

2次元数値解析を用いた釧路湿原における土砂 堆積と乾燥化現象の関連性に関する研究

A STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN SEDIMENTATION AND DRYING PHENOMENA USING 2-DIMENSIONAL NUMERICAL MODEL IN KUSHIRO WETLAND

名久井孝史¹・清水康行²・Sanit Wongs³・岩井聖⁴

Takafumi NAKUI, Yasuyuki SHIMIZU, Sanit WONGSA and Masashi IWAI

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 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)

⁴ 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)

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 are retained without manipulation. Nowadays, the Kushiro wetland is faced with many problems. Especially, the drying phenomena impact many kinds of animals and plants, especially the habitat of precious ones is reduced. 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 detention area, and permits 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 numerical model to simulate the flooding of the Kushiro wetland, and to investigate the relationship between the accumulation of suspended sediment and the drying phenomena with both of large and small areas.

Key words: *Drying phenomena, Sediment runoff, Inundation, Cartesian coordinate.*

1. はじめに

近年、北海道の東部に位置する釧路湿原において乾燥化問題が深刻化している(図-1)。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か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ており、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、あるいは貴重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。

乾燥化現象の原因の一つとして、湿原内の河川氾濫時における土砂流出が考えられている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。その際に河川水に含まれていた土砂が長年にわたって氾濫時に湿原表層に堆積し、表層の保水機能に変化を来したことから乾燥化の原因となったと考えられる。本研究ではこの点に着目し、2次元数値解析を用いて湿原における河

川氾濫時の土砂堆積シミュレーションを行い、過去の流量などの条件を用いて湿原内にどのように土砂が堆積したかを考察することとした。

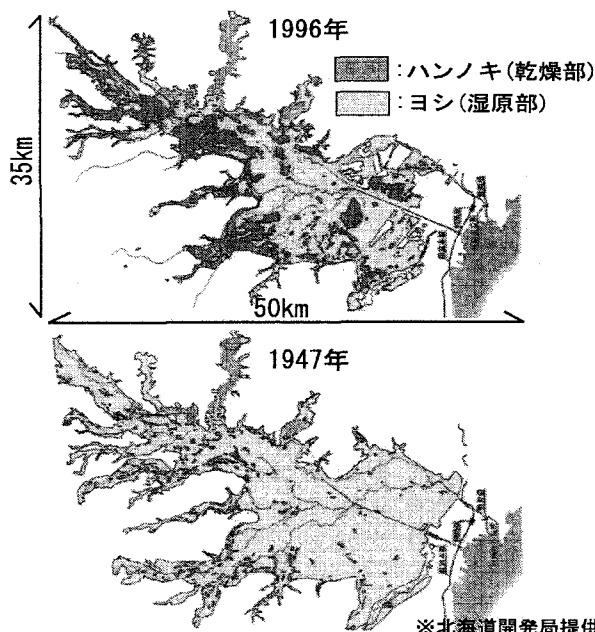
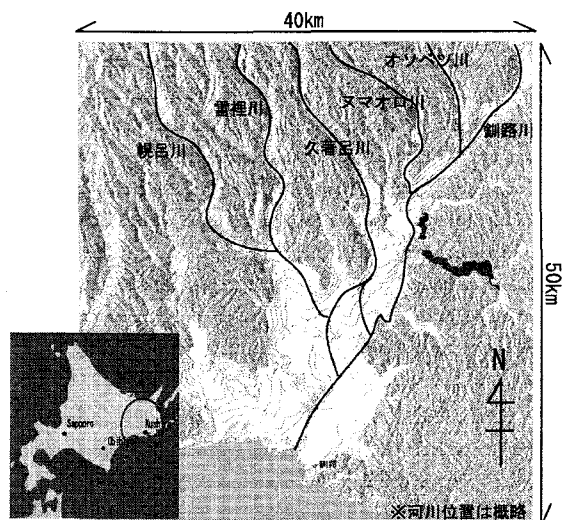
また考察例として、湿原全体を視野に入れた非常に広範囲にわたる土砂堆積計算と、過去に捷水路が設置された部分の下流に広がる蛇行河川部の中規模範囲の2パターンを行った。

2. 計算手法

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^{2),3)}。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。

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



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

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

ここで、 h :水深、 u, v :それぞれ x, y 方向の流速成分、 p : 圧力、 ρ :流体の密度、 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、 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、 M, N :それぞれ x, y 方向の流量フラックスで、 $M = Uh, N = Vh, U, V$:それぞれ x, y 方向の断面平均流速であり、次の式で表される。

$$M = Uh = \int_{z_b}^{z_b+h} u dz \quad (4)$$

$$N = Vh = \int_{z_b}^{z_b+h} v dz \quad (5)$$

ここでは水平粘性項を省略して考えることとする.

本研究では、流砂について浮遊砂のみを考慮するものとした。ここで用いる流砂の連続式、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⁴⁾。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial(uch)}{\partial x} + \frac{\partial(vCh)}{\partial y} + w_f C \\ = D_x \frac{\partial^2(Ch)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2(Ch)}{\partial y^2} \quad (7) \end{aligned}$$

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 の実験式より次式から求めることとした⁵⁾

$$\frac{w_f}{\sqrt{sgd}} = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{sgd^3}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{sgd^3}} \quad (8)$$

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。

$$\frac{q_{su}}{\sqrt{sgd}} = 0.008 \left\{ 0.14 \frac{\rho}{\rho_s} (14\sqrt{\tau_*} - \frac{0.9}{\sqrt{\tau_*}}) - \frac{w_f}{\sqrt{sgd}} \right\} \quad (9)$$

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。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd}, \quad u_*^2 = \frac{gn^2(u^2 + v^2)}{h^{1/3}} \quad (10)$$

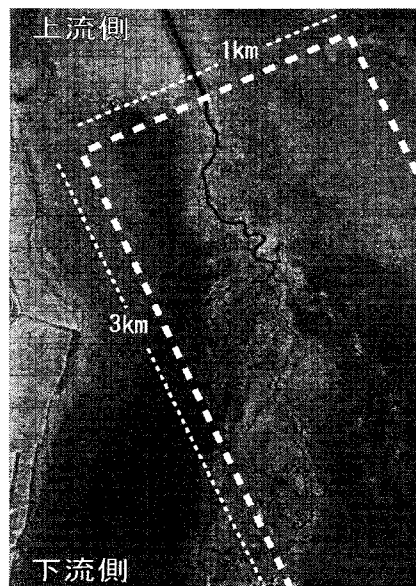


図 3: 久著呂川下久著呂地点解析範囲

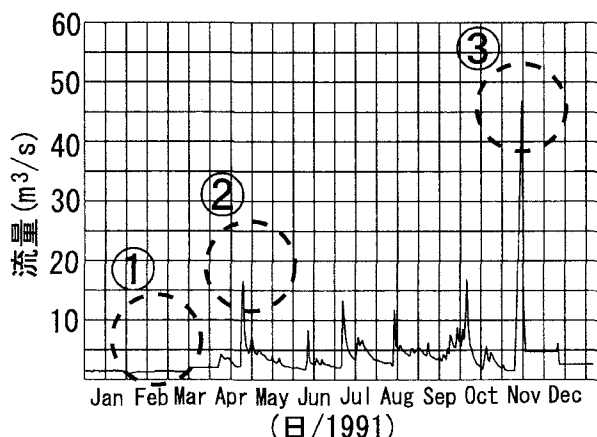


図 4: 久著呂川 1991 年日平均流量

ここで, u_s : 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.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{(1-\lambda)}(w_f C - q_{su}) = 0 \quad (11)$$

ここで, η : 河床の高さ, λ : 空隙率である.

以上の式を用いることで釧路湿原における局所的, 全体的な計算を行う事とする.

3. 局地的な氾濫計算

(1) 計算範囲: 久著呂川下久著呂地点

久著呂川は湿原内を流れる釧路川の支流のひとつであり, 特に下久著呂地点に敷設された捷水路, 及びその下流に広がる蛇行河川部分では, 氾濫時の土砂堆積に起因すると思われる地形の変化が衛星写真などからも見

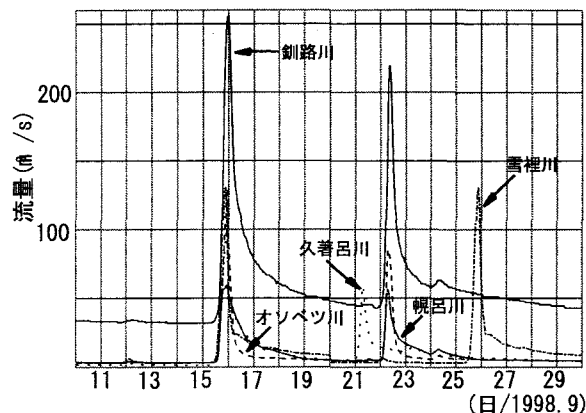


図 5: 各河川の 1998 年 9 月における 1 時間平均流量

てとることが出来る (図-3). 計算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する.

(2) 諸条件

図-4 に久著呂川の代表的な日流量変化を表している 1991 年の年間日流量変化グラフを示す. このグラフの特徴として, 1 月から 3 月にかけての小流量期 (①), 4 月から 6 月にかけての融雪期 (②), そして台風が原因と考えられる 8 月から 9 月にかけての最大流量期 (③) の 3 期間が上げられる. まず初めにこの 3 種の流量における氾濫規模の大きさについて比較し, 次にこのうち融雪期 ($10 \sim 12 \text{ m}^3/\text{s}$) の流量を上流端の流入から与え, 氾濫水, 浮遊砂濃度, 浮遊砂堆積についての計算を行うこととした. その際, 湿原上における草木等による抵抗は粗度係数によって考慮することとした.

境界条件に関しては左右両端, 及び下流端は排水が自由に行われるものとし, 地形サイズには密な 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.

式 (1) ~ (11) に用いられる係数には次のような値を与えた. $D_x, D_y = 0.01 (\text{m}^2/\text{s}), \nu = 0.01 (\text{mm}^2/\text{s}), s = 1.65, d = 0.01 (\text{mm}), g = 9.8 (\text{m}/\text{s}^2), \lambda = 0.4 (\text{m}^3), \rho_s = 2.65 (\text{kg}/\text{m}^3), n = 0.0425$

(3) 計算結果

流量の違いにおける氾濫水の動向を図-7(上) に示す. ここではそれぞれの流量における氾濫規模の差が顕著に見て取れる. 特徴として, 流量の最も少ない平常時の流量 (図-4: ①) においても, 小規模ながら氾濫が起きるという結果となったが, これは解析地点が遊水地内であり非常に平坦であるということ, また以前からの土砂堆積により通水断面が減少し, 氾濫が起りやすくなっていることが原因と考えられ, このことは筆者らの現地調査でもその様子を窺うことが出来た.

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-7(下) 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, 部分的に氾濫水の到達していない箇所でも浮遊砂が堆積する結果となっ

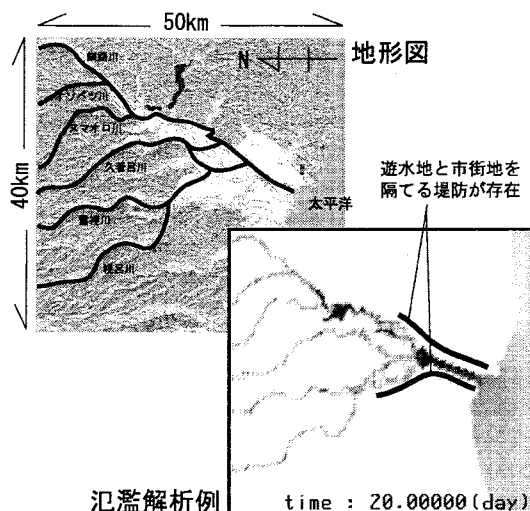


図 6: 広範囲計算結果と地図との対応

たが、これは水深の非常に浅い氾濫が起きたことで流速が遅くなり、堆積量が多くなったためと考えられる。

4. 広範囲の氾濫計算

(1) 計算範囲： 釧路湿原全体 (図-1 に示す範囲)

ここでは湿原全体についての浮遊砂堆積について考慮していくが、基本的な手法は局所部分の計算で行われたものと変わりはない。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)。

(2) 諸条件

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、シラルトロ湖という 3 つの湖が存在するが、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、シミュレーションを行うこととした。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 0.08 という値を与え⁶⁾、他の係数の値に関しては 3.(2) で用いたものと同じである。

(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-8 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スピードよりも遅くなっている。それらを踏まえた上でも、図-8 (右図) 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。しかし機械の計算速度の都合上、図-2 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-8 の計算結果が正確な乾燥化の進行結果を示したとは言い難いが、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。

5. 考察

局地的、および全体的な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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 河村三郎: "土砂水理学 1", 森北出版, pp.271-272
- 5) 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, pp.38
- 6) "水理公式集", 土木学会, pp.89(d)

(2002. 4. 15 受付)

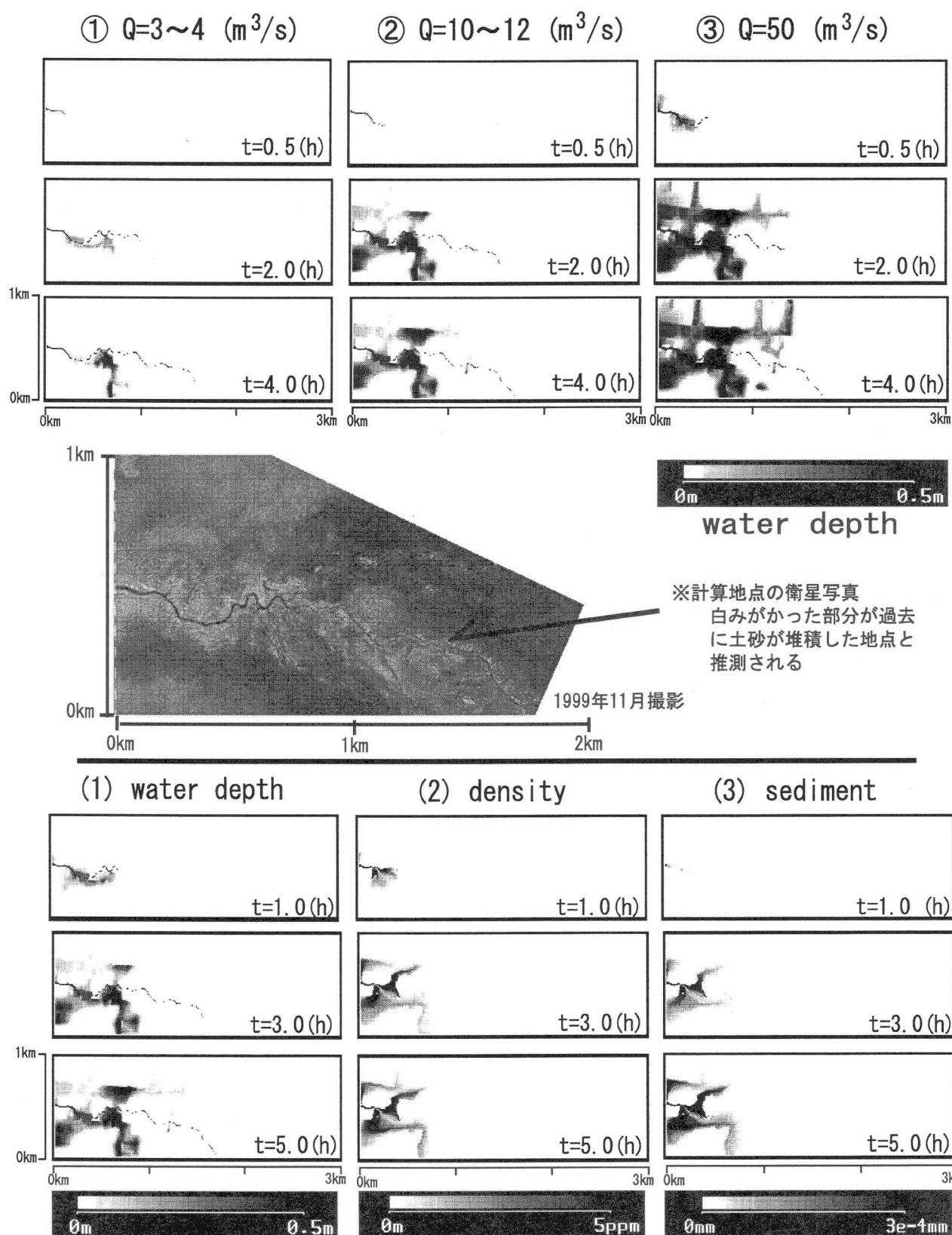
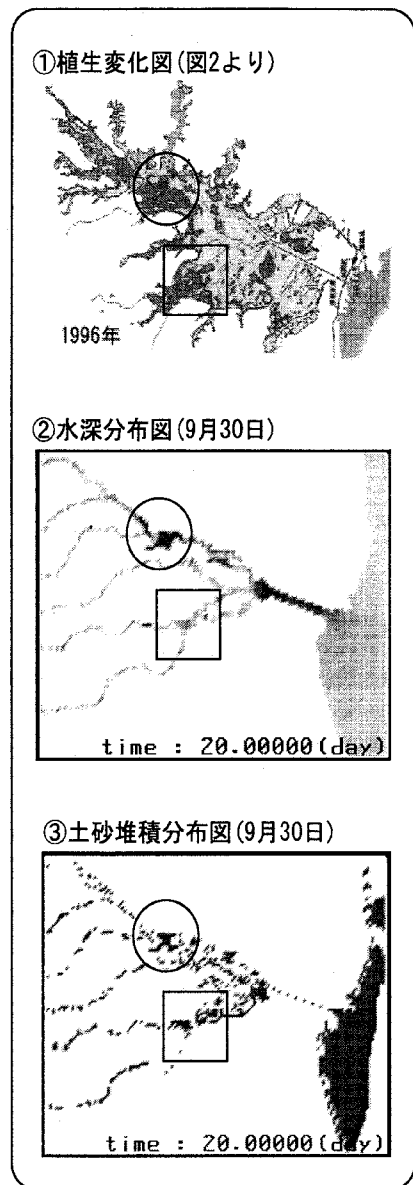
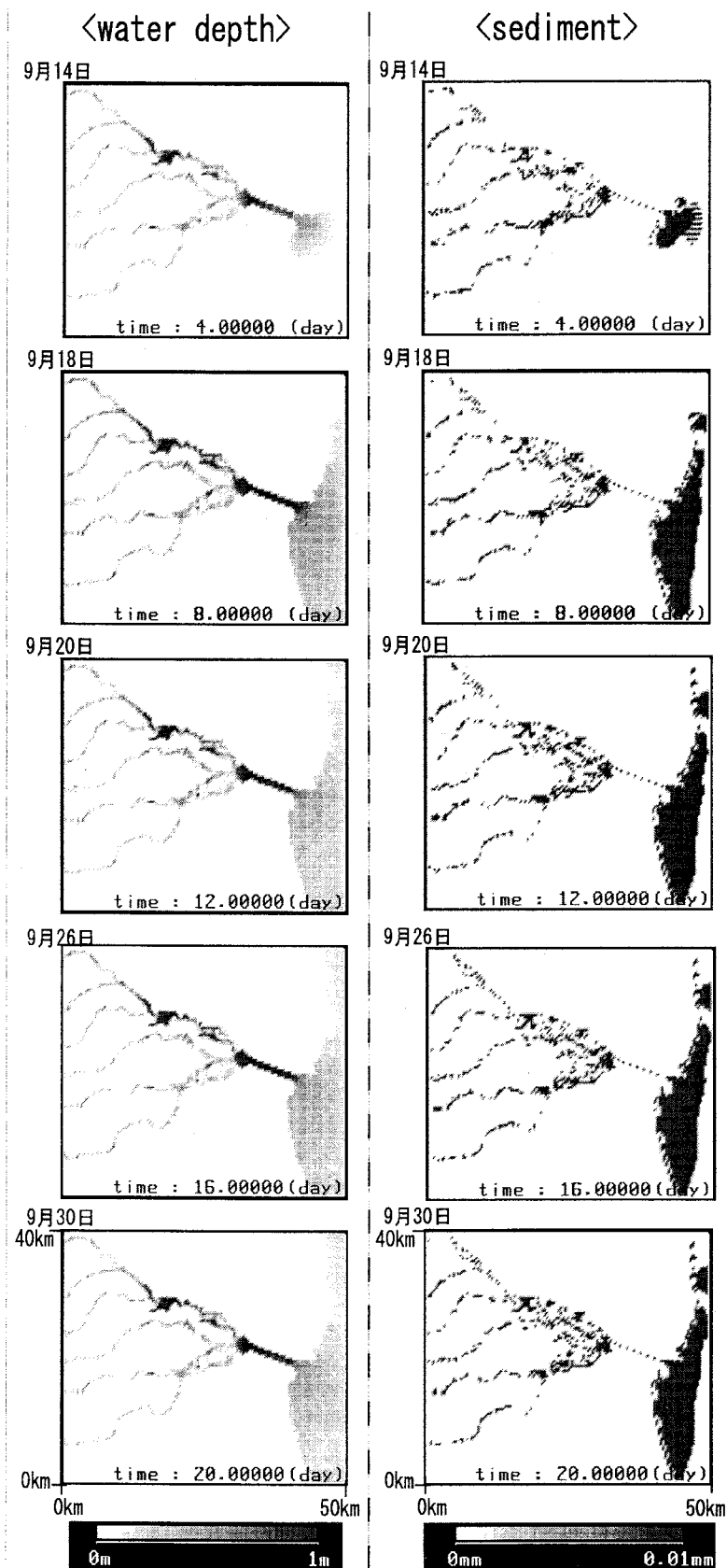


図 7: 久著呂川解析結果 (上: 流量による氾濫規模の違い, 下: 融雪期の氾濫, 土砂堆積の様子)



①～③図の比較

①～③図内において、それぞれ○□で示される範囲において、顕著な氾濫の発生地点、土砂堆積の多い地点、および植生変化の進行の早い地点のおおよその位置が合致している。

図 8: 1998 年 9 月の流量における湿原全体の氾濫の様子と浮遊砂堆積分布 (左図) と植生変化との比較 (右図)