には以下のように流量の影響も大きい。

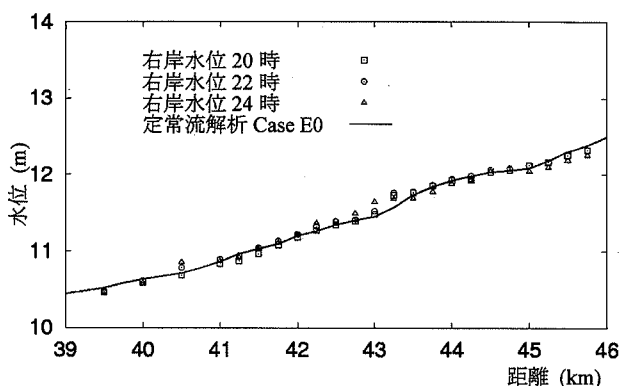
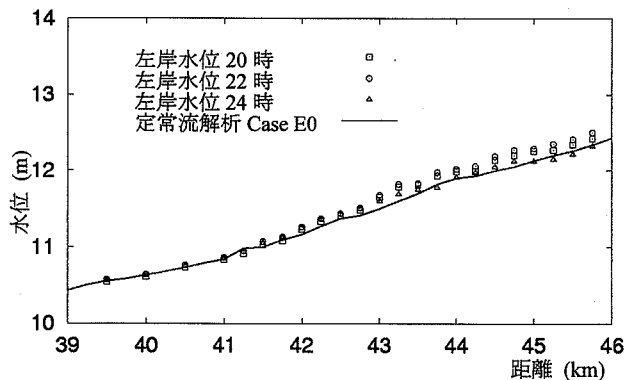


図-5 江戸川定常流解析水位（境界条件：水位）及びピーク時観測水位

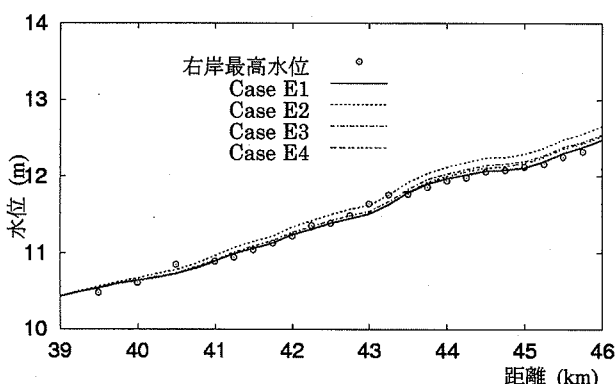
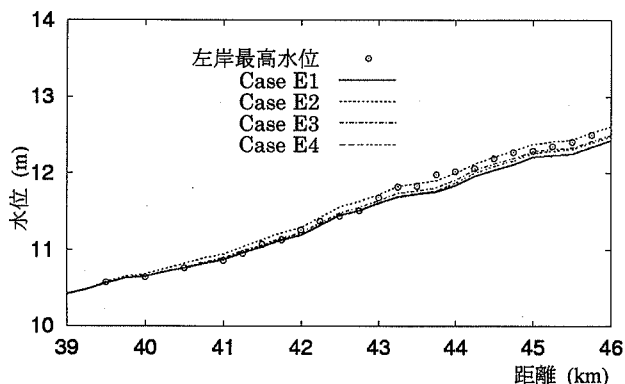


図-6 粗度係数を変化させた定常流解析水位及び最高水位分布（江戸川）

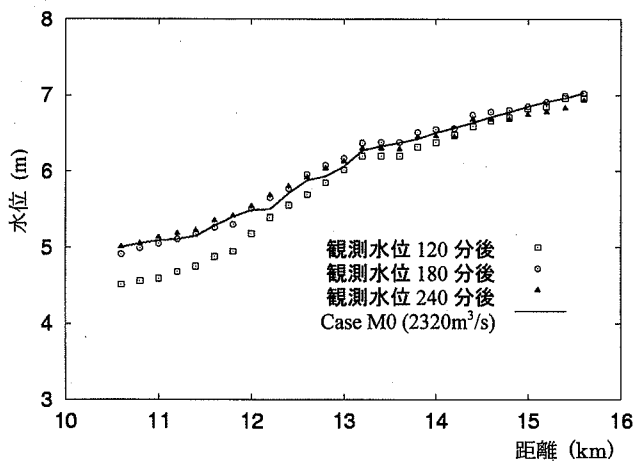


図-7 円山定常解析水位（境界条件：水位）及びピーク時観測水位

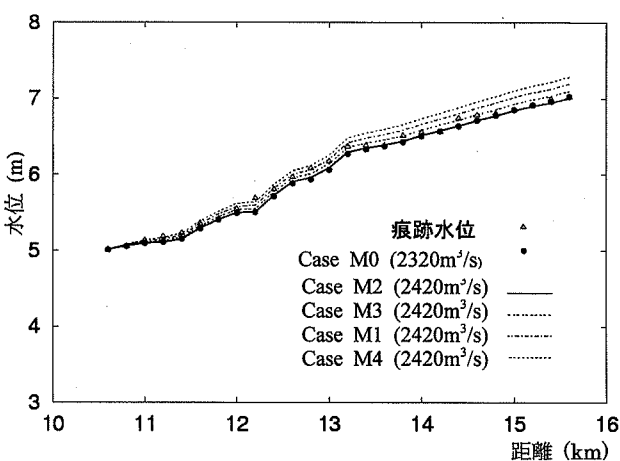


図-8 粗度係数を変化させた定常流解析水位及び最高水位（円山川）

円山川の例では上流端流量で粗度係数を検討したが、検討するピーク流量にどの位置の値を用いるかによって結果は異なり、中流部ピーク流量 $2360 \text{ (m}^3/\text{s)}$ を用いると粗度係数の違いは小さくなり、粗度係数値を $0\% \sim 5\%$ 小さくすれば十分であった。

このことから、流量が流下逓減する河川では定常流解析における水面形の緩勾配化の他に、流量の逓減や観測誤差が粗度係数に誤差を与えている可能性が高く、縦断的な流量変化を正しく捉えることが重要である。

4. 水位観測間隔が貯留量算定に与える影響

ここでは、密な縦断間隔による水位観測結果を真値として、水位観測間隔を 2 km , 1 km とした場合における観測区間貯留量の誤差について評価する。江戸川では $41 - 45 \text{ km}$ の 4 km 区間を、円山川では $11 \text{ km} - 15 \text{ km}$ の 4 km 区間を対象とした。貯留量を表す区間平均水位について各観測間隔別に求めたものを図-9, 10 に示す。これより、観測間隔が 2 km , 1 km の場合であっても誤差は小さい。誤差は数 cm のオーダーである。 1 km 間隔の方が 2 km 間隔の場合よりも

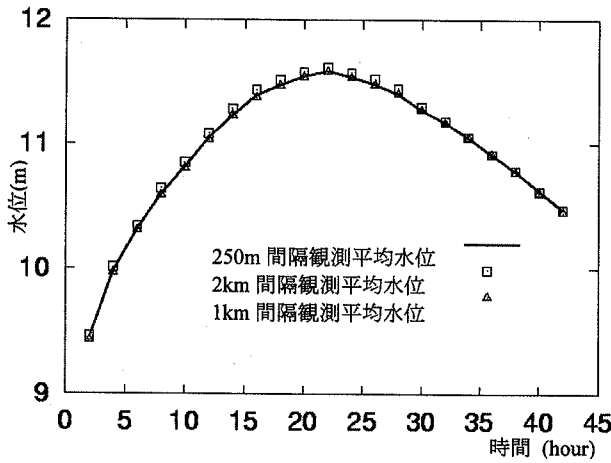


図-9 水位観測間隔と41km-45km区間平均水位の関係(江戸川)

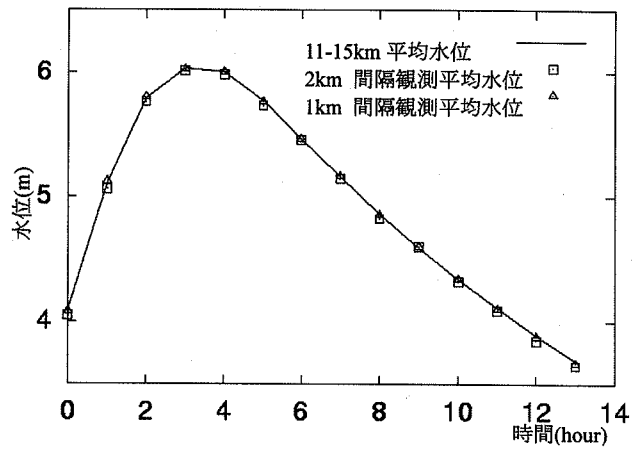


図-10 水位観測間隔と11km-15km区間平均水位の関係(円山川)

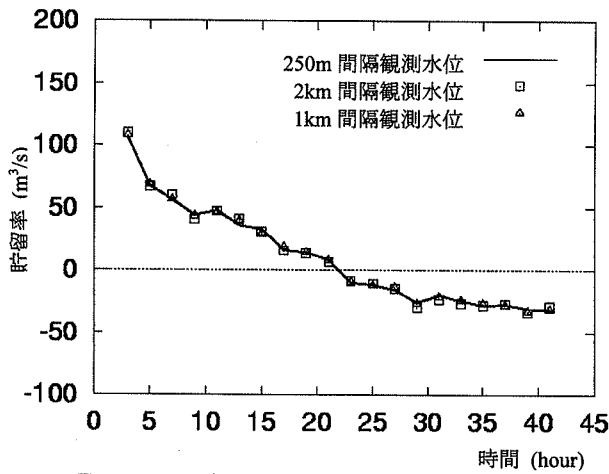


図-11 水位観測間隔と41km-45km区間貯留率の関係(江戸川)

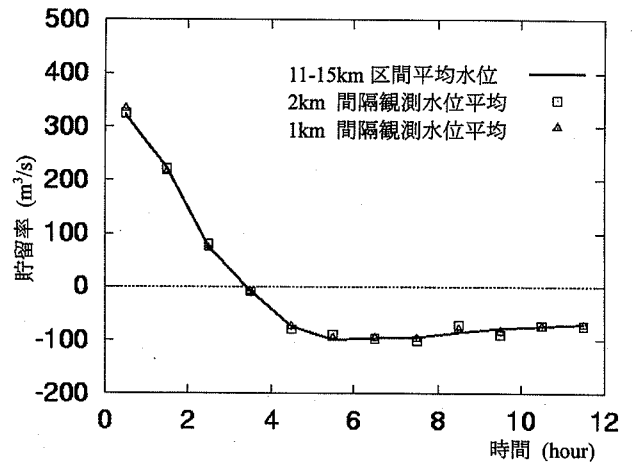


図-12 11km-15km区間における水位観測間隔と貯留率の関係(円山川)

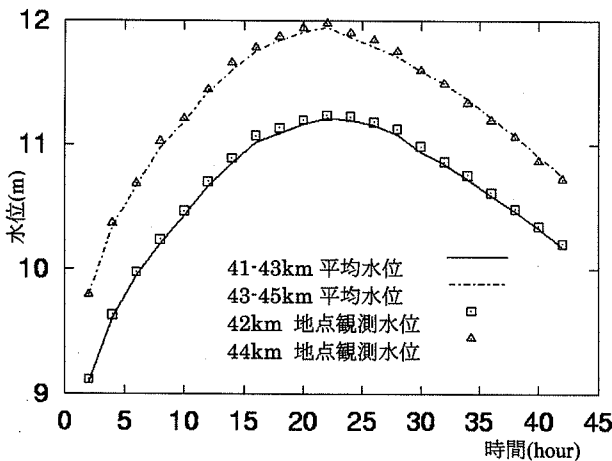


図-13 2km区間毎平均水位と2km間隔地点観測水位の比較(江戸川)

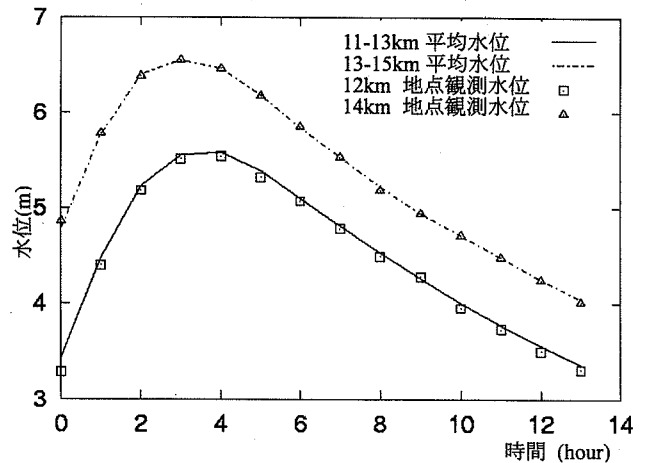


図-14 2km区間平均水位と2km間隔地点観測水位の比較(円山川)

精度が高いが、その精度の差は大きくない。4 km 区間平均水位の時間変化から得られる貯留率を図-11, 12 に示す。区間平均水位と同様に 1 km 区間の方の精度が良いが、大きな違いは生じていない。2 km 間隔の場合には平均水位での数 cm 程度の誤差によって、貯留率にして最大 10% 程度の誤差が生じているが、これらの貯留率に与える影響は大きくない。この理由は、図-9, 10 を見れば明らかのように、区

間平均水位の誤差よりも、対象とする時間内における洪水水位上昇量の方が十分に大きいため、誤差の影響が相対的に小さくなることが挙げられる。また、数 km 間隔で平均水位を評価する場合、水面形の細かな凹凸や折れ等による水位の誤差も出にくい。平均的な水面勾配が 1/2000 であっても、観測区間が 2km 離れていれば、その縦断的な水位差は 1m のオーダーになり、水位の平均化によって数 cm 程度の誤

差が生じたとしても絶対的な値の変化量の方が大きいため、相対誤差は小さい。また、水面形の折曲りによって平均水位に誤差が生じて、その誤差が系統的なものであれば時間変化量である貯留率を求めるとその誤差は打ち消され易い。

図-13, 14に2 km 区間における平均水位と観測水位を比較して示す。図-9, 10の4 km 区間平均の場合よりも誤差は大きくなっている。江戸川では44 km 付近に水面形の小さな折曲りがあり、円山川では13 km 付近に水面形の折曲りがある。円山川の水面形の折れは上昇初期において顕著である²⁾。このような水面形の折れの影響によって誤差が大きくなったと考えられるが、各地点の観測水位で2 km 区間平均水位を代表しても誤差は小さいことがわかる。

4. おわりに

1) 定常流解析と非定常流解析における粗度係数

痕跡水面形とピーク流量に対して定常二次元流解析から得られる粗度係数と非定常二次元流解析から得られる粗度係数について以下のことが示された。

ピーク時にほぼ定常状態となる江戸川では非定常流解析と定常流解析の粗度係数値に違いはないと判断される。一方、洪水流が観測区間を流下する時間内に流量と水面勾配が変化する円山川では、短区間でも定常流解析の粗度係数値の方が1割程度小さく見積もられた。ただし、これには樹木群（低木もしくは高い草本）の透過係数は含まれていない。

本文中で述べた様に、流れの非定常性による粗度係数への影響には、水面形の変化の他、流量逓減の影響も含まれている。通常の流量観測では5-10%程度の誤差を含んでいると考えられるため、非定常性による粗度係数の誤差よりも流量観測誤差に起因する逆算粗度係数の誤差の方が大きい可能性がある。したがって、河道内における貯留と縦断的な流量の変化を捉えて、精度の高い流量を得ることが重要であると考えられる。

2) 貯留量算定のための水位観測間隔について

水位観測間隔が河道内貯留量の算定に及ぼす誤差について以下のことが明らかとなった。

4 km 区間の観測結果について、1 km, 2 km 毎に水位データが得られたと仮定し、貯留量を求めた。観測間隔が密なデータを真値として、1 km, 2 km 間隔時の区間平均水位と貯留率を比較した結果、区間平均水位については、江戸川、円山川共に1 km, 2 km 間隔観測時に平均水位で数 cm 程度の誤差があり、各時刻における貯留率では平均5-10%程度の誤差が生じた。貯留率の誤差は、絶対値で数 m^3/s 程度である。しかし、誤差は生じているが2 km 間隔の観測でも貯留量、貯留率の評価には十分であると判断された。

これは観測区間の水面形が1 km-2 km 間隔のデータでも表せる水面形であったこと、水面形が折れていても、折曲り区間の長さが全区間に対して短かったこと等にも起因すると考えられるが、特に時間的及び縦断的な水位変化量が区間平均水位誤差よりも十分に大きいこと、相対変化には系統誤差の影響が小さいことによる。

以上のことから、河道内における貯留量を評価することを目的とすれば、堤間幅が数100 m クラスの河川であれば、2-3 km 間隔の水位観測を行えば十分な精度で算定可能である。ただし、粗度係数の逆算にあたっては、水面形の折曲り位置等が重要であるので、痕跡水位については十分細かく計測する必要がある。また、痕跡水位から定常流解析で逆算された粗度係数の値は非定常流解析において十分な参考値となる。

謝辞：国土交通省関東地方整備局江戸川河川事務所より江戸川洪水観測資料、近畿地方整備局豊岡工事事務所より円山川洪水観測資料の提供についてご協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 藤田光一, 野口均: 洪水流追跡法(その3)-種々の粗度係数逆算法の比較と適用条件-, 土木技術資料28-10, pp.51-58, 1986.
- 2) 福岡捷二, 渡邊明英, 原俊彦, 秋山正人: 水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量ハイドログラフと貯留量の高精度推算(土木学会論文集登載決定), 2004.5.
- 3) 福岡捷二, 渡邊明英, 関浩太郎, 栗栖大輔, 時岡利和: 河道における洪水流の貯留機能とその評価, 土木学会論文集, No.740/II-64, pp.31-44, 2003.
- 4) 福岡捷二, 渡邊明英, 関浩太郎, 岡部博一: 洪水流の水利特性に及ぼす非定常性, 流路平面形, 横断面形の影響, 水工学論文集, 第44巻, pp.867-872, 2000.
- 5) 福岡捷二, 関浩太郎, 栗栖大輔: 河道における洪水流の貯留とピーク流量低減機能の評価, 河道の水利と河川環境シンポジウム論文集, Vol.6, pp.31-36, 2000.
- 6) 福岡捷二, 栗栖大輔, Alex George Mutasingwa, 中村剛, 高橋政則: 洪水流の河道内貯留に及ぼす堤防と低水路の位相差および高水数幅の影響, 水工学論文集, 第46巻, pp.433-438, 2002.
- 7) 渡邊明英, 福岡捷二, Alex George Mutasingwa, 太田勝: 複断面蛇行河道におけるハイドログラフの変形と河道内貯留の非定常二次元解析, 水工学論文集, 第46巻, pp.427-432, 2002.
- 8) 建設省河川局治水課, 土木研究所: 河道特性に関する研究, 第42回建設省技術研究会報告, 773p, 1988.
- 9) 土木学会: 水理公式集[平成11年度版]第2編河川編 p.101-103, 1999.
- 10) 福岡捷二, 藤田光一: 洪水流に及ぼす河道内樹木群の水利的影響, 土木研究所報告第180号, 1990.

(2004. 4. 7受付)