

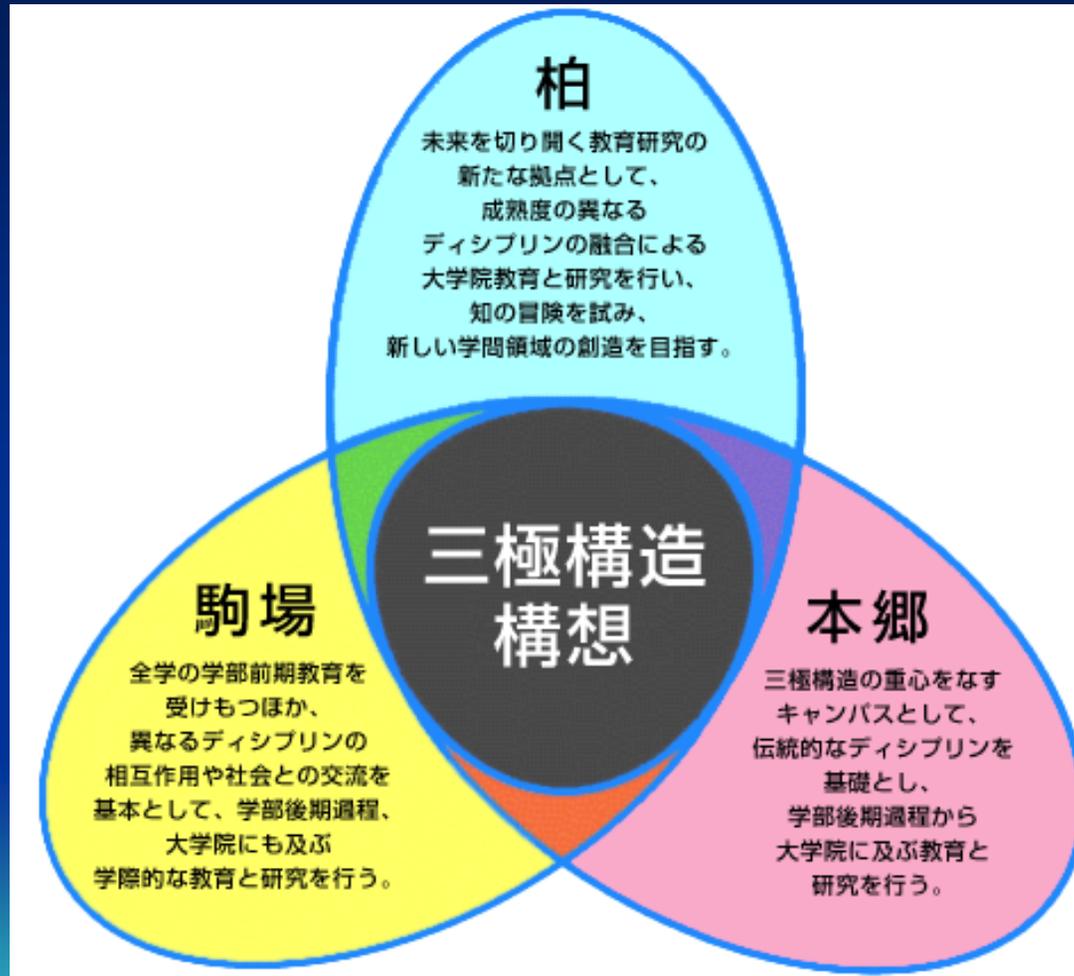
都市洪水氾濫シミュレーション と 湖沼富栄養化解析

黄 光偉

東京大学大学院新領域創成科学研究科
環境学専攻



新領域創成科学研究科の設立趣旨



日本の大学職歴

東京大学 → 金沢大学 → 新潟大学



過去には

- 差分スキーム高精度化
- 乱流モデル
- 都市熱環境解析
- ○ ○ ○



最近数年間の研究活動の全体像

理 念

健全な水環境の保全・創
人間と自然との調和

河川・湖沼の
環境解析と対

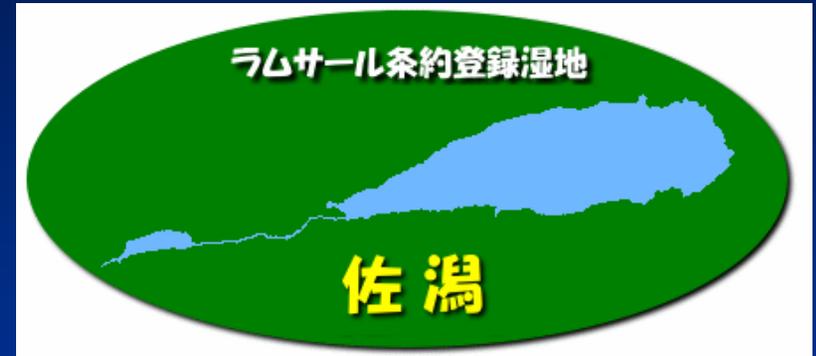
都市域における
洪水氾濫解析と対

キーワード：水環境、防災、数値解析、現地観測

具体的研究テーマ例

佐潟（ラムサール条約登録）環境問題に取り組んでおります。

- 富栄養化予測モデル構築
- 水位の適正管理
- 透明度改善策検討



風成流

- 水の動きは湖沼の水質に対し重大な結果をもたらす。
- 浅い湖では、湖水を動かす主要な原動力は風である。
- 水質改善策立案の過程において風成流解析を必要とする。



二次元湖流計算手法

- 湖流の水平循環流構造を再現するために鉛直方向に全水深にわたり積分したモデルを用いる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(h \cdot U)}{\partial x} + \frac{\partial(h \cdot V)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial U}{\partial y} - f \cdot V + g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{(h + \eta) \rho_w} = K_h \nabla^2 U$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial y} + f \cdot U + g \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{(h + \eta) \rho_w} = K_h \nabla^2 V$$

水面に作用する風によるせん断応力

$$\tau_{sx} = \rho_a C_d U_a \sqrt{U_a^2 + V_a^2}$$
$$\tau_{0y} = \rho_a C_d V_a \sqrt{U_a^2 + V_a^2}$$

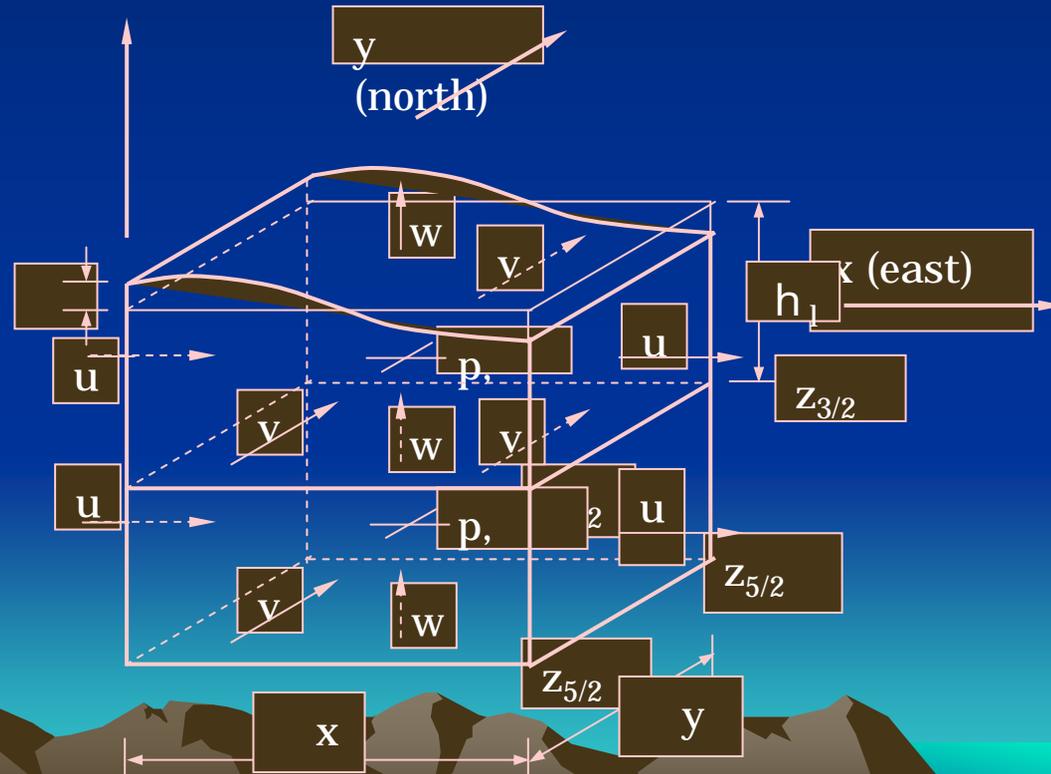
$$C_D = (A + BU_{10}) \times 10^{-3}$$

底面摩擦力

$$\tau_{0x} = \frac{\rho g}{C^2} U \sqrt{U^2 + V^2}$$
$$\tau_{0y} = \frac{\rho g}{C^2} V \sqrt{U^2 + V^2}$$

三次元湖流計算手法

多層モデルを用いる



$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + (w \cdot u)_{k-\frac{1}{2}} - (w \cdot u)_{k+\frac{1}{2}} - fv \\ &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{1}{h_k} \left(\tau_{k-\frac{1}{2}}^x - \tau_{k+\frac{1}{2}}^x \right) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + (w \cdot v)_{k-\frac{1}{2}} - (w \cdot v)_{k+\frac{1}{2}} + fu \\ &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_h \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{1}{h_k} \left(\tau_{k+\frac{1}{2}}^y - \tau_{k-\frac{1}{2}}^y \right) \right) \end{aligned}$$

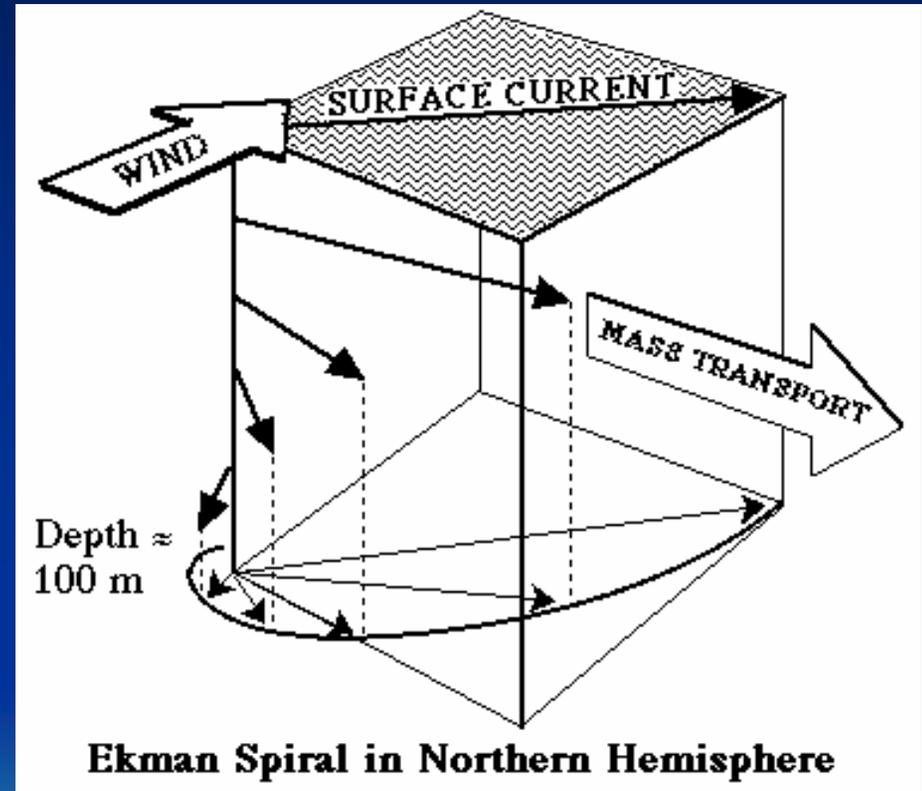
$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sum_{l=1}^b \left\{ \frac{\partial(h_l \cdot u_l)}{\partial x} + \frac{\partial(h_l \cdot v_l)}{\partial y} \right\} = 0$$

$$w_{k-\frac{1}{2}} = - \sum_{l=k}^b \left\{ \frac{\partial(h_l \cdot u_l)}{\partial x} + \frac{\partial(h_l \cdot v_l)}{\partial y} \right\}$$

$$\tau_{k-\frac{1}{2}} = \rho \cdot \gamma^2 \cdot (u_k - u_{k-1}) \cdot \sqrt{(u_k - u_{k-1})^2 + (v_k - v_{k-1})^2}$$

湖流特徴

- 大きな湖沼では、表層流は地球回転の影響により風の方角に対して 45° の角度で流れる。表面下の水流は表面からの深さが大きくなればなるほど、風の方角に対してだんだん大きな角度で流れる。最深部で、風と反対の方角に流れる。このらせん状の水流はエクマン・スパイルと呼ばれる。

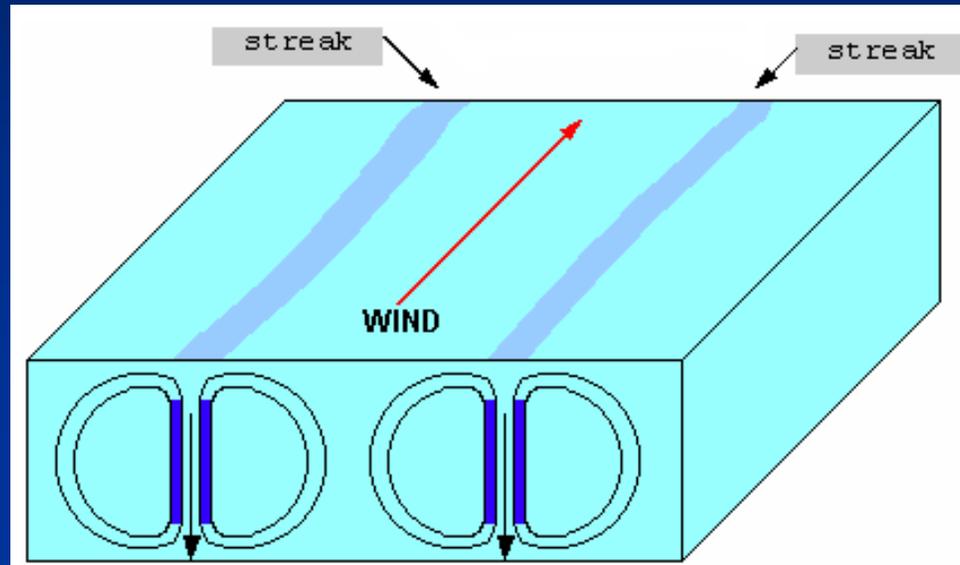


Rossby number $R_0 = U / fL \gg 1$

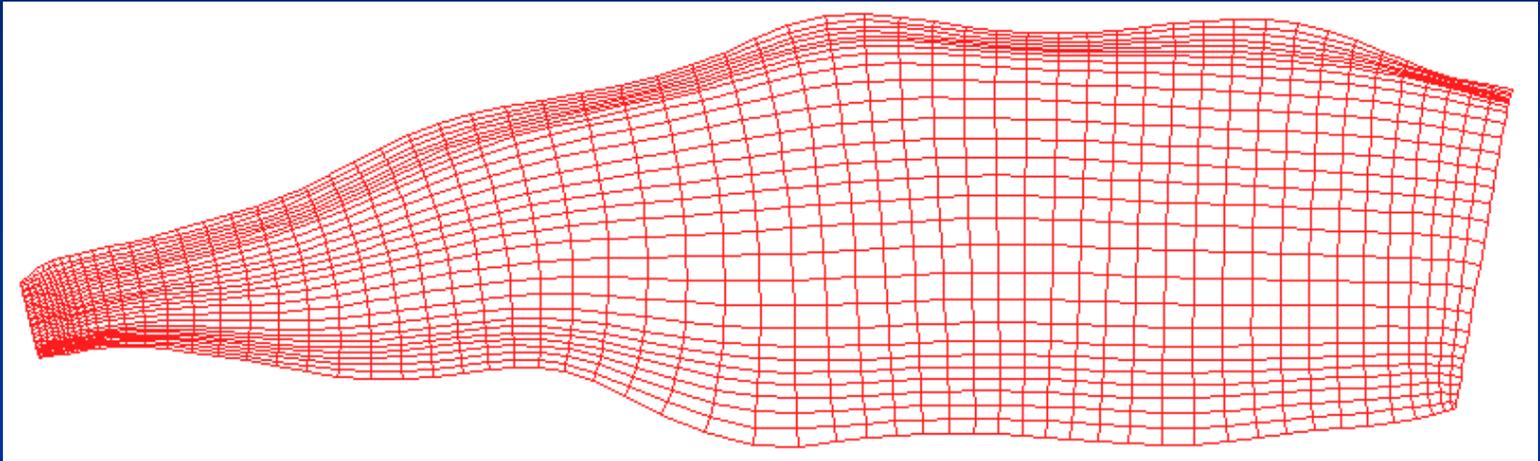
- コリオリの効果が無視できる際、流れは表層で順流（風と同じ方向）、低層で逆流になる。
- 風の吹送方向に直角方向に水深変化が存在する場合には、浅い領域で順流、深い領域で逆流の水平循環流が生じる。
- 風向、風速の急変により、セイシュが生じる。



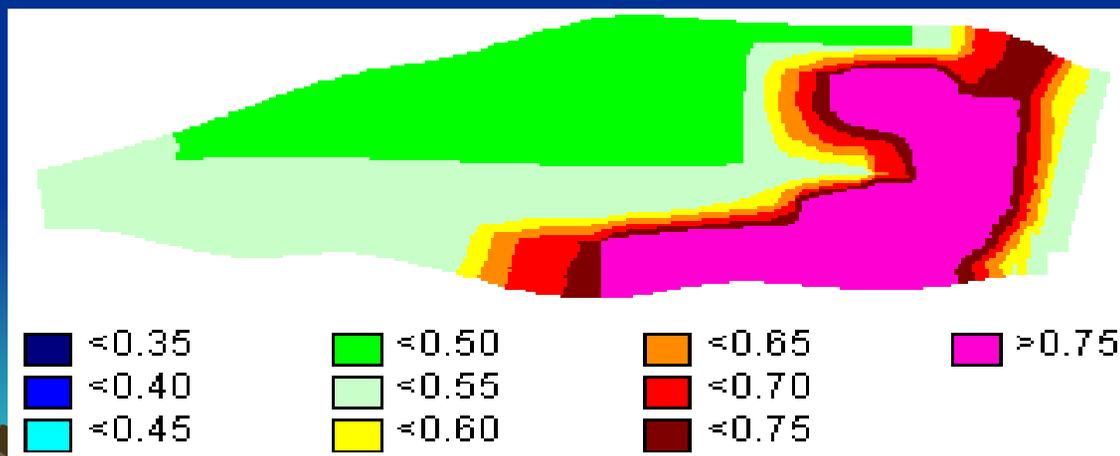
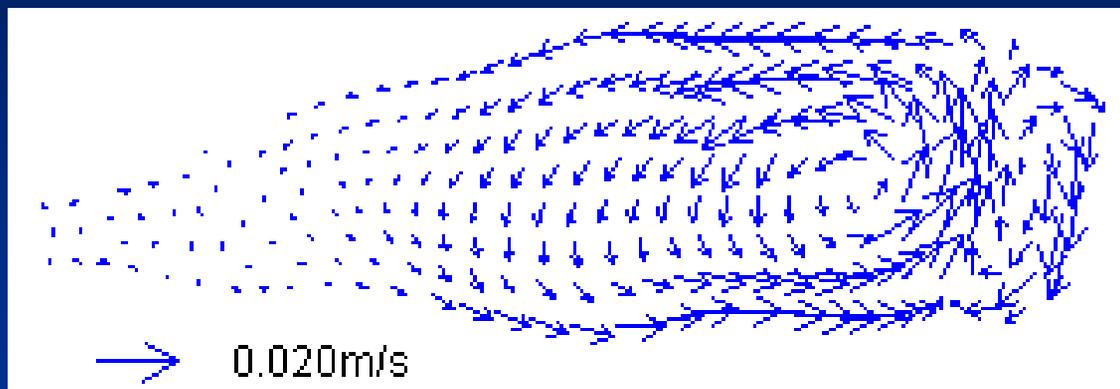
また、風の吹送方向に回転軸を持つ
ラングミュア・スパイラル流がある。

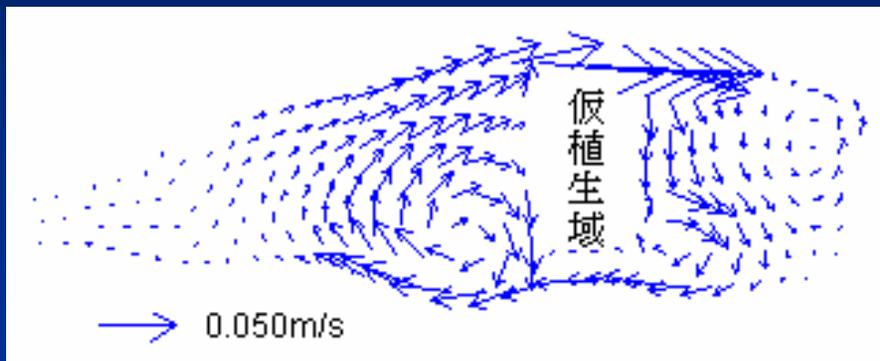


佐潟の流動解析



北風5m/sが吹く場合





5m/s の南東風

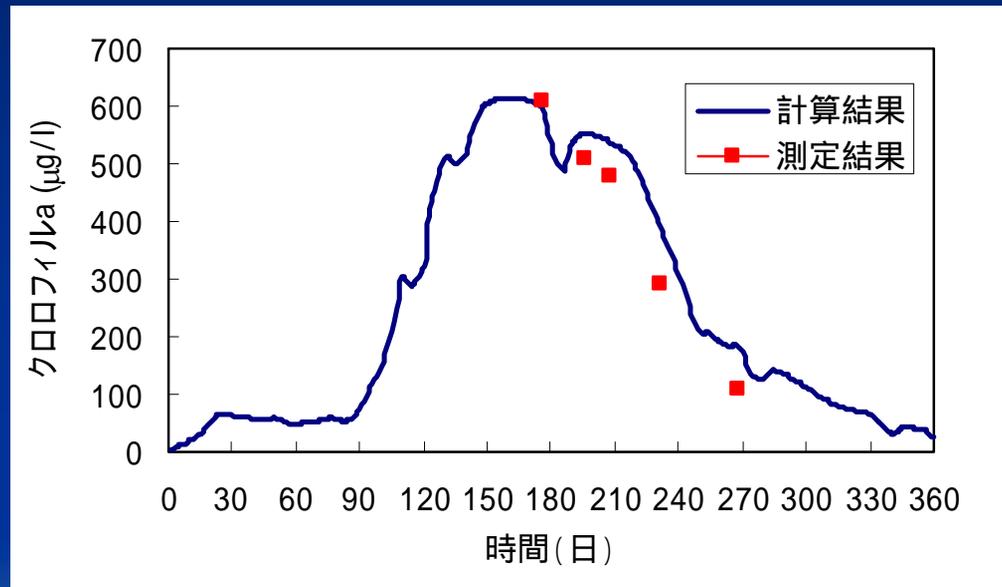
改良が必要

十分に解明されていない課題

- 非定常性が強い場合の計算
- 水面上の風の分布
- 植生の影響
- 〇 〇 〇



開発した佐潟富栄養化予測 モデルによる再現計算



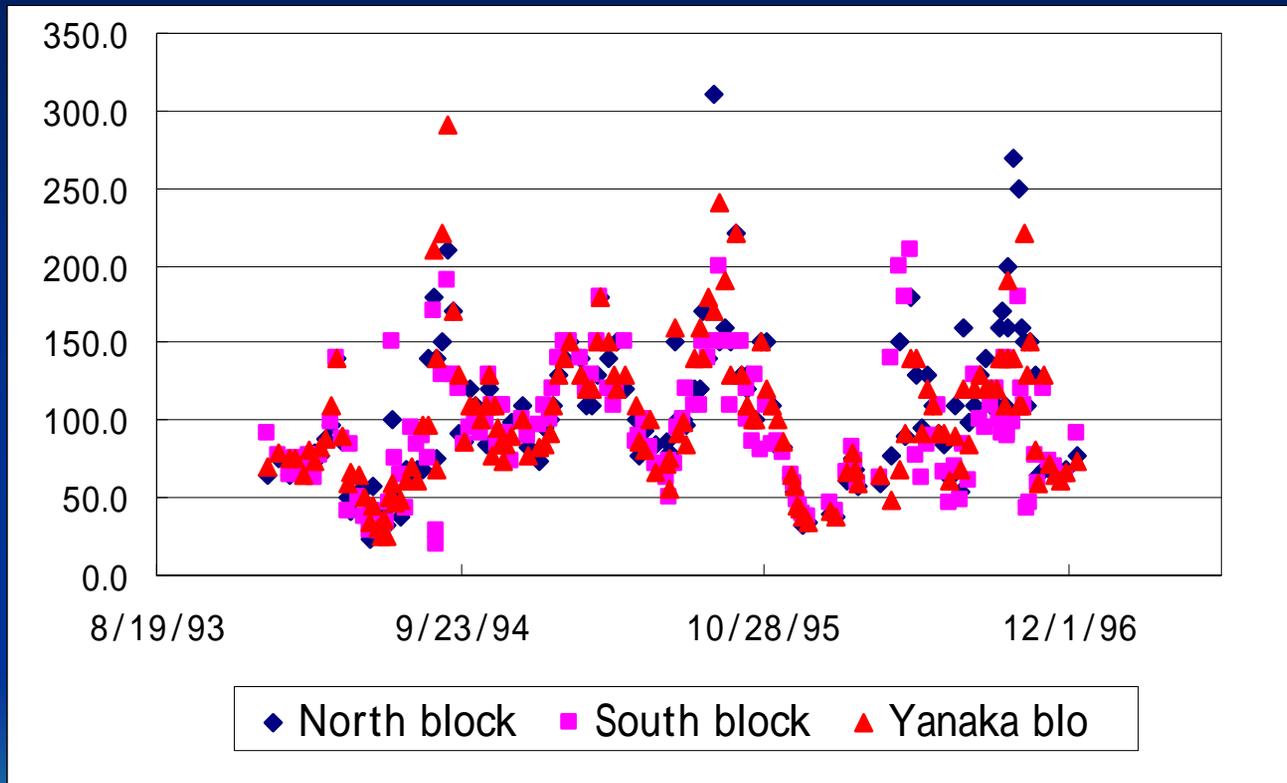
2004年におけるクロロフィルaのシミュレーション結果

谷中湖(渡良瀬貯水池)の流れ解析

- 利根川中流部、ハート型人工湖沼
- 南・北・谷中の三つのブロックに分かれている
- 水面面積：約4.5km²
- 総貯水量：26,400,000m³
- 水深 3~8m
- 目的：
 - 洪水調節
 - 都市用水
 - 下流河川へ維持流量の提供



谷中湖の現状



Chlorophyll 濃度、ピーク250 $\mu\text{g/l}$ (春、秋)

カビ臭発生、クロロフィルaのピーク概ね同時期

谷中湖の3次元湖流モデル

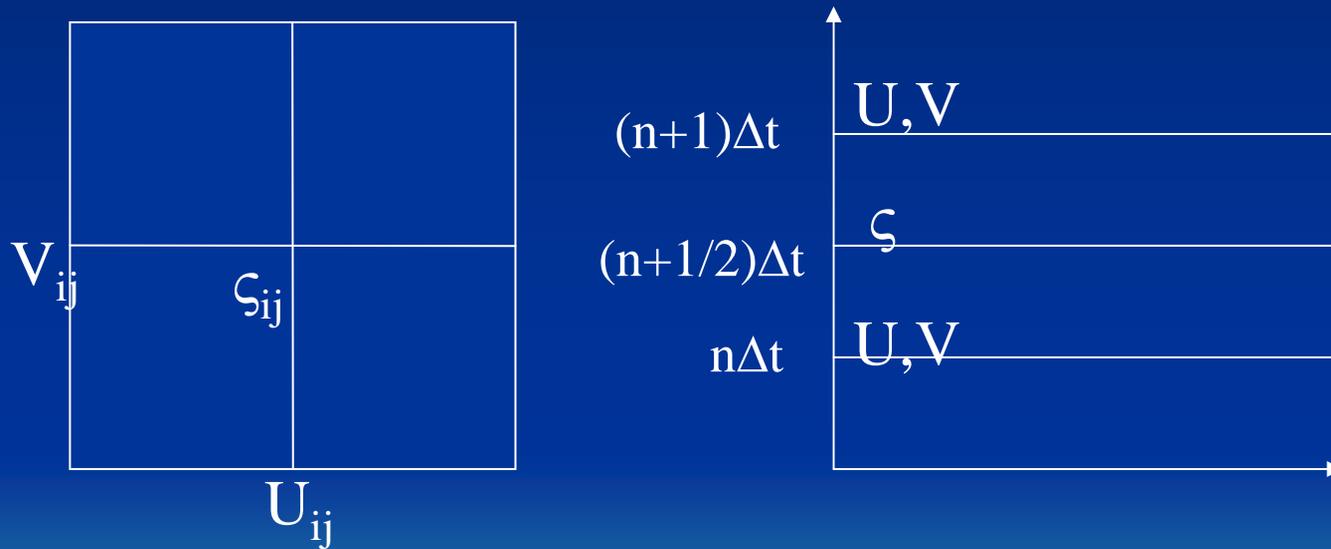
- 境界適合座標
- 乱流 k - ε モデルにより、鉛直渦粘性を計算する。
- *Smagorinsky*式により、水平渦粘性を計算する。
- 高精度差分スキーム

Boundary Condition

- Land boundary:
 - Normal velocity=0 (slip condition)
- Open boundary:
 - non-reflecting condition
 - weakly reflecting condition

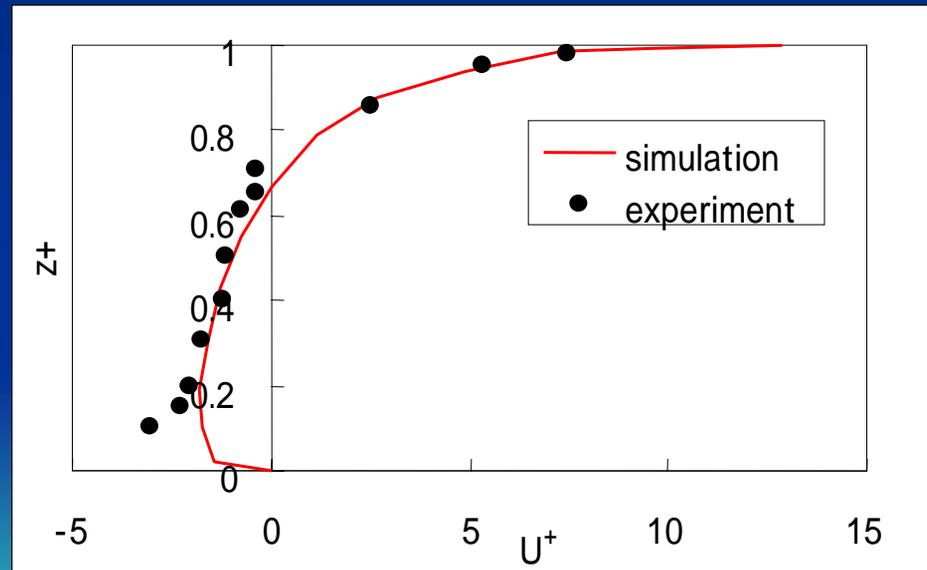


Space and Time Staggered Grid



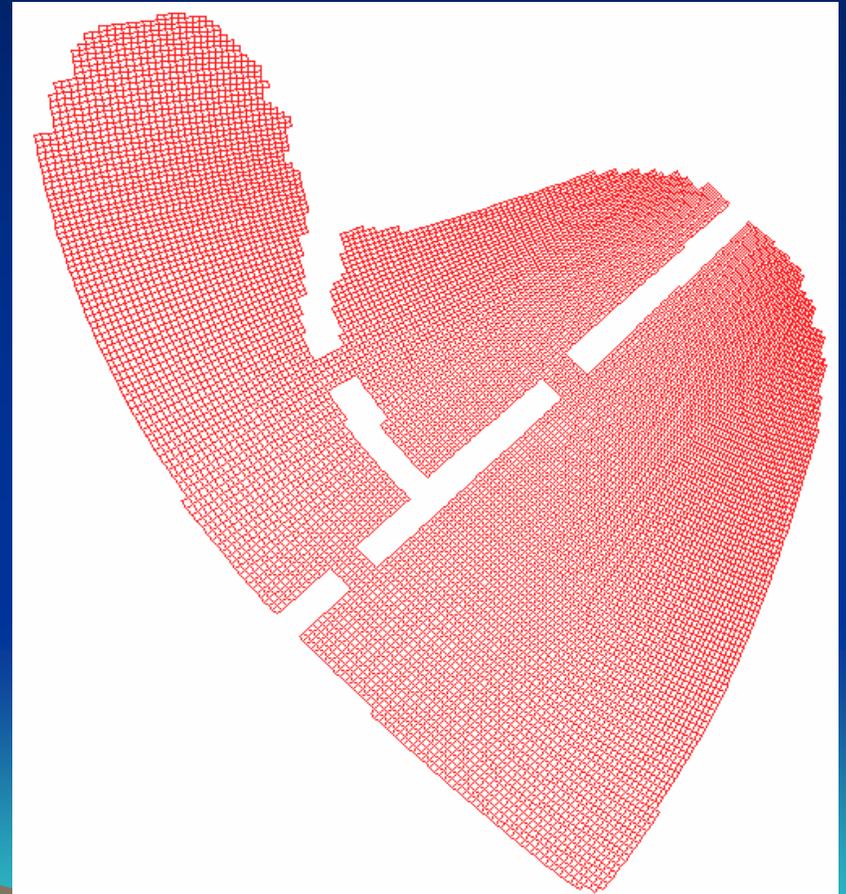
モデル検証 1

- wind-induced flow in a closed basin

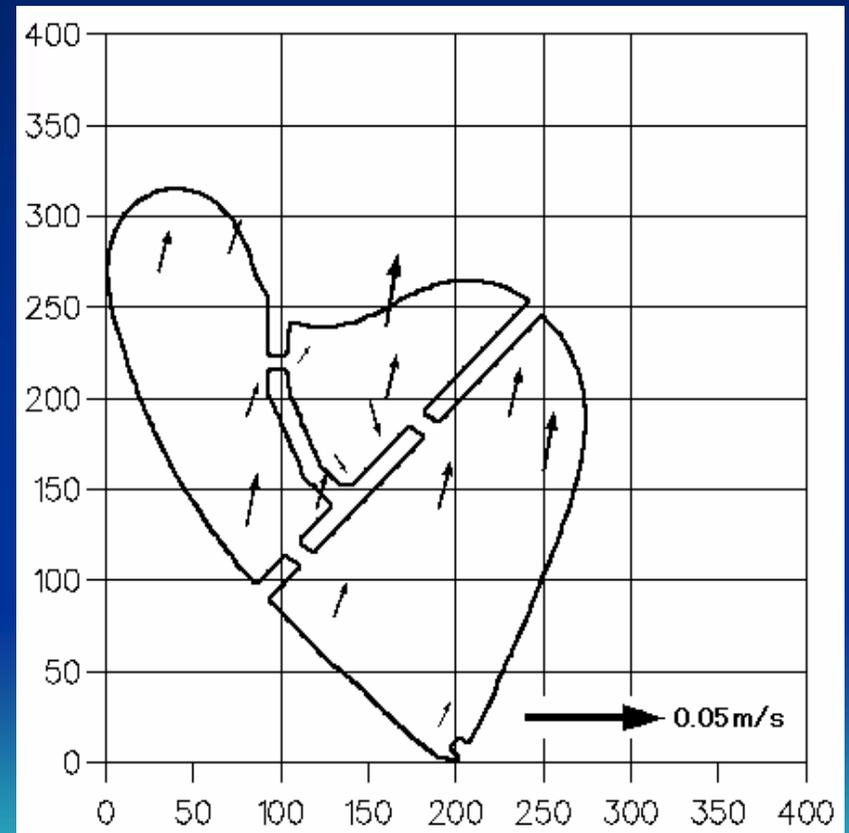
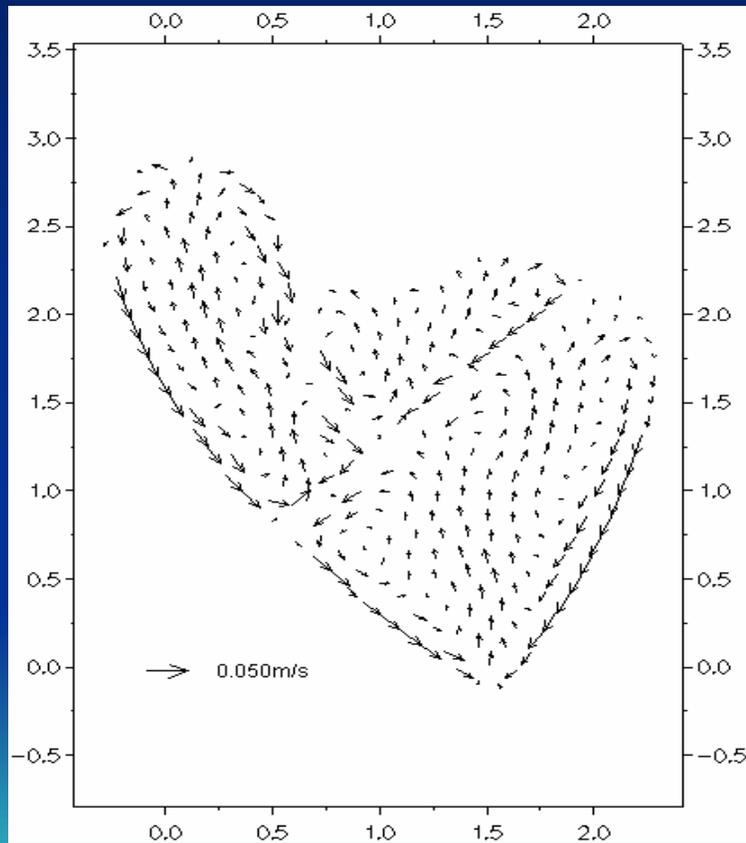


Computational grid

- The horizontal grid spacing ranges from 10m to 24m, and the aspect ratio is around 1.1 in most part of the lake
- The vertical resolution is accomplished by dividing the depth into 10 layers



下層流れパターン



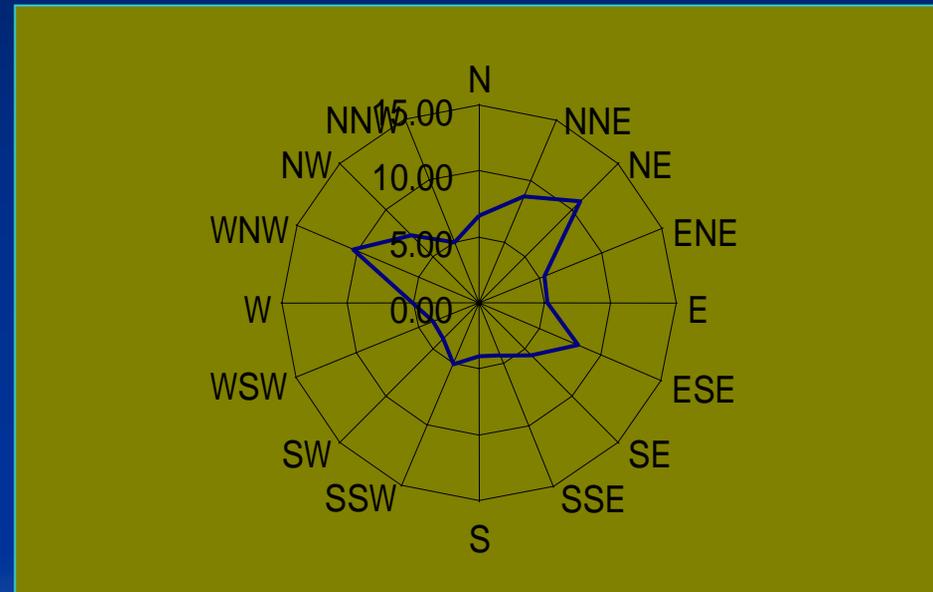
Wind conditions

- Three predominant wind directions

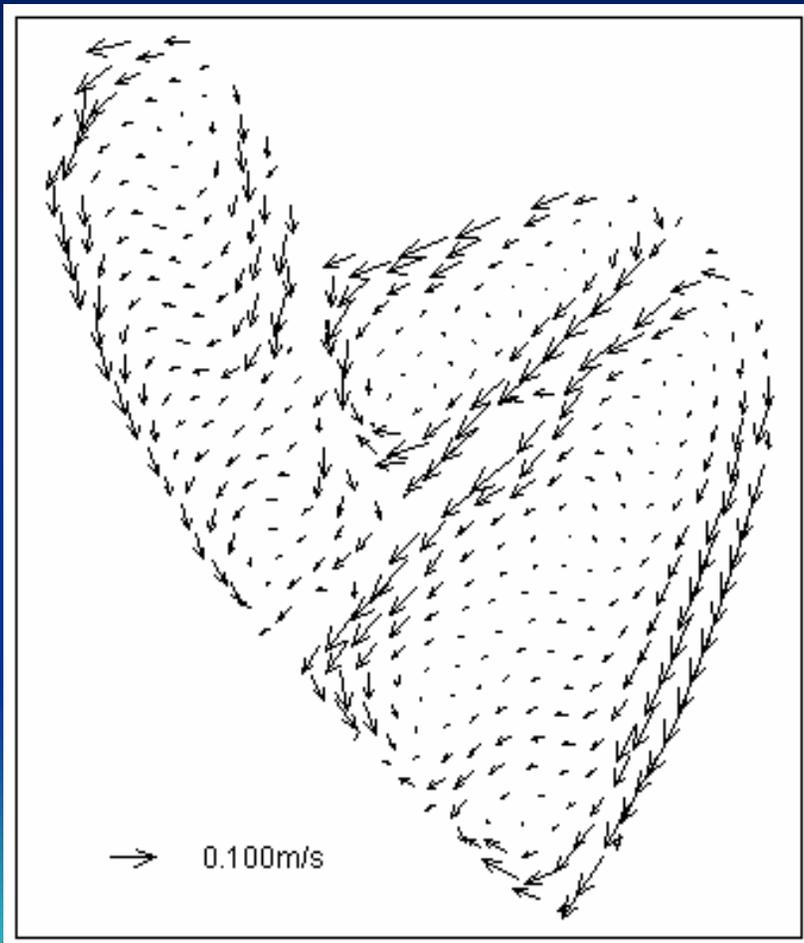
WNW

NE

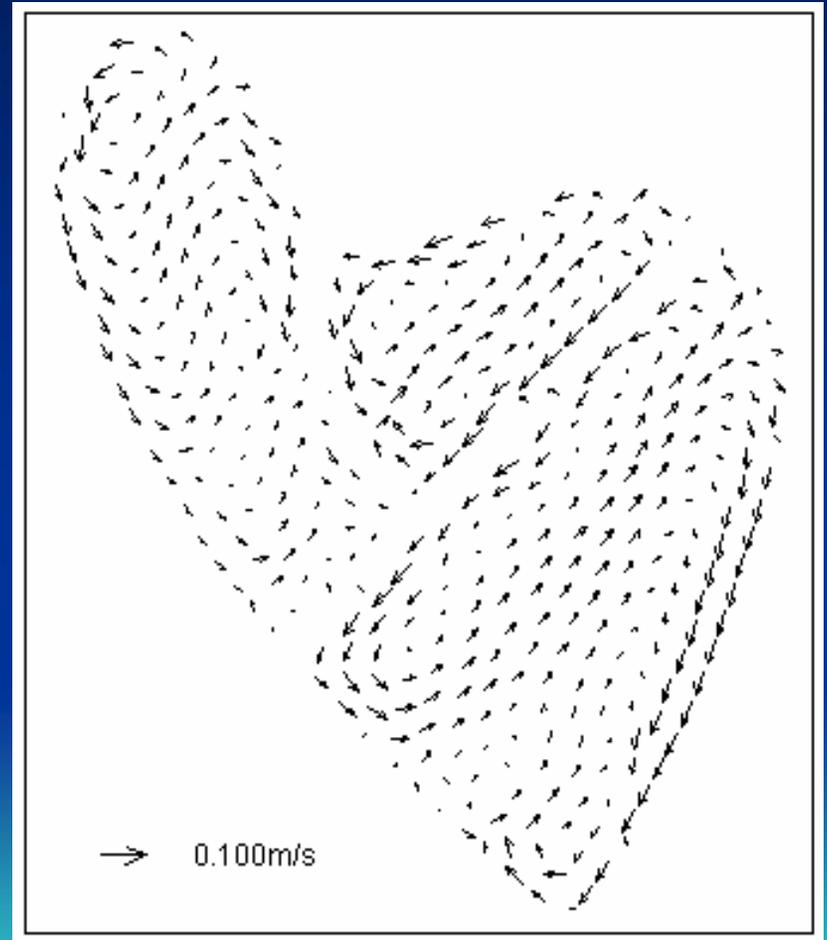
ESE



Lake's response to NE wind of 5m/s



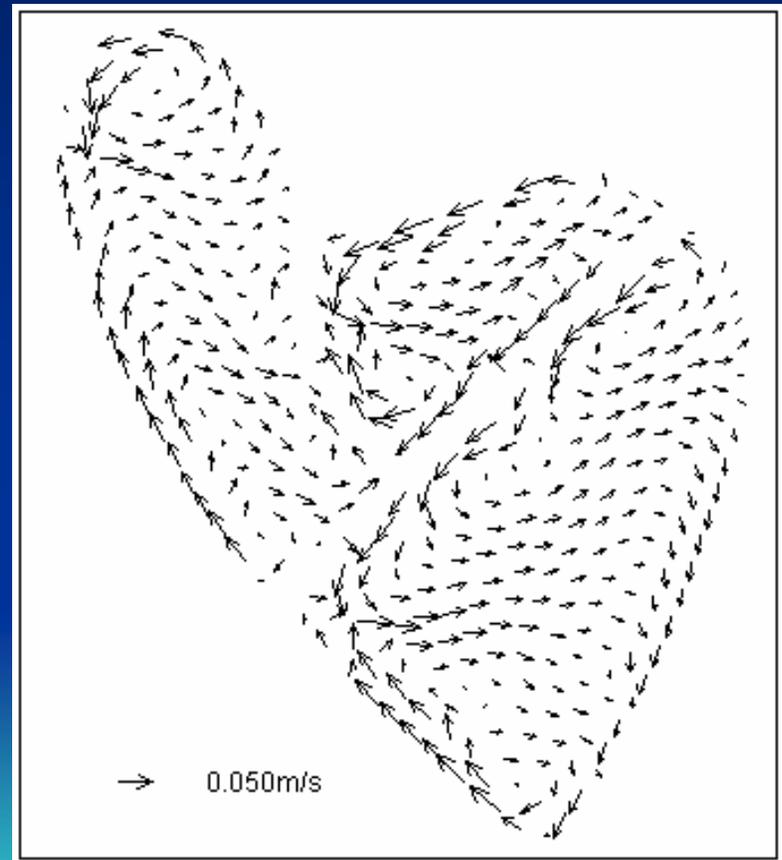
表層



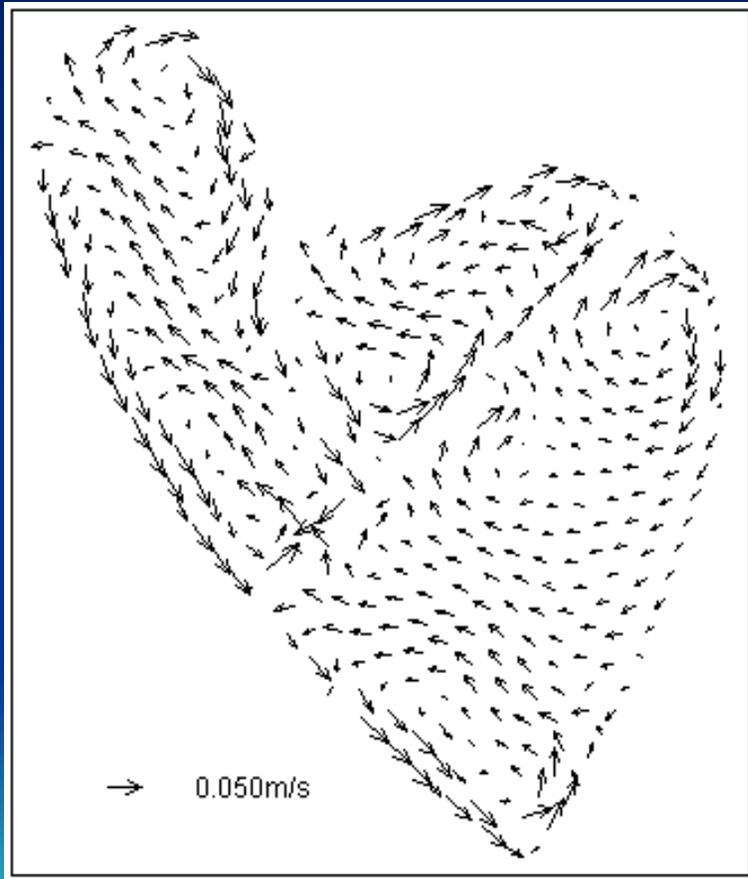
下層

Lake's response to E wind of 5m/s

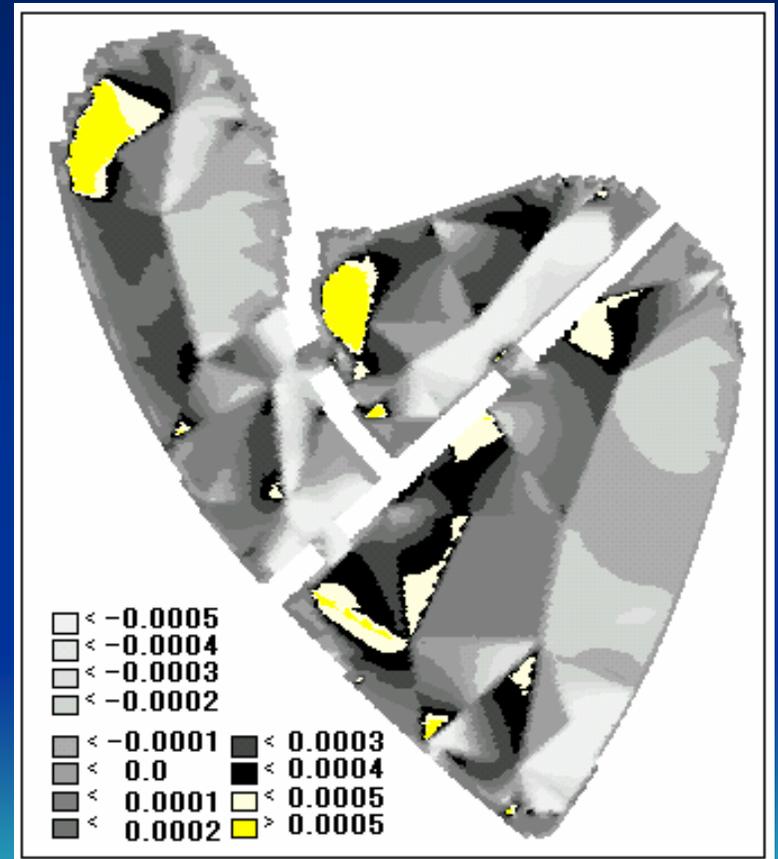
- Two horizontal underwater swirls in the South Block
- In the North Block, two eddies are more or less the same in size
- In the Yanaka Block, a big eddy with a length scale of the block size and a small corner eddy



Flow in the bottom layer under a WNW wind



水平成分



鉛直成分

溶存酸素の対策

- 近年谷中湖では富栄養化による水質悪化の問題が発生
- 循環流動促進による底層への溶存酸素(Dissolved Oxygen : DO)供給事業、しかし...



- 底層のDO濃度改善にとってマイナスの効果となる底泥酸素消費速度(Sediment Oxygen Demand : SOD)が正確に評価されていない



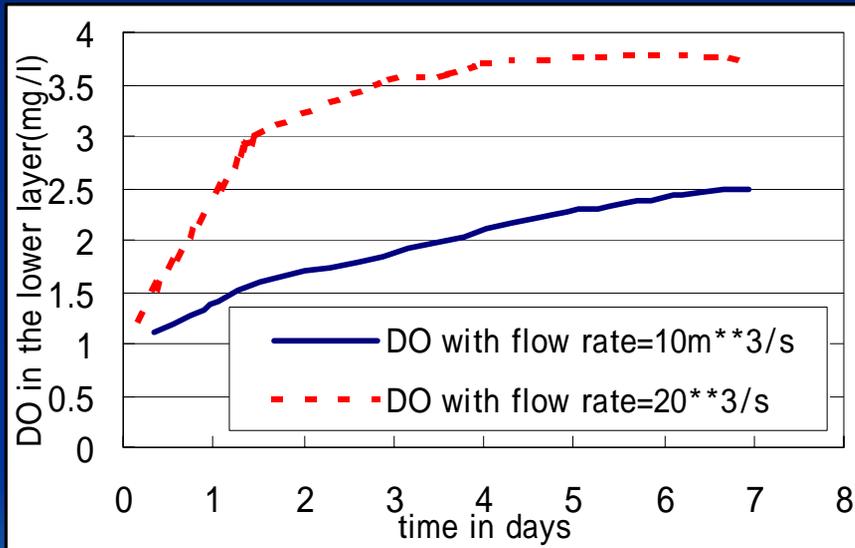
溶存酸素の支配方程式

$$\begin{aligned}
 \frac{DDO}{Dt} = & \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AK_h \frac{\partial DO}{\partial x} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial y} \left(AK_h \frac{\partial DO}{\partial y} \right) + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} \left(AK_z \frac{\partial DO}{\partial z} \right) \\
 & + k_r (S - DO) - k_d \theta^{T-20} \left(\frac{DO}{k_{BOD} + DO} \right) BOD - \frac{64}{14} k_{12} \theta^{T-20} \left(\frac{DO}{K_{NIT} + DO} \right) \\
 & - \frac{SOD}{H} \theta^{T-20} + G_{P1} \left(\frac{32}{12} + \frac{48}{14} \frac{14}{12} (1 - P_{NH3}) \right) PHYT - \frac{32}{12} k_{1R} \theta^{T-20} PHYT
 \end{aligned}$$

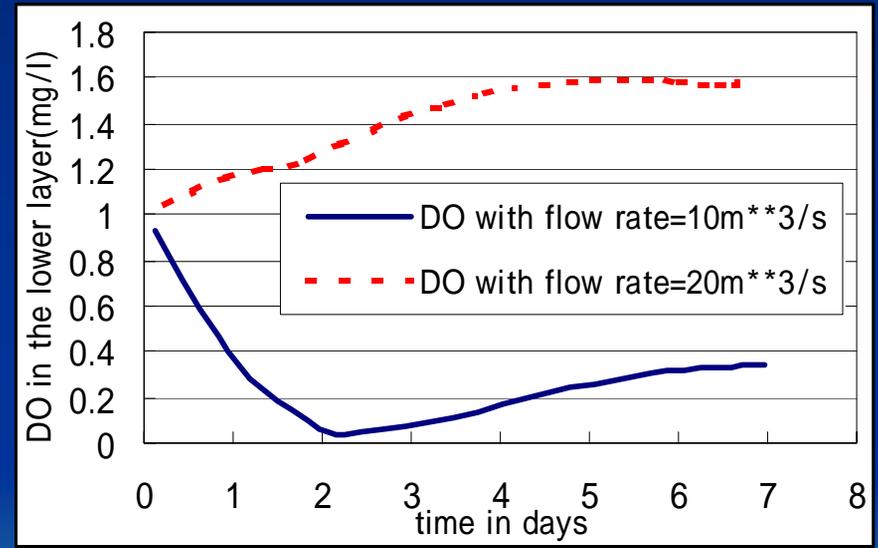
時間変化 + 移流 = 拡散 + 再曝気 + 酸化 + 硝化 +

底泥の溶存酸素要求量 + 植物プランクトン成長 + 呼吸

下層における溶存酸素の改善状況



SOD=2.64



SOD=4.5

現在一般的に使用されている洪水氾濫数値解析手法

- **デカルト座標モデル**
 - 粗度係数は土地利用による
 - 建造物の敷地面積の割合（占有率）を考慮する
 - 家屋の付加抵抗を考慮する
- 街路ネットワークモデル
- **一般曲線座標モデル**
- **非構造格子モデル**

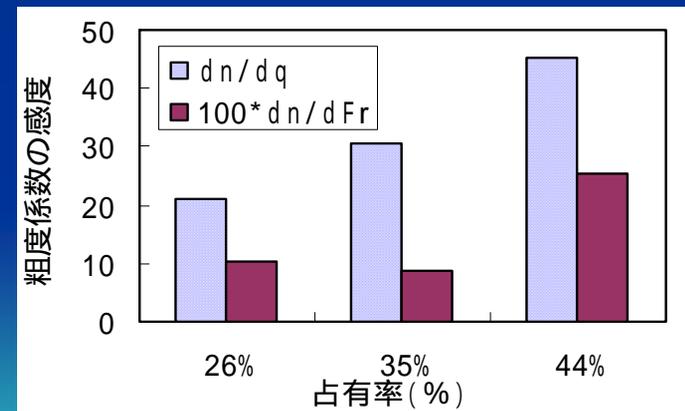
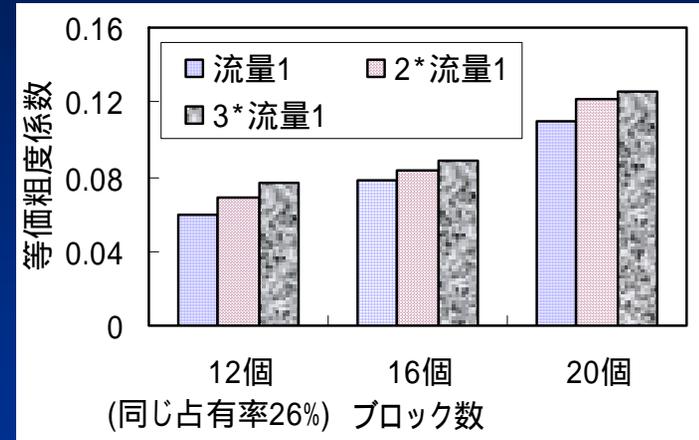
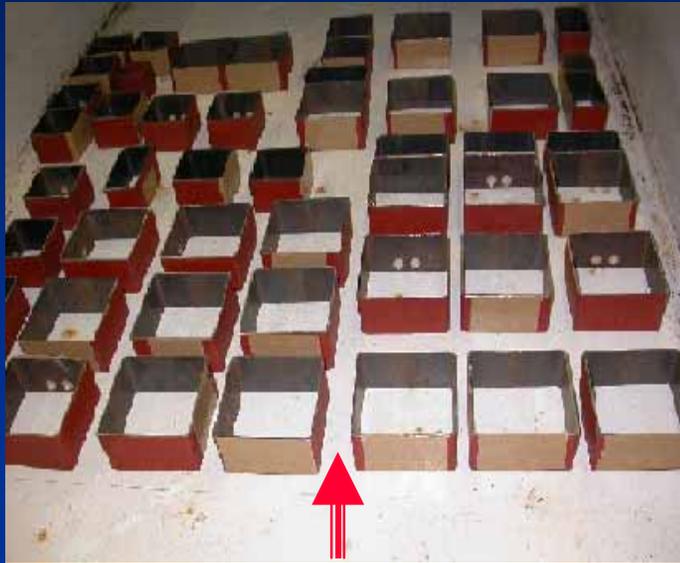


一般曲線座標と非構造格子モデル

- 家屋などの構造物を適切に表現できる
- 高分解能の標高・土地利用データが不可欠
- 格子生成にかなりの時間と労力が必要
- 情報伝達には、デカルト座標が便利
- ハザードマップ更新には、デカルト座標が容易

デカルト座標モデルの改良
は実務的ニーズがある

氾濫実験

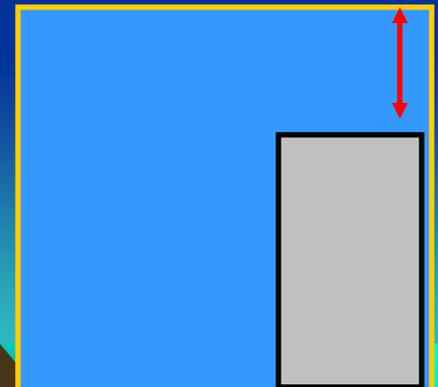


基礎方程式

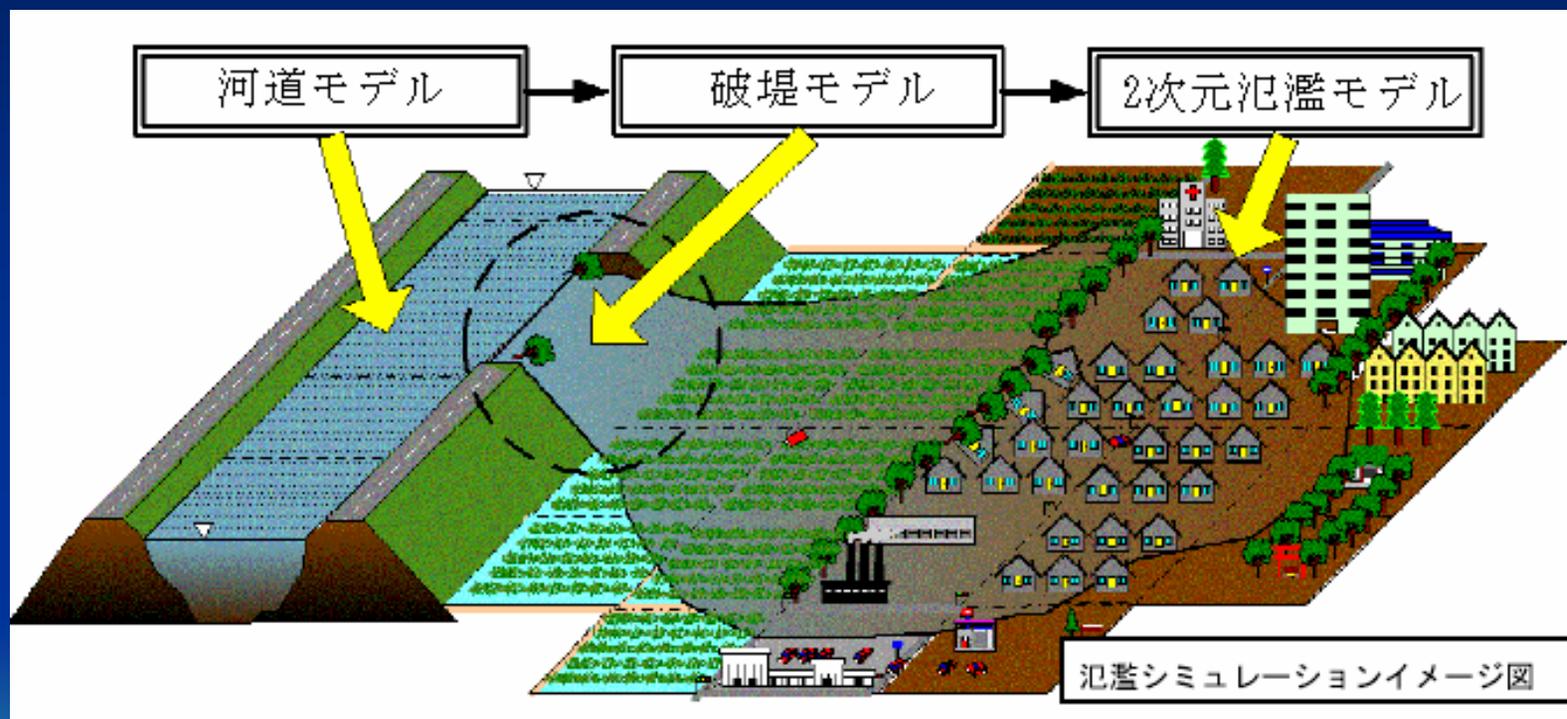
$$(1-\lambda)\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \beta M}{\partial x} + \frac{\partial \beta N}{\partial y} = 0$$

$$(1-\lambda)\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial \beta U M}{\partial x} + \frac{\partial \beta V M}{\partial y} =$$
$$-gh(1-\lambda)\frac{\partial(h+z)}{\partial x}$$
$$-(1-\lambda)\frac{gn^2 M \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{4/3}}$$

$$(1-\lambda)\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial \beta U N}{\partial x} + \frac{\partial \beta V N}{\partial y} =$$
$$-gh(1-\lambda)\frac{\partial(h+z)}{\partial y}$$
$$-(1-\lambda)\frac{gn^2 N \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{4/3}}$$



洪水氾濫数値解析



ケース・スタディ

- 新潟県三条市の氾濫

- 平成16年7月新潟・福島豪雨によって、五十嵐川が破堤し、水死者9名、床下・床上浸水、半壊併せて14,767棟などの激甚な被害が生じた。

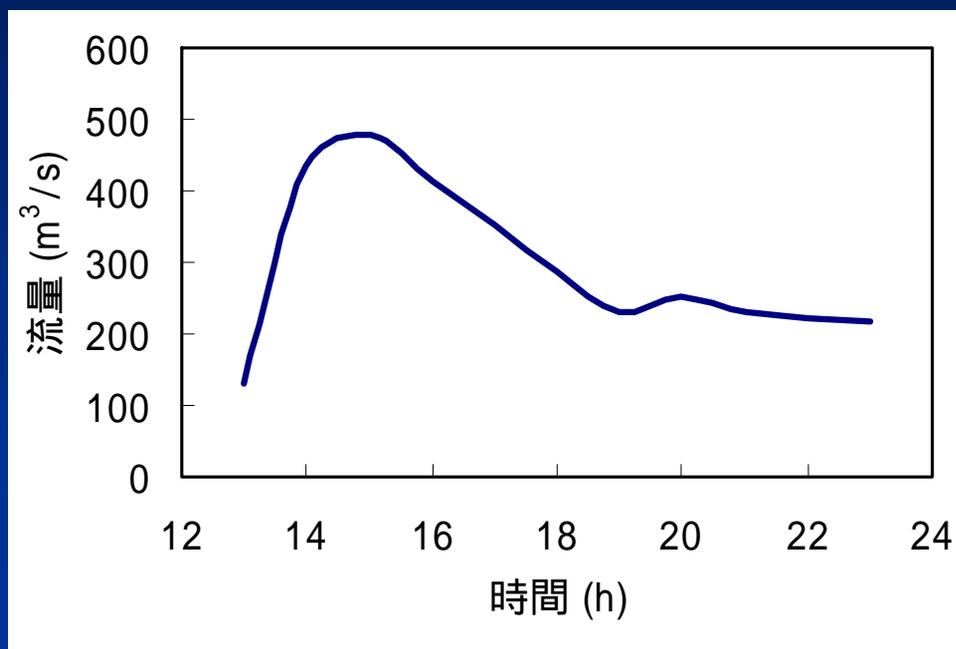




破堤地点

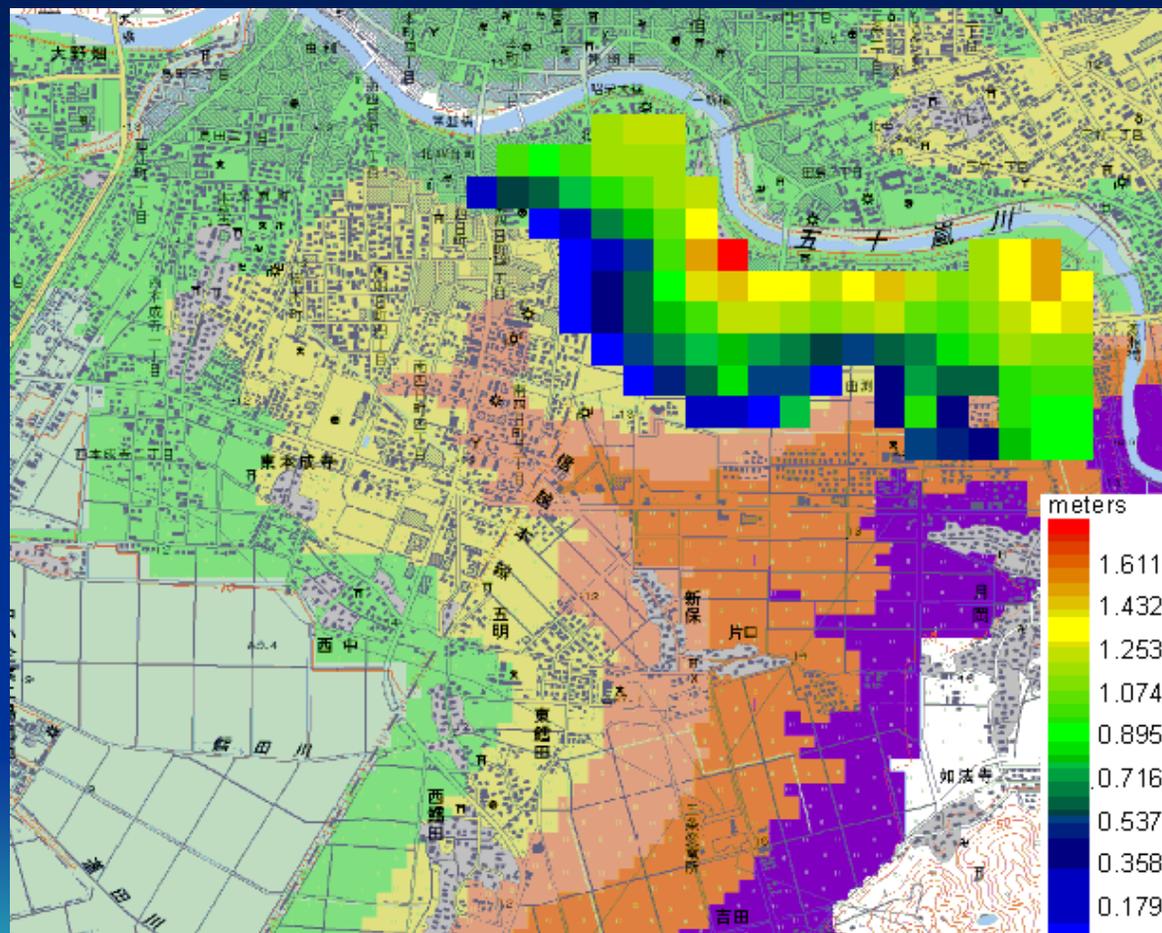
五十里堤

破堤流量ハイドログラフ

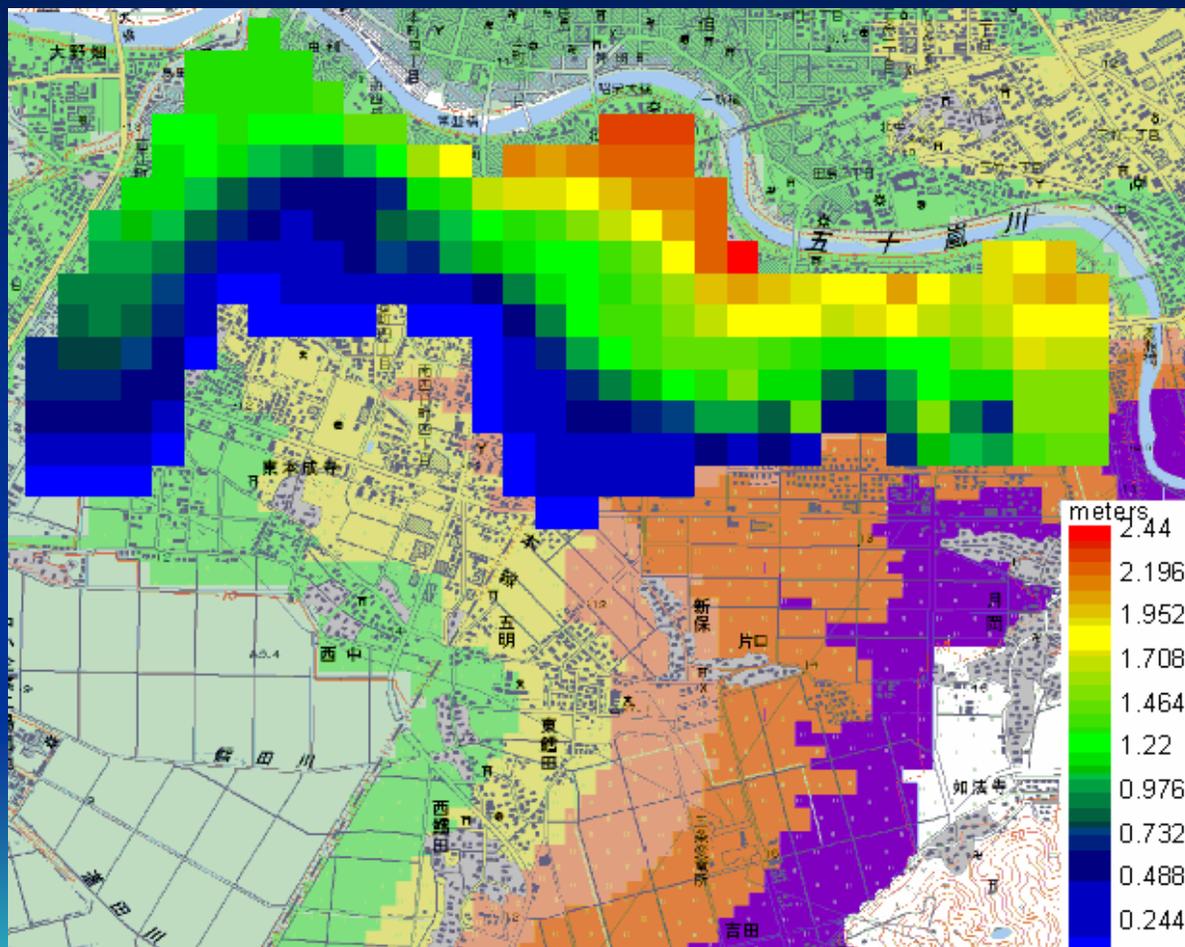


一次元河道モデルと実測水位との組み合わせにより推定した

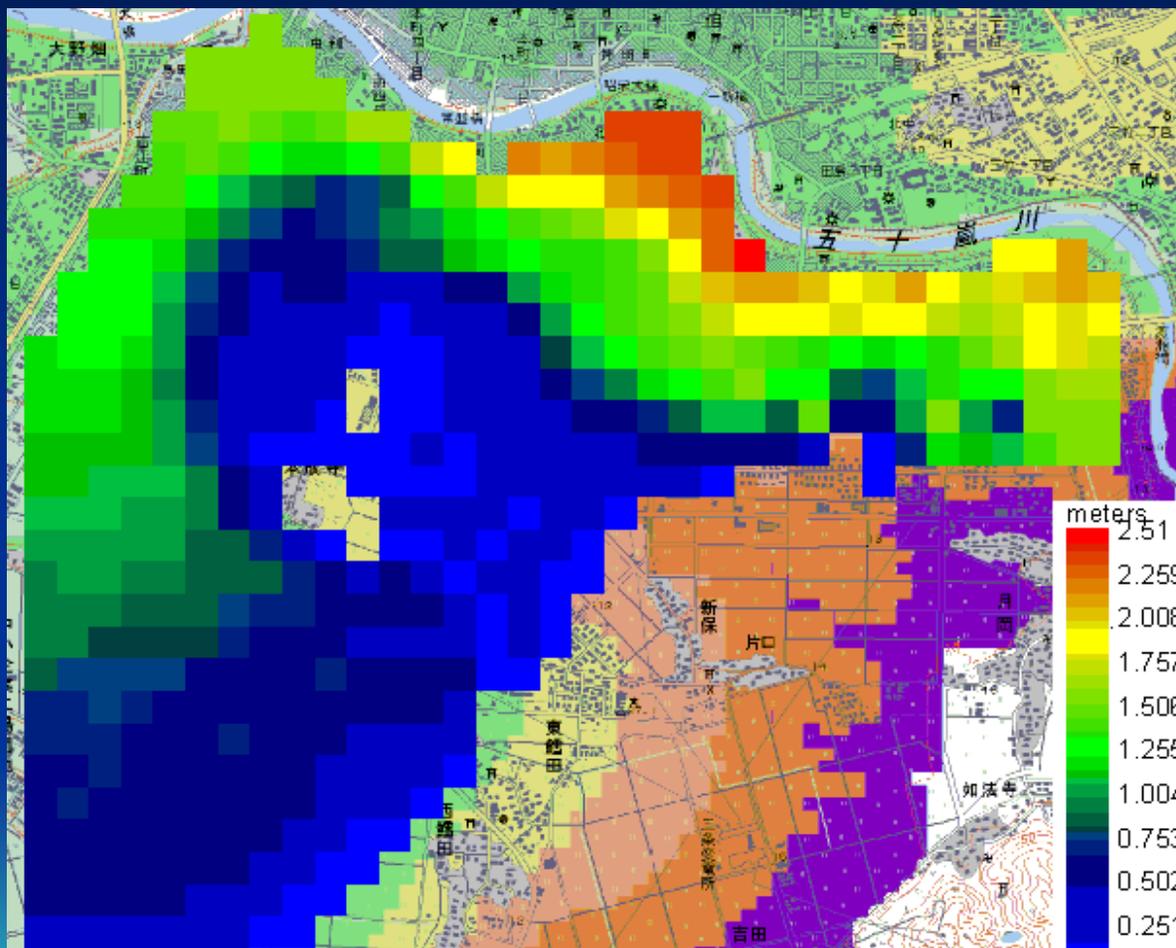
氾濫発生1時間後の浸水深



氾濫発生2時間後の浸水深



氾濫発生3時間後の浸水深



土木分野の流れ解析特徴

支配方程式に現場経験
が組み込まれている

現段階では

計算手法の改良よりもモ
デル定式化の改良が効
果的である(個人見解)

ご清聴ありがとうございます

