

実河道に適応する3次元水理解析モデルの構築と樹林の治水機能評価

Construction of 3-D Hydraulic Calculation Model Suitable for Actual River Courses, and Evaluation of Functions of Tree Growth in Riverbeds to Protect Levees and Riverbanks

研究第二部 主任研究員 北澤 聖司

研究第二部 次長 安田 実

Tree growth in riverbeds could reduce river flow capacity and result in damage to levees as well as revetments, by causing high-velocity flows between trees and levees.

On the other hand, tree growth in riverbeds can be considered to have such functions as protecting levees and riverbanks, improving river-line scenery, encouraging the utilization of flood plains, and preserving ecosystems.

We propose that the technical skills for evaluating such functions of tree growth as the protection of levees and riverbanks be developed using 3-dimensional hydraulic calculation models.

Key words: tree growth in riverbeds, functions such as protecting levees and riverbanks, 3-dimensional hydraulic calculation model

1. はじめに

河道内の樹林は、河川景観の向上、高水敷利用の増進、生態系の保全など多様な機能を有していると考えられる。一方、洪水時にはその樹林による河道流下能力の低下や、樹林と堤防との間の高速流の発生による護岸および堤防の損傷を生じさせる危険性等が指摘されている。

そこで、河川環境上重要な樹林の保全と治水安全度の向上の両立を目的とした河道内の樹林の管理方針を策定することが重要な課題と考えられる。

本報文は、河道内の樹林の保全と活用を考えた管理指針策定の基礎検討として、樹林が有する治水機能を明確にし、河道地形の特性や多様な樹林形態を考慮できる3次元水理解析モデルの適用による樹林における治水機能の定量的な評価について検討したものである。

2. 河道内樹林の治水機能

2-1 樹林付近の流れの特性

樹林を有する河道においては以下の特性が見られる。^{1) 2)}

(1) 樹林内の流れが他の河道部分に比較して著しい低流速となる。

(2) 樹林内の遅い流れが周辺部分の速い流れと激しく混合することにより、樹林周辺では速い流れが減速する特徴がある。

樹林帯のある横断面における流速分布を図-1に示す。

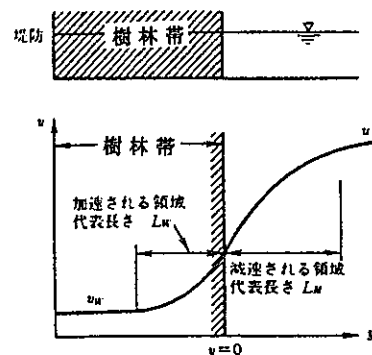


図-1 樹林帯のある横断面での流速分布¹⁾

Fig. 1 Distribution of flow velocity at cross section with tree growth zone

2-2 河道内樹林の治水機能

河道内の樹林の流速低減効果は、樹林と河岸の相対的な位置関係によって、表-1に示す治水機能に分類することができる。^{3) 4) 5) 6)}

3. 水理解析手法

樹林を有する河道の洪水流の解析において明らかにすべき水理的評価項目として以下のものが考えられる。

- ① 水位
- ② 堤防及び護岸周辺の流速分布
- ③ 樹林周辺の流況

樹林の治水機能を評価するためには、樹林周辺の流速ならびに流向を明らかにすることが重要である。

樹林を有する河道の洪水流の解析において評価すべき項目と各水理解析手法の適応性を表-2に示す。

この表より、縦横断方向の流速分布が問題となる場合には、洪水時の流れをよりの確に把握できる3次元水理解析手法を適用することが有効と考えられる。

3次元水理解析手法は、以下に示す局所的な流れの解析についても有用と考えられる。

- ① 著しい蛇行、急拡、急縮など河道の線形が複雑な場合。
- ② 樹林の位置、密度など樹林分布が縦断的に変化する場合。
- ③ 横断面の2次流の作用を把握する必要がある場合等。

3-2 3次元水理解析モデルの概要

本研究では、低水路が蛇行している複断面河道の流れの解析で検討されている3次元解析手法⁷⁾をもとに実河道に適用できるモデルを作成した。

今回作成した3次元水理解析モデルの特徴は以下のようである。

① 一般座標系の採用

一般に、実際に解きたい流れ場の多くは大変複雑である。このような場合、通常のデカルト座標系から一般座標系に座標変換することにより計算上多くの利点が生じる。例えば、計算空間内では等間隔格子になるように写像変換を行うため、そこでの差分式が簡潔となる。これにより複雑な河道形状において精度

の高い解析が可能となった。

② スペクトル法の導入⁸⁾

一般に差分法や有限要素法等の数値計算は物理空間で行われるが、それでは微分の精度が格子点の数で制限され十分な精度が得られない。そこで、物理空間から計算空間(波数空間)に変換していくつかの波の合成として解を求め、少ない格子点でよい精度が得られるスペクトル法を導入した。

3-3 モデルの適用

(1) 検討対象区間

本研究では、3-2で述べた3次元水理解析モデルを江戸川中流部ならびに利根川中流部に適用して河道内樹林の治水機能の評価を行った。検討対象区間の特徴は次のようである。

① 江戸川(45km~48km)

低水路の湾曲が著しく、堤防法線と低水路法線の位相が異なる。

② 利根川(137km~141km)

河道はほぼ直線で、樹林がブロック状に分布している。

図-2、3に江戸川、利根川の検討対象区間の平面図を示す。

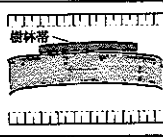
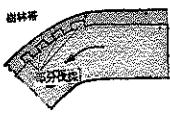
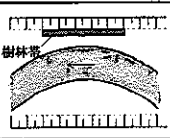
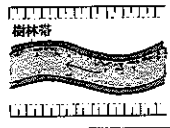
(2) 計算格子の作成

計算格子の作成において以下の点に考慮した。

- ・スペクトル法を適用する場合、周期境界条件を満足させる必要があり、検討対象区間の上流側か下流側または両側に仮想区間を付加した。その仮想区間はスプライン関数により作成した。
- ・縦断方向の格子は、既往の研究結果より、樹林周辺に生じる水平渦の波長の1/4程度とした。⁹⁾
- ・横断方向の格子は樹林帯の幅を考慮して10m程度とした。
- ・鉛直方向の格子は、低水護岸の法肩を基準に上下2分割とした。

表一 1 河道内樹林の治水機能

Table 1 Hydraulic function of tree growth within river courses

機能分類	樹林の分布状況	機能内容
河岸保護機能		低水路河岸付近の樹林は、河岸に沿う流速を低減するとともに、高水敷への洪水の乗り上がり、低水路への落込み流れを軽減し、低水路河岸部の洗掘・侵食を防止する機能が考えられる。
水制機能		低水路河岸部の樹林による流速の低減により、主流を河道中央寄りに変化させ河岸の洗掘を防止する水制機能が考えられる。
堤防保護機能		堤脚付近の樹林は、堤防に沿った高速流の発生を防止し、水衝作用を緩和することにより堤防の洗掘・侵食を防止する機能が考えられる。
一連区間の流れの制御機能		一連区間に連続する樹林は、低水路と高水敷の間の流れの混合・干渉作用を軽減し洪水をスムーズに流下させる機能が考えられる。

表一 2 樹林を有する河道における水理評価と水理解析法

Table 2 Hydraulic evaluation and hydraulic calculation method for river courses with tree growth

項目	1次元計算	準2次元計算	平面2次元計算	3次元計算
水位評価 (流下能力)	○ 既往洪水の再現粗度等を用いて計算できる	◎ 複断面形状、樹林、高水敷植生河床形態等の各種要因の抵抗を考慮できる	○ 計算の労力が大きい	○ 計算の労力が大きい
堤防及び護岸に沿った高速流の評価	× 横断方向の流速分布が評価できない	○ 横断方向の分割断面ごとに流下方向流速を把握できる	◎ 計算格子分割により準2次元より詳細な流況の把握ができる	○ 計算の労力が大きい
流況評価	× 横断方向の流速分布が評価できない	× 平面的な流況を把握できない	○ 水深平均の平面流況を把握できる。適用できる条件に制約がある	◎ 河岸付近の地形樹林条件を考慮した詳細な流況の把握ができる
適用上の課題	精度のよい粗度の設定や樹林帯の死水域の設定が課題である。	湾曲区間や樹林分布が縦断的に変化する場合は流速分布の再現性に問題がある	複断面河道の流れのように水深方向の流速分布が一樣でない場合、流況の再現性が劣る	計算労力が大きいことから現時点では長い区間への適用に課題がある。

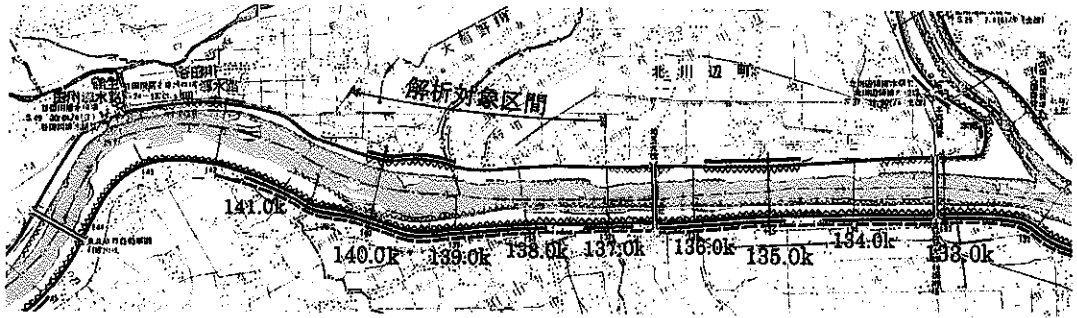


図-2 利根川中流部の検討対象区間平面図

Fig. 2 Plane of section subject to study in midstream area of Tone river

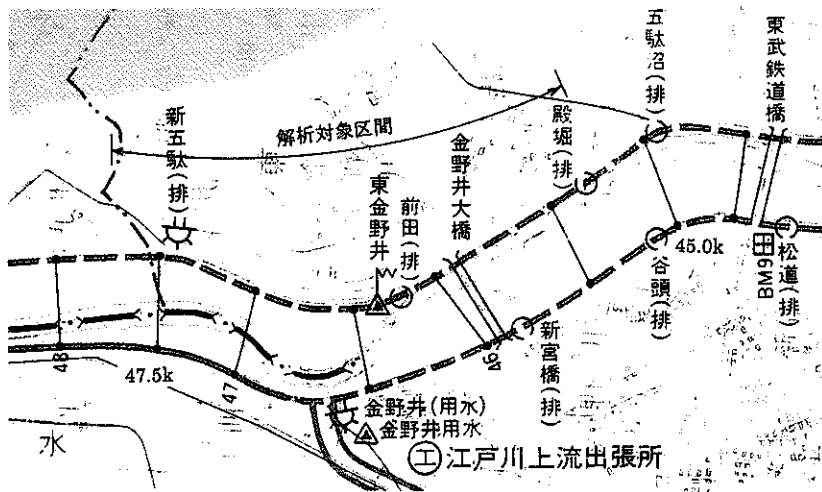


図-3 江戸川中流部の検討対象区間平面図

Fig. 3 Plane of section subject to study in midstream area of Edo river

図-4、5に江戸川の計算格子を示す。

(3) 樹林のモデル化

樹林は次式に示す透過係数によりモデル化した。透過係数 K_s は、樹林の密度や樹木の高さ、幹、枝の形状から与えられる。²⁾

$$K_s = \frac{1}{\sqrt{\frac{C_D}{2g} \lambda}}$$

ここに、 C_D ：抗力係数、 λ ：単位流体塊中の樹木投影面積、 g ：重力加速度

(4) モデルの検証

モデルの検証計算は、高水敷が冠水し、か

つ洪水流のベクトル解析が実施されている洪水を対象とした。

検証洪水は表-4のようである。

表-4 検証洪水
Table 4 Verified floods

河川名	検証洪水	ピーク流量
利根川	昭和56年8月洪水	7800m ³ /s
江戸川	昭和57年9月洪水	2850m ³ /s

検証は、計算結果の流速ベクトル図と実績洪水のベクトル図との比較による平面流況の

再現性ならびに痕跡水位の再現性について検討した。その結果、実績洪水の流況特性をよく表現できていた。

4. 樹林の治水機能の検討

4-1 検討ケース

3次元水理解析モデルを適用して江戸川、利根川で樹林の治水機能を検討した結果について以下に示す。ここでは、治水機能のうち「河岸保護機能」「堤防保護機能」について述べる。検討ケースを表-5に示す。

表-5 治水機能の検討ケース

Table 5 Flood control study cases

治水機能	検討河川	検討方法
河川保護機能	利根川	現況樹林と「樹林なし」の比較検討
	江戸川	
堤防保護機能	江戸川	堤防付近の植樹と「樹林なし」の比較検討

表-6にシミュレーションの計算条件を示す。また、図-6、7に利根川、江戸川の現況樹林の分布を示す。

表-6 シミュレーションの計算条件

Table 6 Calculation of conditions for simulation

項目	条件	
河道条件	現況河道	
樹林条件	現況植生	
計算流量	利根川	17,000m ³ /s
	江戸川	5,500m ³ /s
計算格子	縦断	利根川約100m、江戸川50~60m
	横断	利根川平均7~8m、江戸川2~20m
	鉛直	低水路法肩を基準に上下2層
	格子数	利根川 129×69×3 江戸川 129×61×3

4-2 樹林の治水機能の評価

(1) 河岸保護機能

① 利根川

図-8に平面計算ベクトル図を、図-9に右岸の低水路河岸沿いの流速分布を示す。図-9より137~138km、139~140kmの右岸側の樹林帯前面区間では、それぞれ「樹林なし」のケースの流速に比べて約1/6~約1/10の流速となっており、樹林周辺の流速が極端に低下していることが分かる。水位については堤防沿いにおいて「樹林なし」のケースに比べて最大で約50cmの水位上昇が生じている。

② 江戸川

図-10に平面計算ベクトル図を、図-11に左岸の低水路河岸沿いの流速分布を示す。

「樹林なし」の場合、上層の流れの直進性が強く、主流は蛇行部低水路の内岸側に生じている。また、47km付近で高流速が高水敷に乗り上がり、46.5km付近で低水路への落込みが見られる。46.5km~47kmの左岸の樹林による流速低減により、この区間で主流が低水路中央寄りに変化する水はね機能も確認できる。「樹林なし」のケースに比べ、この区間において、流速は1/2~2/3に低減している。水位の比較では「樹林なし」に比べて最大50cm程度の水位上昇が生じている。

(2) 堤防保護機能

堤防保護機能として図-12に示す高水敷が極端に狭くなる区間に植樹する2ケースについて検討した。なお、堤防法面上の植樹については現行基準では問題があるが、本検討では樹林位置の効果を判断するため想定したものである。

植樹範囲が狭く、樹林の位置が主流から離れていることから河道全体の流況に変化はなく、この堤防付近の植樹による水位上昇は見られない。図-13に堤防沿いの流速分布を示す。樹林により約1/3まで流速が低減されている。これより樹林の位置はできるだけ堤防に近い場合が堤防保護としての機能が高いと考えられる。

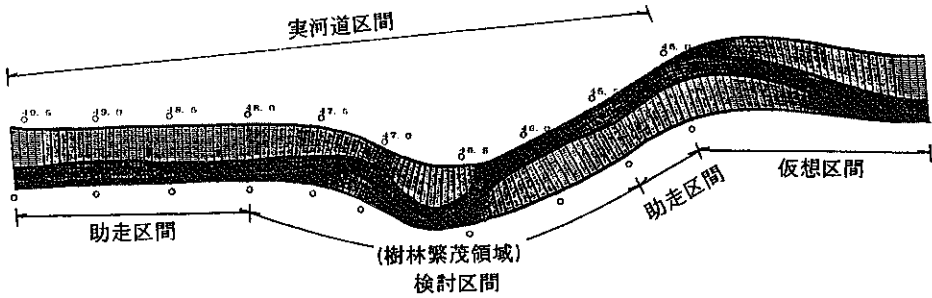


図-4 江戸川の計算格子平面図
Fig. 4 Calculation of Edo river grid plane

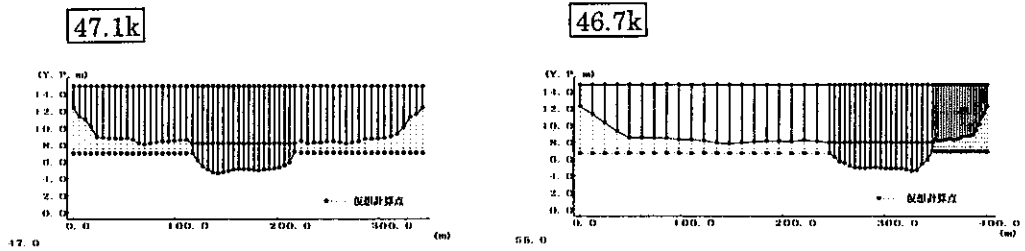


図-5 江戸川の計算格子横断面図 (代表断面)
Fig. 5 Calculation of Edo river grid plane (typical section)

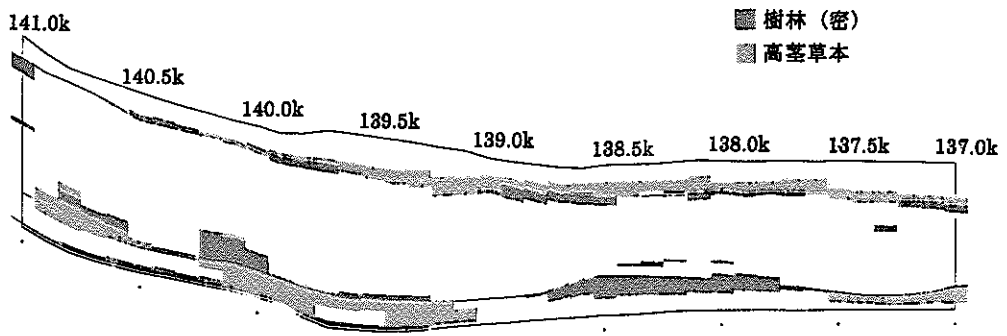


図-6 利根川の現況樹林分布 (計算格子上で表示)
Fig. 6 Distribution of tree growth along Tone river under present conditions (indicated on calculation grid)

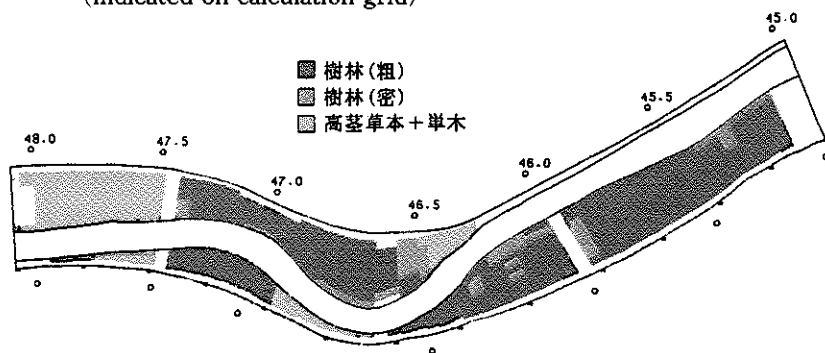


図-7 江戸川の現況樹林分布 (計算格子上で表示)
Fig. 7 Distribution of tree growth along Edo river under present conditions (indicated on calculation grid)

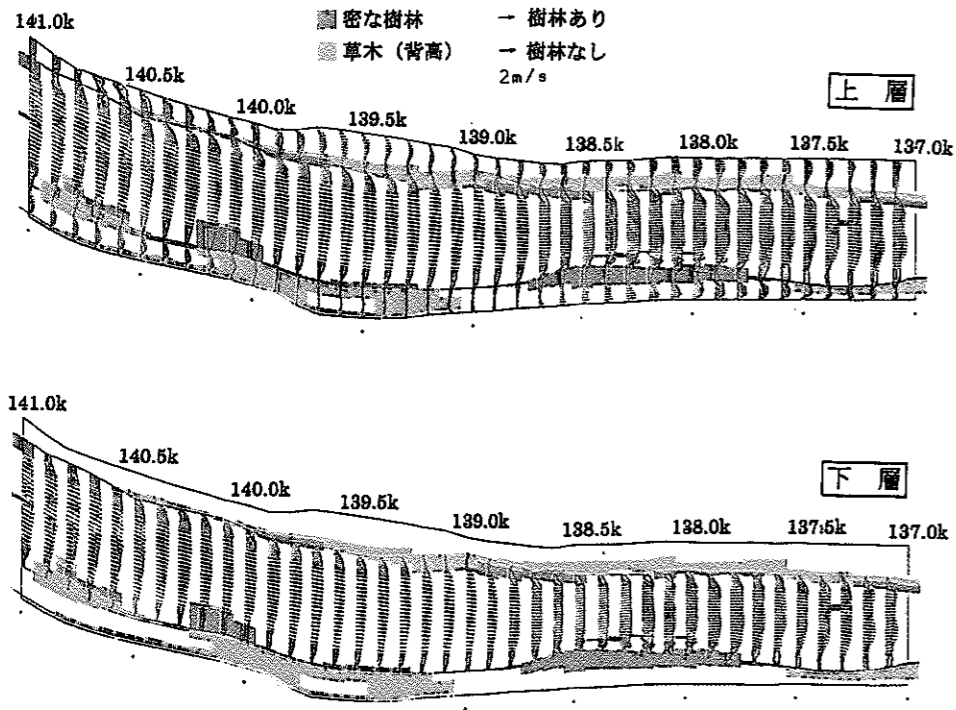


図-8 利根川の河岸保護機能の計算平面ベクトル図
Fig. 8 Diagrams for calculation of plane vectors of river bank protective function for Tone river

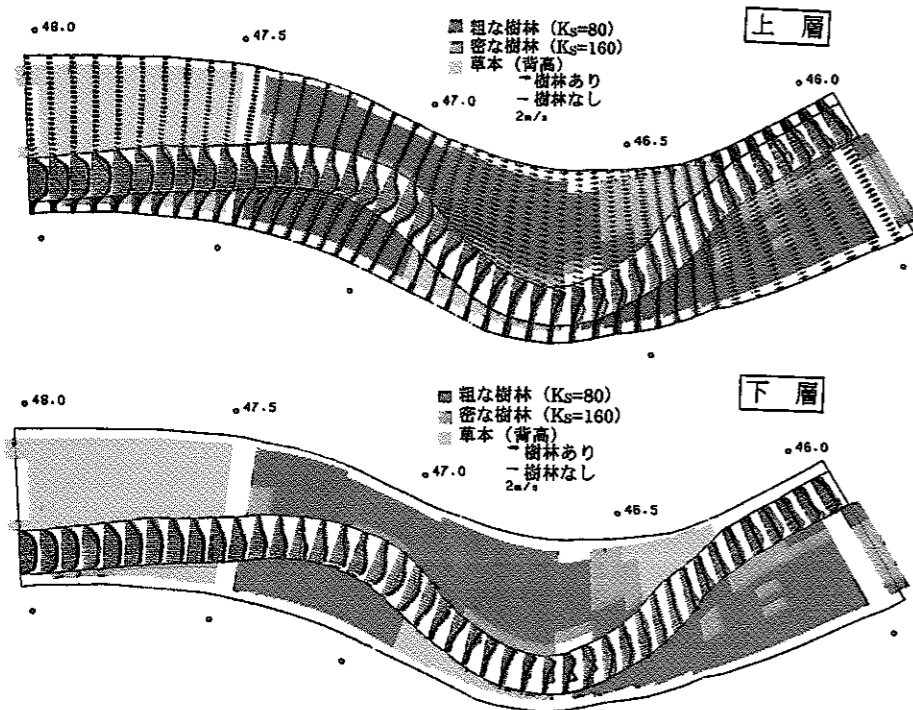


図-10 江戸川の河岸保護機能の計算平面ベクトル図
Fig. 10 Diagram for calculation of plane vectors of Edo river bank protective function

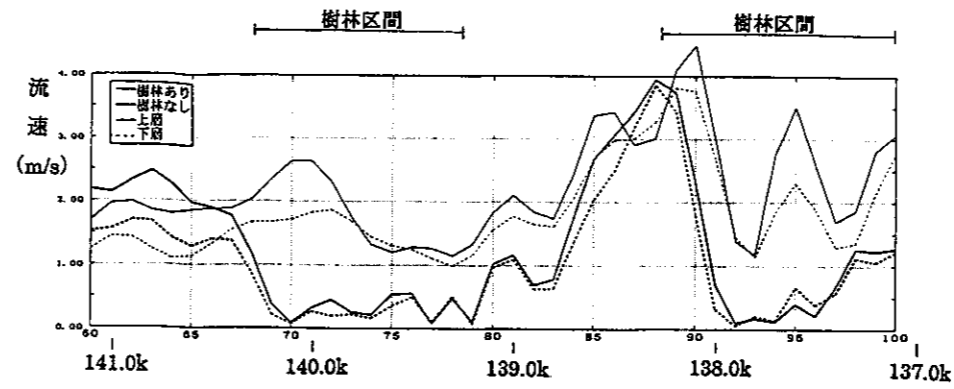


図-9 利根川の河岸保護機能の縦断方向流速分布図
Fig. 9 Graphed distribution of flow velocities in vertical direction for Tone river bank protective function

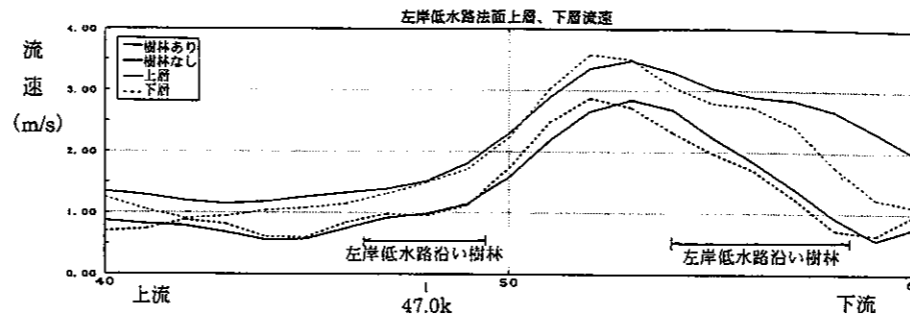


図-11 江戸川の河岸保護機能の縦断方向流速分布図
Fig. 11 Graphed distribution of flow velocity in vertical direction for Edo river bank protective function

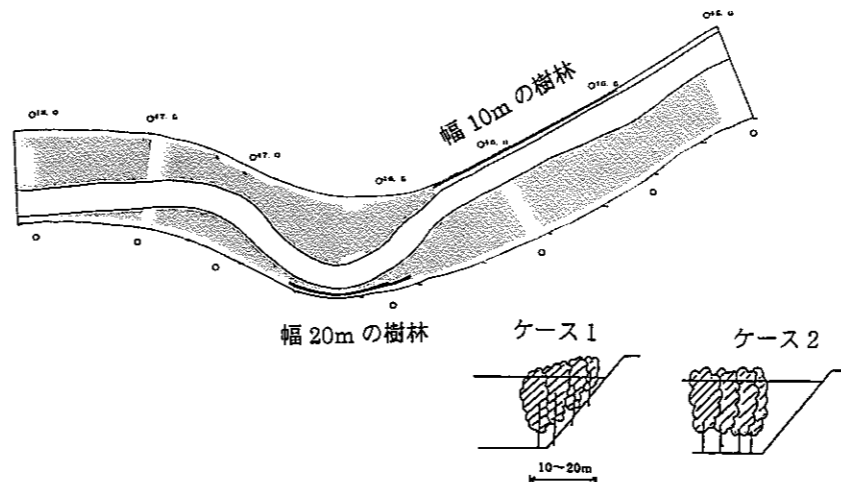


図-12 江戸川の堤防保護機能の植樹位置図
Fig. 12 Diagram of tree-planting locations for Edo river levee protective function

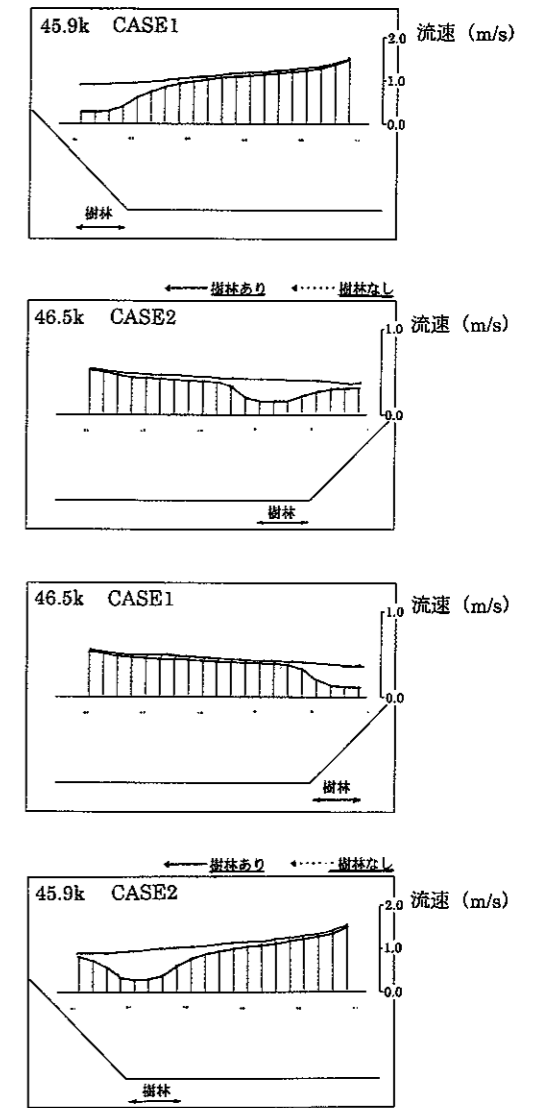


図-13 江戸川の河岸保護機能の横断方向流速分布図
Fig. 13 Diagrams of flow velocity distributions in cross-river direction for Edo river bank protective function

5. 今後の課題

河道内樹林の治水機能を積極的に活用し、樹林の保全と治水上の安全度の両立を図る樹林管理の在り方を検討していく上では以下の課題が考えられる。

- ・樹林評価項目に応じた適切な水理解析手法を選定し、効率的な検討を行う必要がある。
- ・具体的な樹林の保全・植樹については、河道地形や樹林分布が考慮できる3次元モデルが有用であり、このモデルの汎用化を図る必要がある。
- ・樹林の治水機能は、樹林による流速低減効果によるものであり、そのトレードオフとして水位上昇を生じる。今後は、治水機能とその相反関係にある水位上昇を考慮した総合評価を検討する必要がある。
- ・樹林を積極的に活用するためには、既存の河川施設であるコンクリート護岸や根固工等との比較を行い、どのような場合に樹林の特性が有効に機能するか検討する必要がある。

6. おわりに

本研究の3次元水理解析モデルの作成・適用においては、広島大学工学部・福岡捷二教授、渡邊明英助教授にご指導を頂いたことを記し、ここに謝意を表します。

<参考文献>

- 1) (財)リバーフロント整備センター編集；河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン（案）、山海堂、1994
- 2) 福岡捷二、藤田光一(1990)；洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響、土木研究所報告第180号
- 3) 土木研究所；水害防備林調査、土木研究所資料第2479号、1987
- 4) 上田弘一郎(1955)；水害防備林、産業図書
- 5) 福岡捷二(1996)；洪水防御計画における水防林と低水路の法線形のあり方、Inter-

national Seminar on Recent Trends of Flood and their Preventive Measures.

- 6) 福岡捷二、渡邊明英、大橋正嗣、姫野至彦(1997)；樹木群の水制的利用可能性の研究、水工学論文集第41巻
- 7) 渡邊明英、福岡捷二(1996)；複断面低水路蛇行流路における三次元流れの解析、土木学会第51回年次講演会講演概要集
- 8) 例えば、保原充、大宮司久明編；数値流体力学、基礎と応用、東京大学出版会、1992
- 9) 福岡捷二、渡邊明英、上阪恒雄、津森貴行(1995)；低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造、利根川 新川通昭和56年8月洪水、土木学会 論文集No.509/II-30