

釧路湿原における河川氾濫に伴う土砂堆積と 乾燥化現象の関連性に関する研究

A STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN SEDIMENTATION CAUSED BY INUNDATION AND DRYING PHENOMENA IN KUSHIRO WETLAND

名久井孝史¹・清水康行²・藤田隆保³

Takafumi NAKUI, Yasuyuki SHIMIZU and Takayasu FUJITA

¹ 学生員 北海道大学大学院工学研究科 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

² 正会員 工博 北海道大学大学院工学研究科助教授 (〒 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

³ 正会員 北海道開発局釧路開発建設部治水課 (〒 085-8551 釧路市幸町 10 丁目 3 番地)

The Kushiro Wetland, one of the precious wetlands in Japan, is located in the east of Hokkaido, downstream of the Kushiro basin. A number of meandering channels were retained without manipulation. Nowadays, the Kushiro wetland is faced with many problems. The drying phenomena impact many kinds of animals and plants, especially in reducing the number of habitats of precious species. The phenomena stem from sediment deposition on the surface layer due to the inundation and the decrease of the capacity of preserving water. The wetland acts as a vast area, and allows overflowing freely during the flood period. It is an important factor for the drying phenomena of the wetland. The purpose of this study is to develop a numerical model to simulate the flooding of the Kushiro wetland, and to investigate the relation between the accumulation of suspended sediment and the drying phenomena with both of whole and limited areas in the wetland.

Key words : drying phenomena, inundation, cartesian coordinate.

1. はじめに

近年における河川開発・改修の動向として、過去に直線化した河道を蛇行などの自然を生かした形で治水、利水を考える近自然工法が盛んに検討されており、その先駆けとして、現在北海道の東部に位置する釧路湿原(図-1)や標津川において大規模な蛇行河川復元実験が行われている。特に釧路湿原内の河川では、かつて蛇行していた部分を直線化したことでその湿原環境に様々な影響を及ぼしており、乾燥化現象は深刻な問題である。乾燥化とは湿原地帯が何らかの原因で表層の保水機能に変化を来し、土壌が乾燥していく現象であるが、その影響の大きさはヨシなどの湿原特有の植物に代わって乾燥した土地に生えやすいハンノキの分布が経年ごとに拡大しているという植生の変化からも窺うことができる(図-2)。

釧路湿原はわが国最大の湿原であり、釧路川及びその支流を中心として形成され、自然のままの蛇行河川が残る数少ない川としても貴重な存在である。またその一

部はラムサール条約に指定されるなど、学術上、あるいは希少な生物の生息地としてその保全対策は重要な課題である。

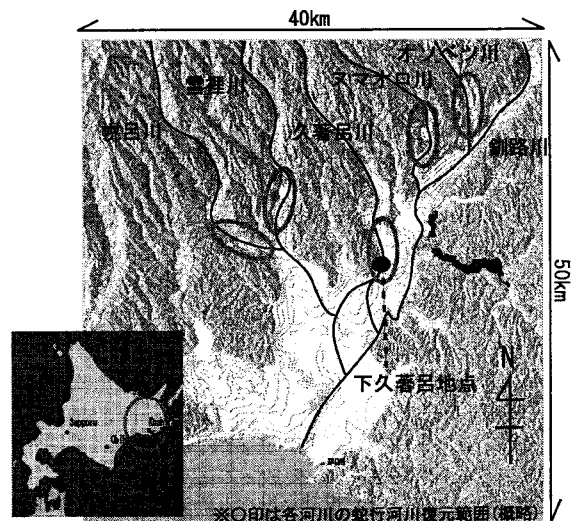


図-1 釧路湿原全体図と蛇行河川復元実験地の概略

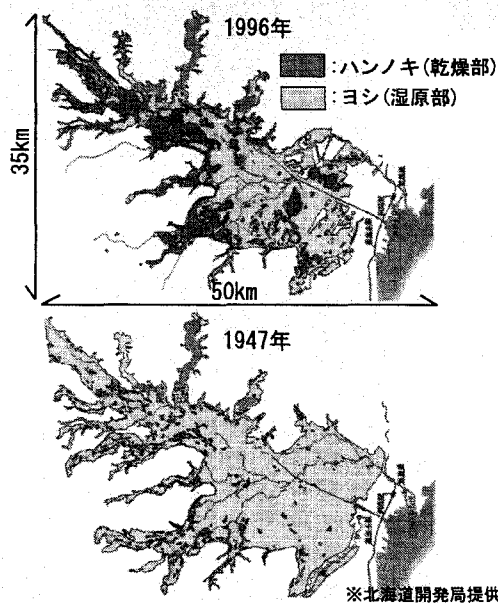


図-2 過去 50 年における湿原乾燥化の進行状況

乾燥化現象の原因として、長年にわたる河川流域での農業開発とそれを支える河道改修に伴う湿原への流入土砂量の急増が考えられている¹⁾。もともと人間の存在しない湿原内はその茫漠とした広がりとその平坦さゆえに巨大な遊水地として機能しており、洪水時には自由に氾濫することが許されていた。その際に河川上流から削り取られてきた土砂が長年にわたる度重なる氾濫によって湿原表層へ多量に堆積し、あたかも河川上流部に分布する性質の異なる土で湿原を埋め立てた形で表層の状態を変化させ、乾燥化現象を引き起こしたと考えられる。

釧路湿原の乾燥化に関する研究には今までに農林地帯などの影響を考慮した、主に土砂流出モデルの構築が多く行われてきている²⁾が、本研究では流出浮遊砂の湿原上への堆積分布を視覚的に表現する土砂堆積モデルの構築に努め、過去 50 年における植生変化との比較を行うことでその精度を確かめることとした。この中では現地調査の結果から土砂供給源となりうる地点の推測を行い、また流量などの実測データを用いて河川氾濫時の土砂堆積について 2 次元数値解析を行い、湿原内にどのように土砂が堆積したかを考察した。考察例として、湿原全体を視野に入れた非常に広範囲にわたる土砂堆積計算と、捷水路から蛇行河川に移る地点(久著呂川下久著呂地点:図-1 に示す)を想定した小規模モデルの 2 パターンを行った。

2. 現地調査

乾燥化現象の影響が著しい久著呂川を中心に、河床材料等のデータ採取や現地の記録を目的とした釧路湿原

内の現地調査が 2001 年 7 月から筆者らによって行われた。この結果、特に久著呂川中久著呂地点におけるおよそ 1 年間での河岸・河床変化の様子は著しいものであり(図-3)、先に述べたようにこの土砂が湿原上に堆積することで乾燥化を助長していると予想される。図中の久著呂川本流(上図)からは、2001 年と 2002 年で調査時の流量に大きな差が無いことを踏まえると、水位と河岸の比較から大規模な河床・河岸の洗掘が生じていることが明らかに見てとれる。また久著呂川支流(下図)においても、侵食による川幅の顕著な変化を見ることができる。この周囲では同じような河床・河岸の侵食が見られ、この地点が久著呂川における土砂供給源の一部となっている可能性が大きい。特に増水時には多くの土砂が削り取られ、氾濫にともなって下流の湿原部に堆積し、乾燥化現象につながっているものと考えられる。

図-4 に久著呂川や釧路川本流・支流、石狩川における河川流量と流砂量の相関を示す³⁾。この図から、石狩川など他地域の土砂流出量と比較しても釧路湿原内河川のそれは大きいことがわかるが、特に久著呂川は釧路川本流・支流よりも大きな値を示している。このことから釧路湿原では多くの土砂流出・堆積が起こり、その環境に大きな影響を及ぼしていることが推測される。

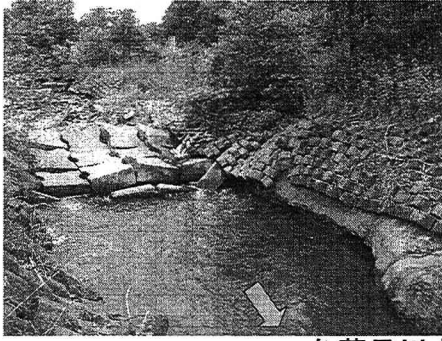
3. 湿原全体での氾濫計算

河川氾濫時の土砂堆積が湿原の乾燥化に大きな影響を与えているという推察から今まで話を進めてきたが、ここでは湿原全体における河川氾濫時の浮遊砂堆積の数値解析を行うことでその真偽性を考察する。湿原内には釧路川を本流とした大小様々な河川が存在するが、今回の計算においては、比較的流量が多く氾濫時には大規模な土砂堆積が考えられる釧路川、オソベツ川、ヌマオロ川、久著呂川、雪裡川、幌呂川の 6 河川からの流入を考えるものとする(図-1)。

(1) 基礎式

計算は 2 次元、非定常、非圧縮性流れの運動方程式および連続の式をもとに行い、移流項には風上差分、圧力項・摩擦項・拡散項には中央差分を用いている。流砂量は浮遊砂のみを考慮し、各タイムステップにおいて得られた水理量から浮遊砂量を計算し、流砂連続式から河床変動量を求める。また本研究では直交座標系にもとづく氾濫解析法を取り上げる^{4),5)}。このモデルは格子形成が容易なことから、氾濫解析において広く一般的に用いられているモデルである。氾濫解析範囲を全て同じサイズの格子で分割するため、範囲内の構造物や河川の蛇行部の影響を的確にとらえるのは難しいが、特に局

2001/7/24



2002/7/23



久著呂川中久著呂地点本流



久著呂川中久著呂地点支流

図-3 久著呂川中久著呂地点における1年間での流域変化

所地点における解析では格子を小さくすることでその欠点を補った。

直交座標系における氾濫解析では、次に示す連続式および x, y 方向の運動量式を用いる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = R \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(UM)}{\partial x} + \frac{\partial(VM)}{\partial y} = & -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} \\ & - \frac{gn^2 U \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(UN)}{\partial x} + \frac{\partial(VN)}{\partial y} = & -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} \\ & - \frac{gn^2 V \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{1/3}} + \varepsilon \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 h :水深、 u, v :それぞれ x, y 方向の流速成分、 p :圧力、 ε :渦動粘性係数、 g :重力加速度、 t :時間、 z_b :地盤高、 n :Manning の粗度係数、 M, N :それぞれ x, y 方向の流量 flux で、 $M = Uh, N = Vh, U, V$:それぞれ x, y 方向の断面平均流速、 R :降雨量である。降雨量については本来であれば計算領域全体に与えるべきであるが、その領域が全流域のごく一部であるため、領域全体の雨量は無視して各河川の上流からの流入流量として与えること

とした。また本計算では水平粘性項を省略して考えることとするため ε については考慮していない。

流砂の連続式、および浮遊砂の濃度 C を規定する2次元の拡散方程式は次のように表される⁶⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial(uCh)}{\partial x} + \frac{\partial(vCh)}{\partial y} + (w_f C - q_{su}) \\ = D_x \frac{\partial^2(Ch)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2(Ch)}{\partial y^2} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 C : 浮遊砂濃度、 h : 水深、 D_x, D_y : x, y 方向の浮遊粒子の拡散係数である。

運動量式中における浮遊砂の沈降速度について、本研究では Rubey の実験式⁷⁾ より次式から求めることとした。

$$\frac{w_f}{\sqrt{sgd}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd^3}} \quad (6)$$

ここで、 w_f : 浮遊砂の沈降速度、 ν : 水の動粘性係数、 s : 砂粒の水中比重(砂の標準値=1.65)、 d : 砂粒の粒径、 g : 重力加速度である。

さらに、浮遊砂の浮上量については次式を用いた。

$$\frac{q_{su}}{\sqrt{sgd}} = 0.008 \left\{ 0.14 \frac{\rho}{\rho_s} (14\sqrt{\tau_*} - \frac{0.9}{\sqrt{\tau_*}}) - \frac{w_f}{\sqrt{sgd}} \right\} \quad (7)$$

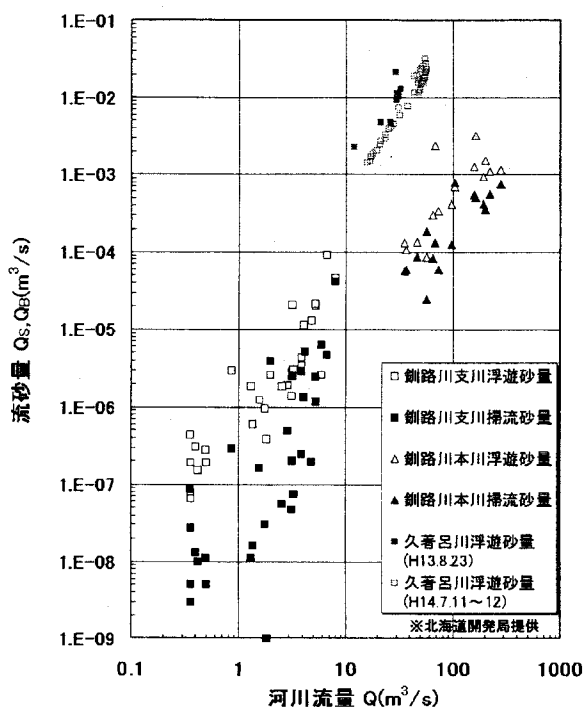


図-4 久著呂川と他河川での流量・流砂量の相関比較

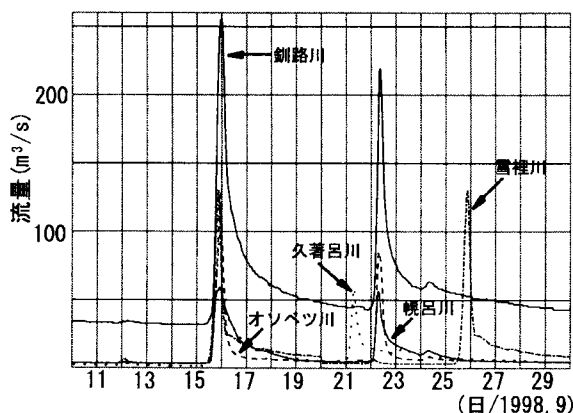


図-5 各河川の1998年9月における1時間平均流量

ここで、 q_{su} :浮遊砂の浮上量、 ρ_s :砂粒の密度、 τ_* :無次元掃流力である。式中で用いる無次元掃流力、およびそれを求める際に用いる摩擦速度は以下のように算定した。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd}, \quad u_*^2 = \frac{gn^2(u^2 + v^2)}{h^{1/3}} \quad (8)$$

ここで、 u_* :摩擦速度である。上の式より求められた浮遊砂の沈降速度、浮上量および濃度から、浮遊砂の河床堆積量を計算するために次に示す河床変動の連続式を用いた。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)}(w_f C - q_{su}) = 0 \quad (9)$$

ここで、 η :河床の高さ、 λ :空隙率である。

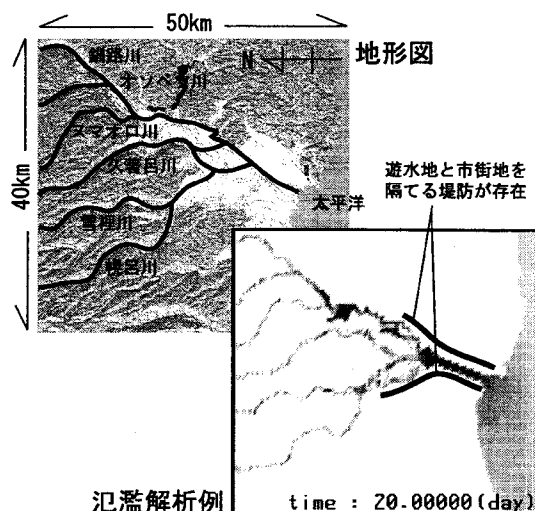


図-6 広範囲計算結果と地図との対応

(2) 計算条件

境界条件については左右両端は壁面とみなし、下流端において自由排水としたが、下流端には若干の勾配をつけることで排水を促している。また、湿原内には塘路湖、達古武湖、シラルトロ湖の3湖が存在するが、地形データ上、湖の存在する部分の標高が著しく低くなり氾濫水が集中して流れ込む可能性があるため、本研究では湖と湿原の接合部に架空の標高を設け、湖への氾濫水の流出を防ぐこととした。

ここで用いられた各河川の流量についてはグラフに示すとおりである(図-5)。1998年9月中旬の流量は釧路湿原の各流量観測所において最も高い値を示していることから、大規模範囲での豪雨、および湿原内での河川氾濫があったものと思われる。本研究ではこの特徴的な流量を湿原内に流し、解析を行うこととした。なお、ヌマオロ川に関しては流量データの欠損から同規模のオソベツ川の流量を用いた。また、粗度係数については湿原部分の0.0425に対して、100m以上の標高部分には樹木の茂る山地を想定して0.08⁸⁾という値を与えることで計算精度の向上に努めた。また、式(1)～(9)に用いられる係数には次のような値を与えた。 $D_x, D_y=0.01 \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu=0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$, $s=1.65$, $d=0.01 \text{ mm}$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$, $\lambda=0.4$, $\rho_s=2.65 \text{ t/m}^3$, $n=0.0425$

(3) 計算結果

湿原上に全く水が存在しないと仮定し、図-5に示す6河川の流量をそれぞれ上流(図-1の上端に境界条件として与えた)から流入させて計算を行った結果は図-7のようになった(図-6に地図との対応を示す)。この計算地形に用いた地形データは国土地理院による50mメッシュ標高データを400mメッシュに平均化させて用い

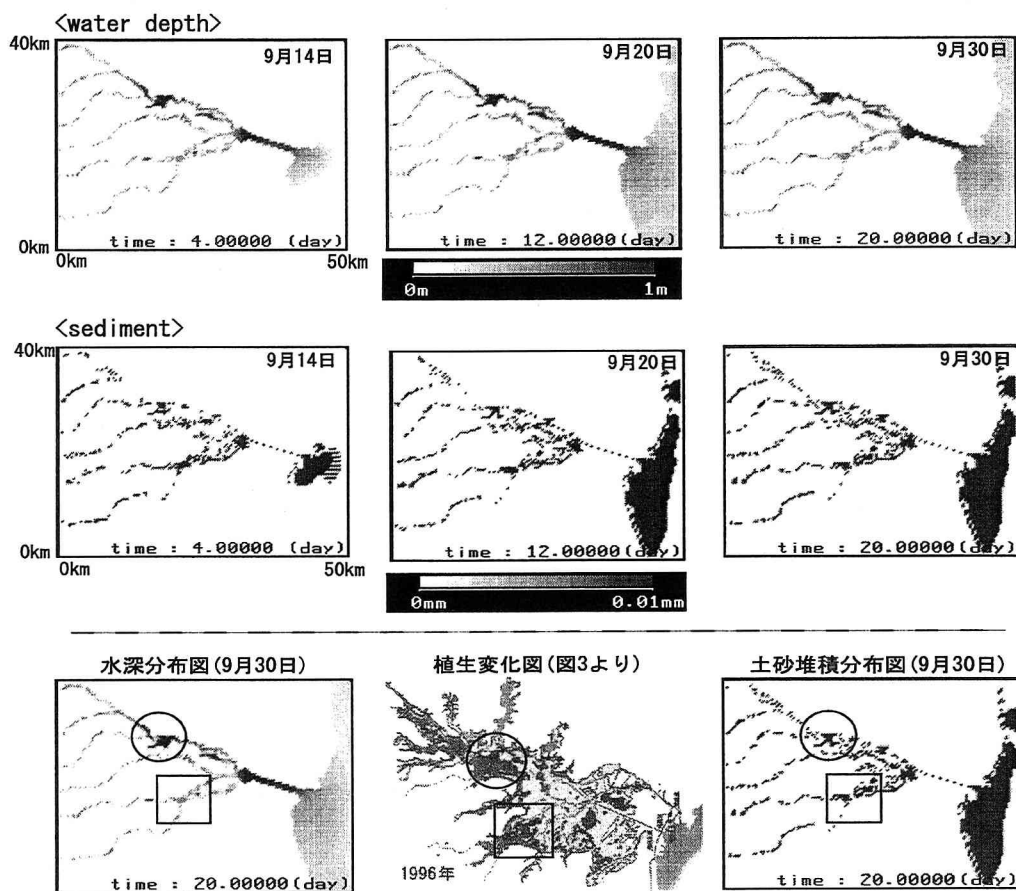


図-7 1998 年 9 月の流量における湿原全体の氾濫状況と浮遊砂堆積分布 (上) と植生変化との比較 (下)

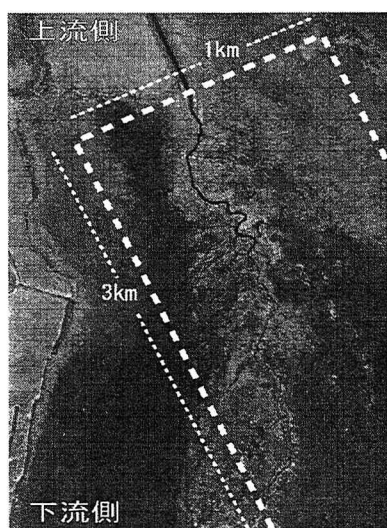


図-8 久著呂川下久著呂地点

ており、詳細な河川位置、深さなどは表現されておらず、この結果はおおよその氾濫水動向、および浮遊砂堆積である。氾濫水は湿原内を広がりながら進むため、実際に河川水が到達する速度よりも遅くなっている。それらを踏まえた上でも、図-7(下)の計算結果に見られる土砂堆

積部分と乾燥化進行部分のおおよその位置が合致していることがわかる(図中の○、□で囲まれた部分)。しかし機械の計算速度の都合上、図-3に表記されているような50年もの期間を計算することはできないため、図-7の計算結果が正確な乾燥化の進行結果を示したとはいえないが、氾濫時に土砂が堆積しやすい地点と乾燥化の進行する地点に関連性があることがこの結果から予想される。

4. 蛇行河川周辺の氾濫計算

釧路湿原内にはかつて捷水路が設置された部分とその下流に蛇行河川が広がる地点が多く見られるが、このような場所では直線化による流速の増大が蛇行部分で氾濫を引き起こすことは容易に想像できる。図-8は湿原内を流れる久著呂川下久著呂地点の衛星写真である。下流の蛇行部周辺が白く見られるが、ここは周囲よりも地盤が高くなっており、およそ天井川の様子を呈している。この原因として以前からの度重なる氾濫により土砂が堆積した結果と考えられるが、ここでは図-8の点線で囲まれる蛇行河川地点の地形で氾濫が起きた場合を想定し、果たして図のような土砂堆積が起こるかを数

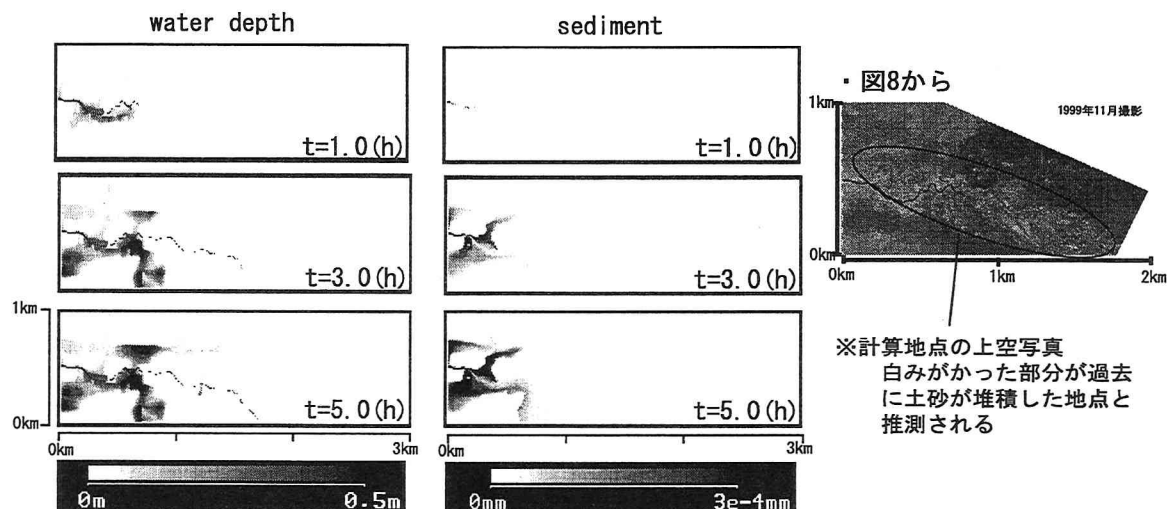


図-9 久著呂川蛇行河川部における氾濫と土砂堆積解析結果

値解析を用いて検討することとした。

(1) 計算条件

基本的な計算式・条件等は3章で述べたものと同じである。地形は捷水路下流端を上流側の始めとした1km×3kmの範囲で行うものとし、流量については氾濫の起きやすい融雪期のもの($Q = 10 \sim 12 \text{ m}^3/\text{s}$)を上流より境界条件として与え、湿原を想定した際の草木等による抵抗は粗度係数(0.0425)によって考慮した。また、左右両端、及び下流端は排水が自由に行われるものとし、地形サイズには2000年にGPS衛星を利用して新しく測定された2mメッシュを用いることで直交座標における精度の向上に努めた。他の係数の値に関しては3章で用いたものと同じである。

(2) 計算結果

融雪期における氾濫水の動向と、それに伴う浮遊砂の濃度分布および堆積分布の様子は図-9のように表現された。図中の衛星写真と浮遊砂堆積計算結果を比較すると、完全に堆積現象を再現できたとは言いが、これは計算に用いた地形の精度、計算時間などによるものと思われ、今後の課題である。また、図中において、部分的に氾濫水が到達していないように見受けられる箇所では浮遊砂が堆積する結果となっているが、実際にはその地点で水深の非常に浅い氾濫が起きて流速が遅くなり、多量の浮遊砂堆積を引き起こしたと考えられる。

5. 考察

全体的、および局地単純モデルの氾濫解析を行った結果、どちらの計算においても河川から水が溢れ出した部分で特に顕著な浮遊砂堆積の様子が見られた。このことは冒頭で述べた湿原乾燥化の原因とも一致している。機械の計算速度の都合上、実際の乾燥化にかかるような

数十年単位の計算は現段階では不可能だが、本研究で行われた短期間の計算による河川氾濫時の土砂堆積範囲と植生変化、あるいは衛星写真から見た河川周辺の土砂堆積の様子を比較してもおおよその位置が合致しており、土砂堆積と湿原乾燥化の関連性を表しているものと考えられる。さらに長期間の計算を行うことで、その関連性を詳しく調べていくことが今後の課題である。

これらの結果より、本研究で用いたモデルは氾濫時の土砂堆積と湿原乾燥化の基礎的な関連性を証明するものといえる。

参考文献

- 1) 許士裕恭, 斉藤仁史: "釧路湿原ミティゲーションについて", 第3回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp.181-186, 1997.
- 2) 例えば, 村上正吾, 林誠二, 渡辺正孝, 亀山哲: "凍結融解現象を考慮した積雪寒冷地における土砂動態のモデル化", 水工学論文集第46巻, pp.653-658, 2002.
- 3) "釧路湿原の河川環境保全に関する検討委員会 土砂流入小委員会資料": 釧路湿原の河川環境保全に関する検討委員会事務局, p.21, p.7-7, 2002.
- 4) 中川一: "氾濫流の解析", 水工学における計算機利用の講習会講義集, pp.43-50, 1999.
- 5) 井上和也, 川池健司, 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.
- 6) 例えば, Vanoni, V. A.: "Transportation of Suspended Sediment by Water", Trans. ASCE, Vol.111, pp.67-133, 1946.
- 7) 清水康行, 中津川誠, 荒井信行: "現場のための水理学", 北海道開発局土木試験所河川研究室, p.38, 1988.
- 8) "水理公式集", 土木学会, p.89(d), 1998.

(2002. 9. 30受付)