

B-1004

浅い閉鎖性水域の底質環境形成機構の解析と 底質制御技術の開発

研究課題代表者: 西村 修
(東北大学大学院工学研究科土木工学専攻)

平成22~24年度
予算額: 42,834千円

1

研究体制

サブテーマ (1) 総括・底質制御技術の開発
西村修(東北大学大学院工学研究科)

サブテーマ (2) 底質形成機構(水の流動と底質の
有機物含有率の関係)のモデリング
梅田信(東北大学大学院工学研究科)

サブテーマ (3) 底質環境の長期連続モニタリング
および底質環境形成機構の解析
野村宗弘(東北大学大学院工学研究科)

2

1. 研究の背景① 水環境保全上の課題

「今後の水環境保全の在り方について(取りまとめ)」平成23年3月

現状における課題

- 水質事故の増加
- 閉鎖性水域の水質改善の遅れ
- 河川流量の減少と水質及び土砂移動への支障
- 希薄な人と水とのふれあい
- 地下水・土壌の汚染
- 水圏生態系・生物多様性の劣化
- 海岸漂着物, 海洋ごみ, 海岸侵食等
- 気候変動による影響

原因究明

- 汚濁メカニズムの検討
- ・難分解性有機物・内部生産
 - ・N/P比と植物プランクトンとの関係
 - ・**底質環境**、底泥からの溶出・
 - ・面源等の汚濁負荷調査
 - ・汽水湖の汚濁メカニズム

水質保全対策の検討

- ・流域対策(面源対策・小規模事業場対策)
- ・**湖内対策**(沿岸生態系の保全、自然浄化機能の回復・活用、動植物の活用)
- ・湖沼とその流域の健全な水循環の在り方
- ・窒素・磷等の物質循環の把握と管理手法の確立

1. 研究の背景② 閉鎖性水域における底質の泥化・浅底化の問題



図 霞ヶ浦に対する負荷の内訳(国総研)

外部負荷と同等に大きな**内部負荷**

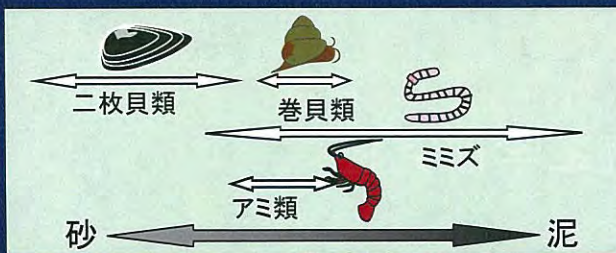


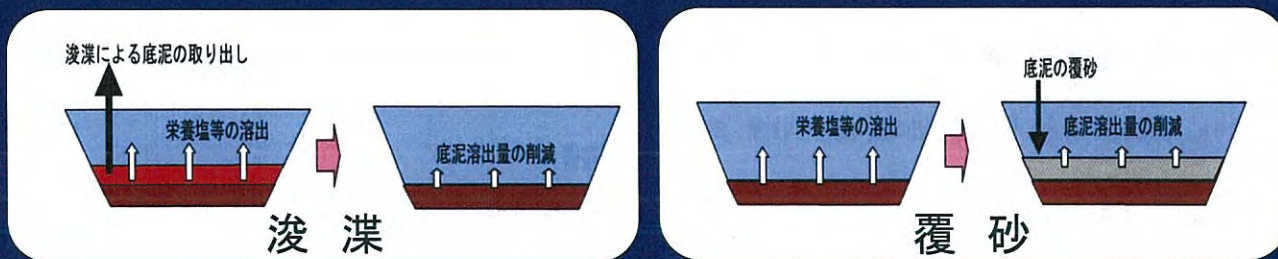
図 底質有機物含有量と底生動物の関係 (Takamura et al. 2009を基に作成)

泥化・浅底化により生物の生育・生息に大きな影響を及ぼす



閉鎖性水域の底質改善が必要

1. 研究の背景③ 底質浄化技術の現状と課題



代表的な底質浄化技術：浚渫，覆砂

その他，底泥酸化（曝気、酸化剤），生物的浄化（底生動物の導入）

- ・効果の持続性に課題（再堆積，再溶出の問題）
- ・底生生物への悪影響，土壌シードバンクの喪失，経済性に課題

対症療法であることの限界・副作用

5

2. 研究の目的

浅い閉鎖性水域の水質および生物多様性に大きな影響を及ぼす底質の改善のために

底質環境形成機構の解明

- ・どんな有機物が堆積するのか？

→ 堆積有機物の起源解析

- ・なぜ堆積するのか？

→ 水の流動と泥化の関係解析

泥化の原因をふまえた底質制御技術の提案

- ・岸辺の緩傾斜化
- ・人為的攪乱（巻き上げ・人工洪水）
- ・高等植物の植生管理

6

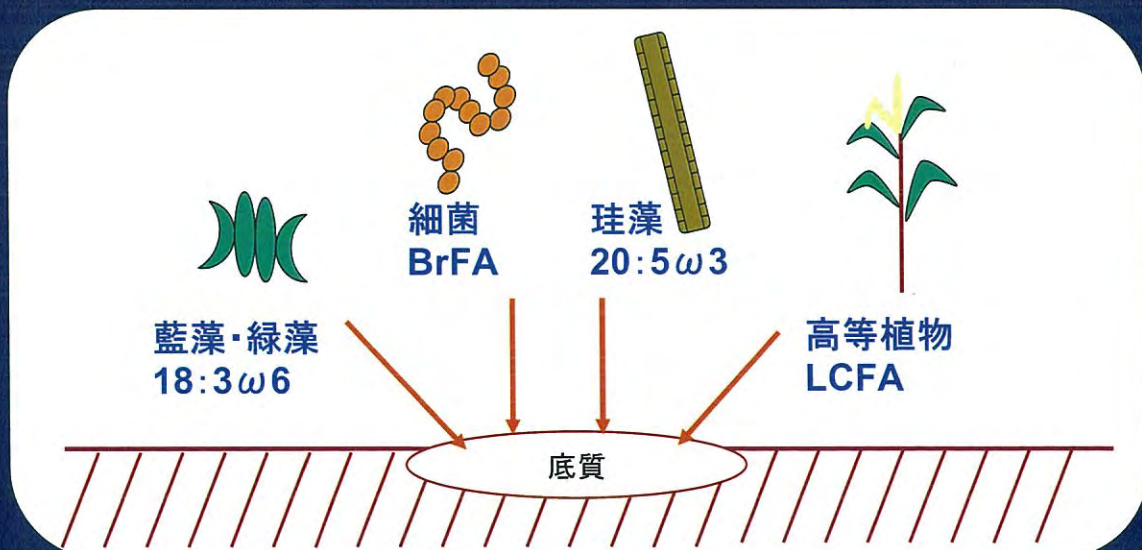
3. 本研究の主な成果①堆積有機物の起源解析

どんな有機物が底質を形成するのか？
→脂肪酸バイオマーカーを用いた
堆積有機物の起源解析

7

3. 本研究の主な成果①堆積有機物の起源解析

脂肪酸バイオマーカーによる起源解析の原理

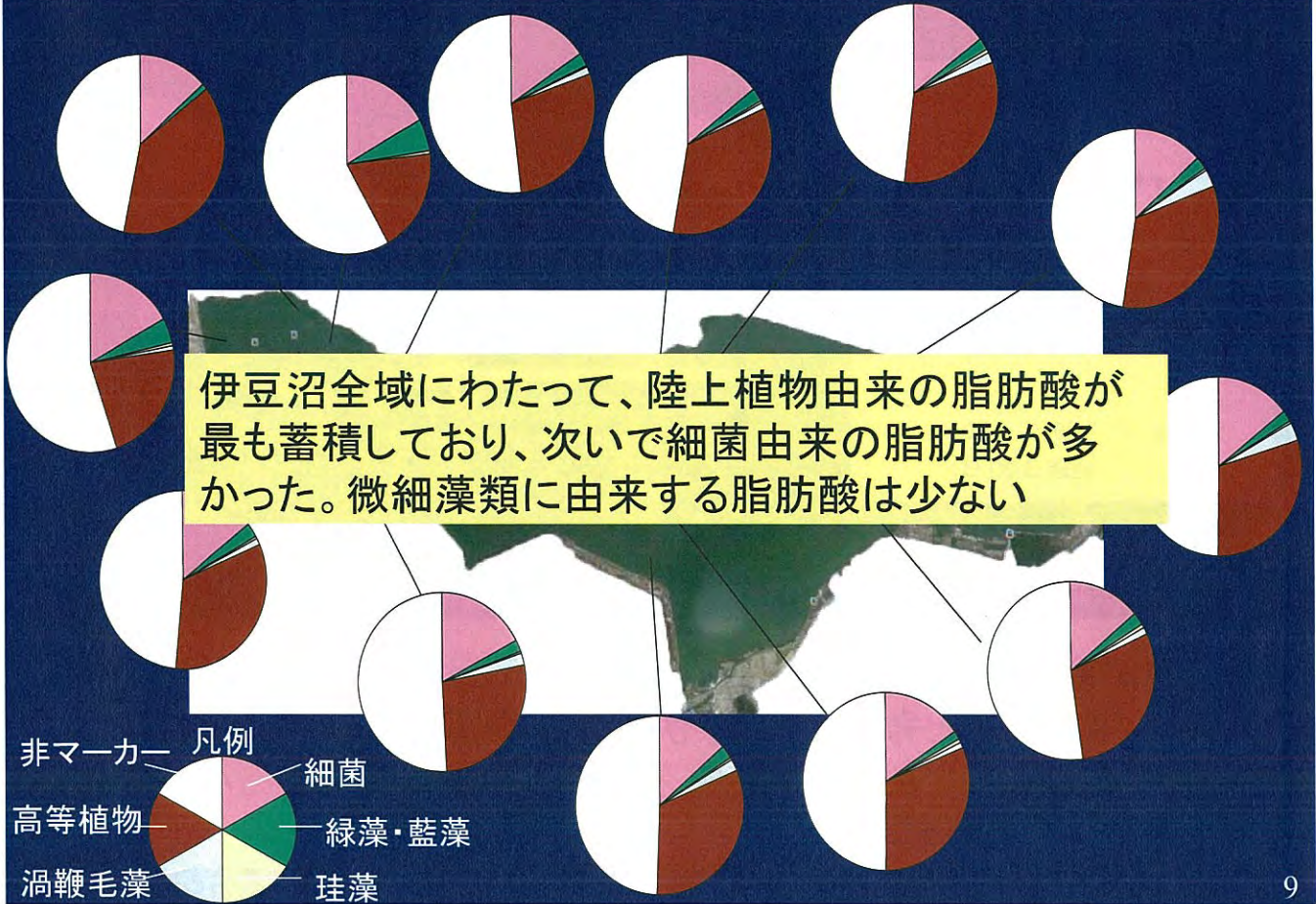


各有機物起源には特有の脂肪酸が含まれているため、底質の脂肪酸組成を分析することでどんな有機物によって底質が形成されているか分かる

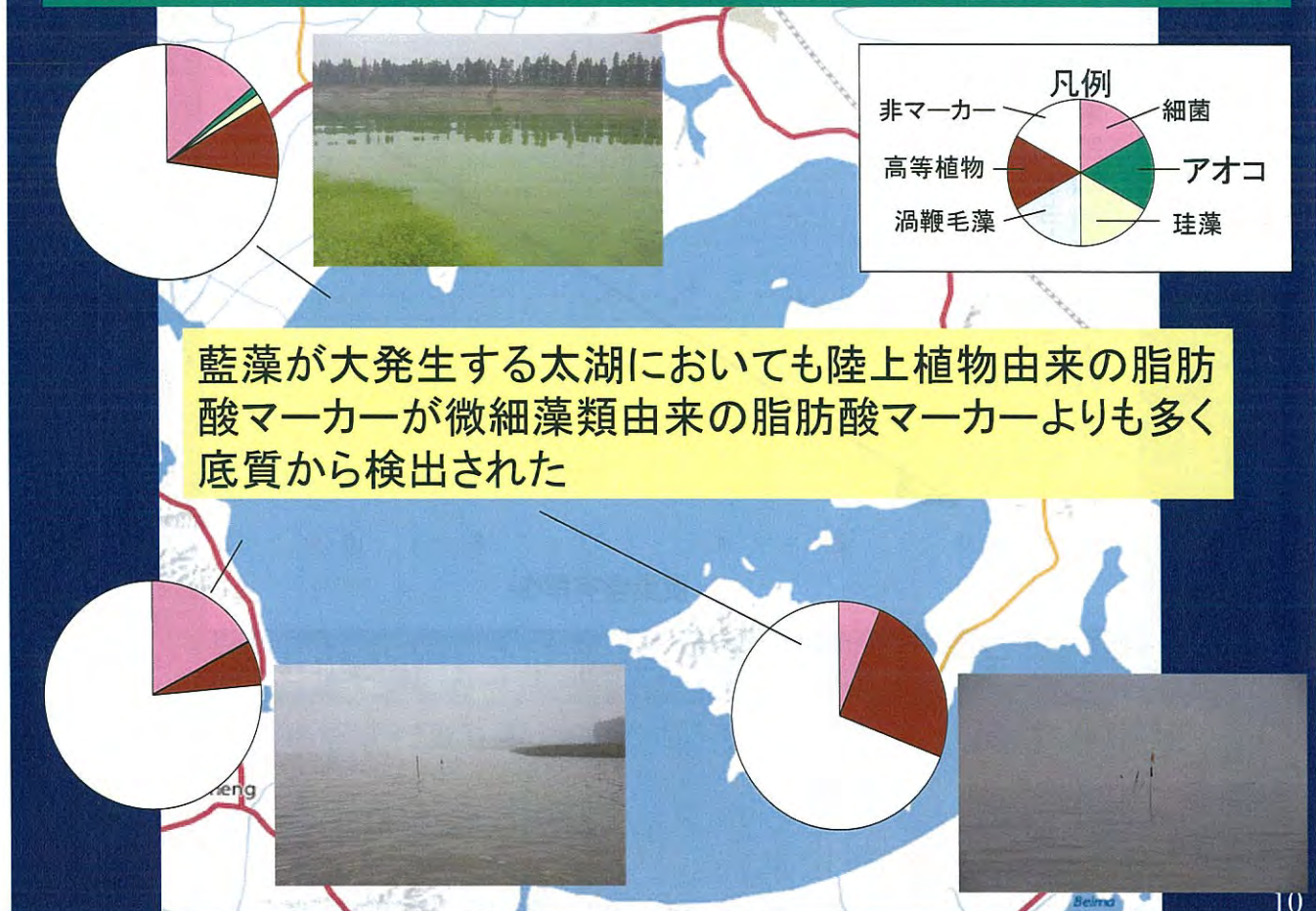
→宮城県伊豆沼全域を対象に底質の脂肪酸組成を解析

8

結果：2012年8月における伊豆沼底質のマーカ―脂肪酸含有率(%)



超富栄養湖中国太湖(2011年11月)の事例：底質のマーカ―脂肪酸含有率(%)



伊豆沼に優占する高等植物(ハス)の室内分解実験

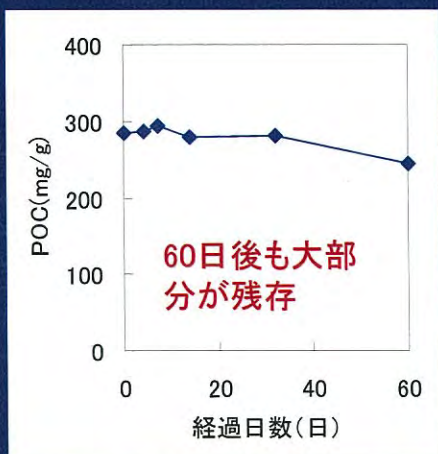


図1 分解実験にともなうハスの有機物量の経時変化

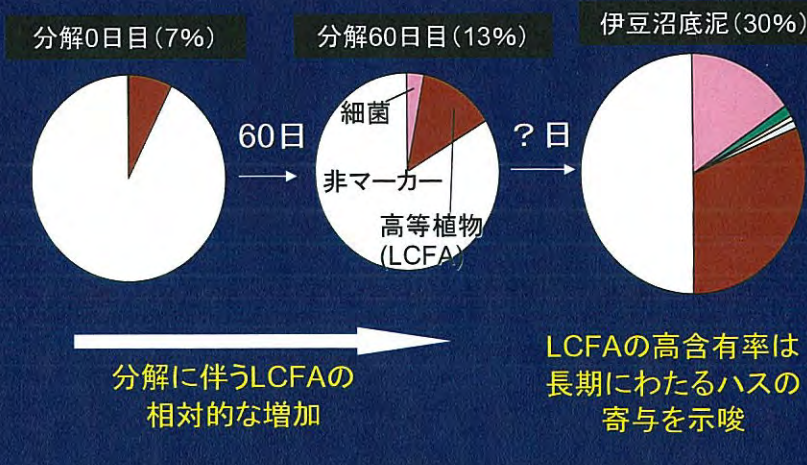


図2 分解実験におけるマーカ脂肪酸組成の変化

LCFAが難分解な脂肪酸であるため、ハス分解過程でLCFAは相対的に増加すると考えられる。伊豆沼の底質を形成する有機物は長時間に渡って供給され、分解を受けつつ残存しているハスの堆積物である可能性が高い。

湖内に堆積する有機物の起源

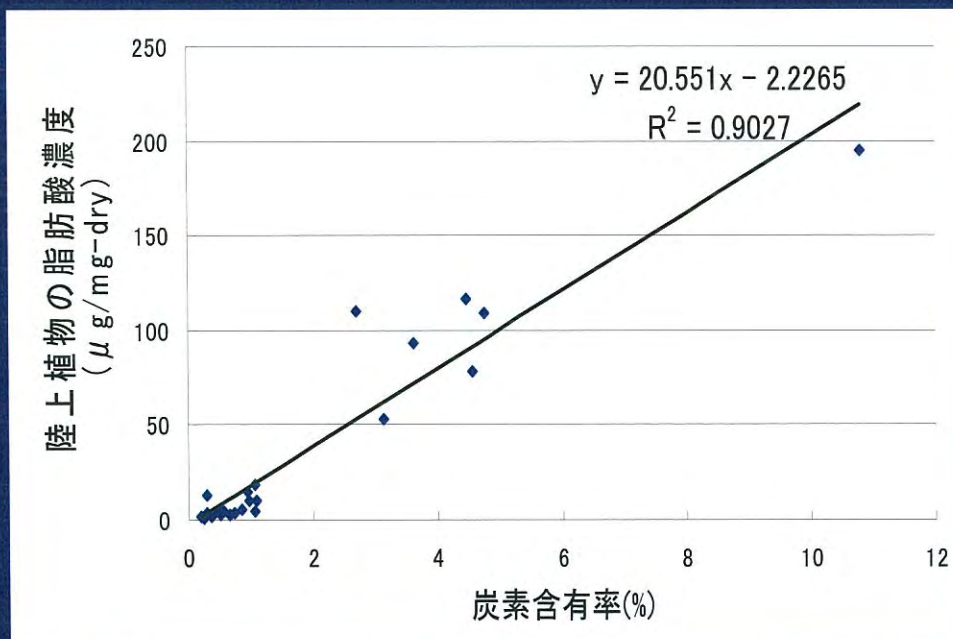


図 底質有機炭素含有率と脂肪酸組成の関係

泥化している地点ほど高等植物由来の脂肪酸が多い
 →泥化は難分解であるハスの堆積によって引き起こされている可能性が高い

3. 本研究の主な成果②水の流動と泥化の関係解析

なぜ有機物が堆積するのか？
→水の流動と底質の泥化の
関係の解析

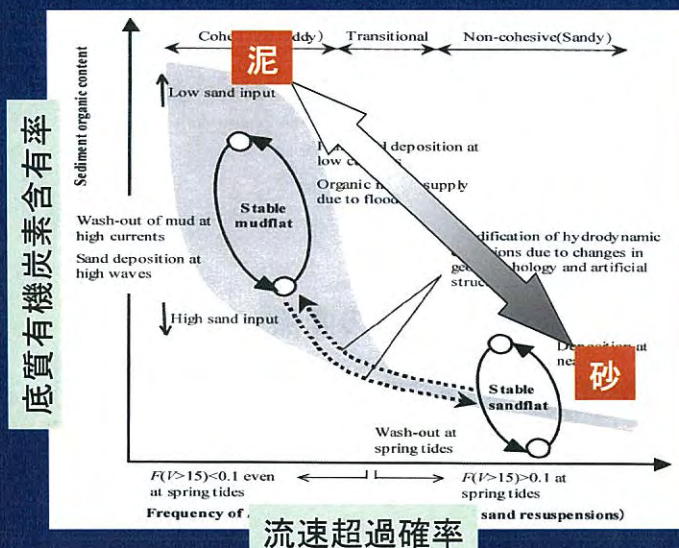
現場調査および数値解析

13

3. 本研究の主な成果②水の流動と泥化の関係解析/解析方法

流速超過確率の導入

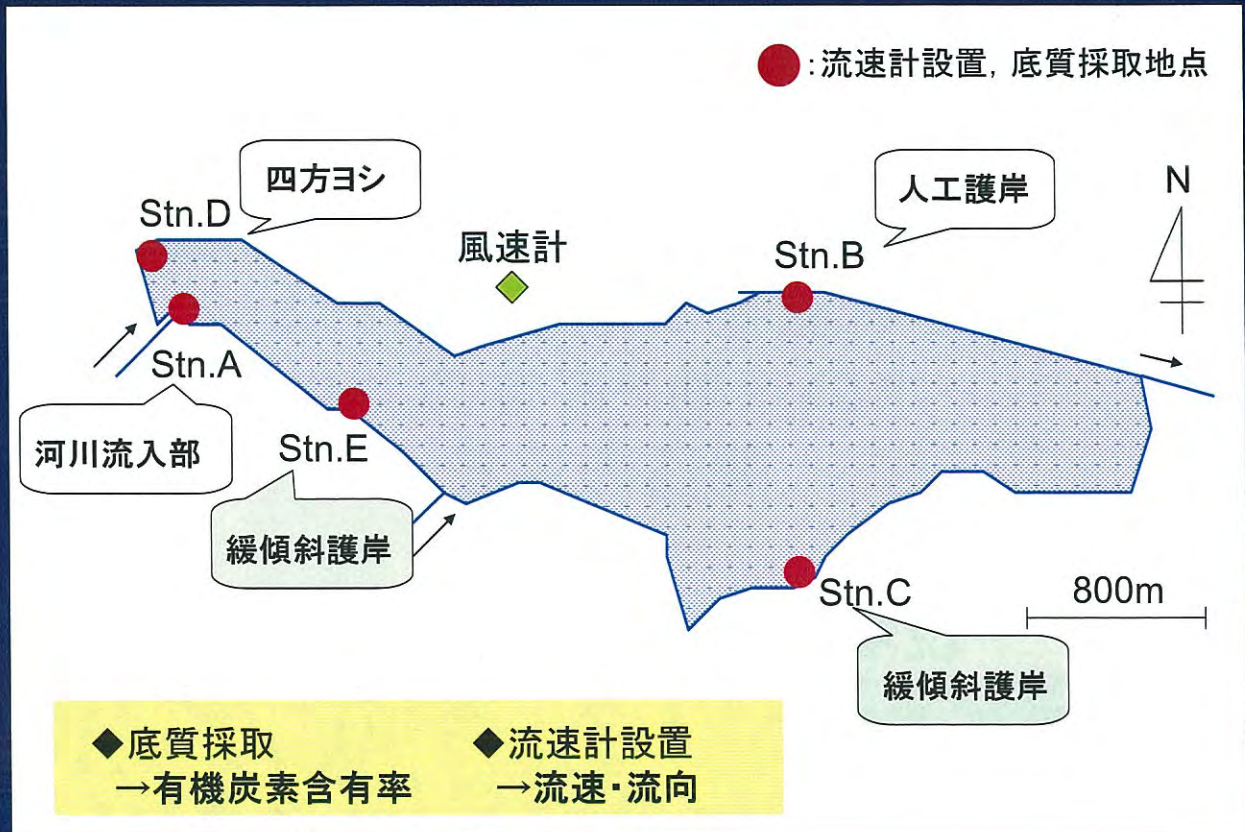
$$\text{流速超過確率 } (V \geq V_c) = \frac{V_c (\text{cm/s}) \text{ を超える流速のデータ数}}{\text{流速(1秒間隔で採取)の全データ数}}$$



・干潟における底質有機炭素含有率と流速超過確率の関係の概念モデル
(Sakamaki&Nishimura, 2007)

14

3. 本研究の主な成果②水の流動と泥化の関係解析/調査方法



15

3. 本研究の主な成果②水の流動と泥化の関係解析/結果(1)

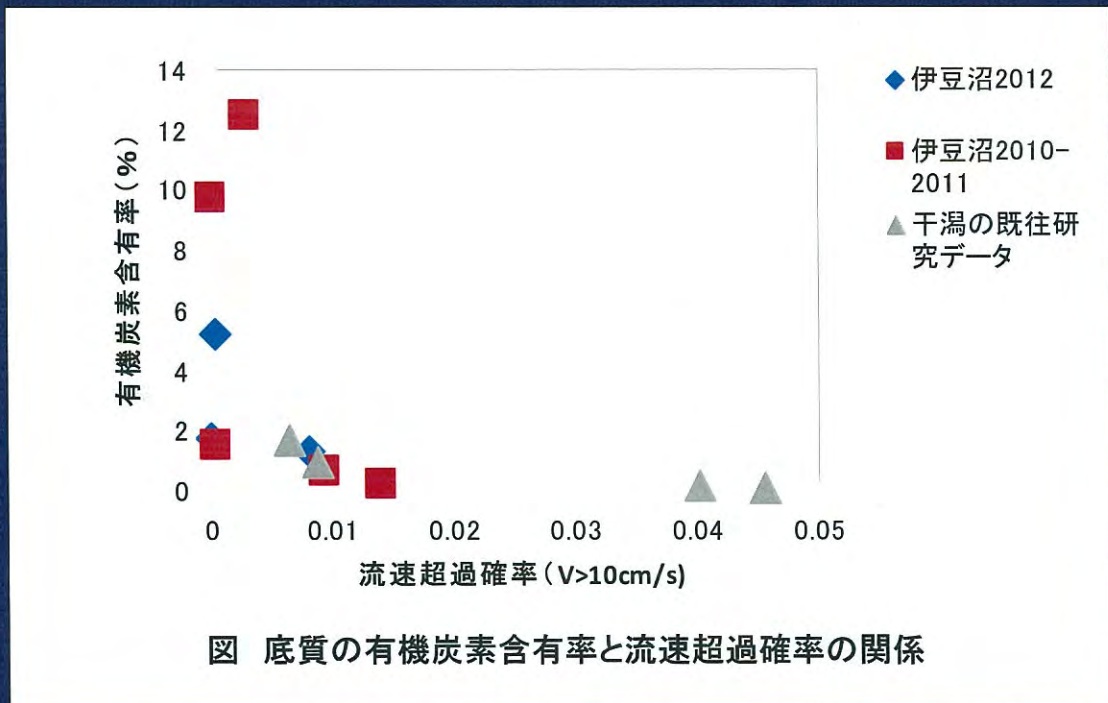


図 底質の有機炭素含有率と流速超過確率の関係

流速超過確率を0.01程度以上に保つことで、泥化が防止される

16

3. 本研究の主な成果②水の流動と泥化の関係解析/結果

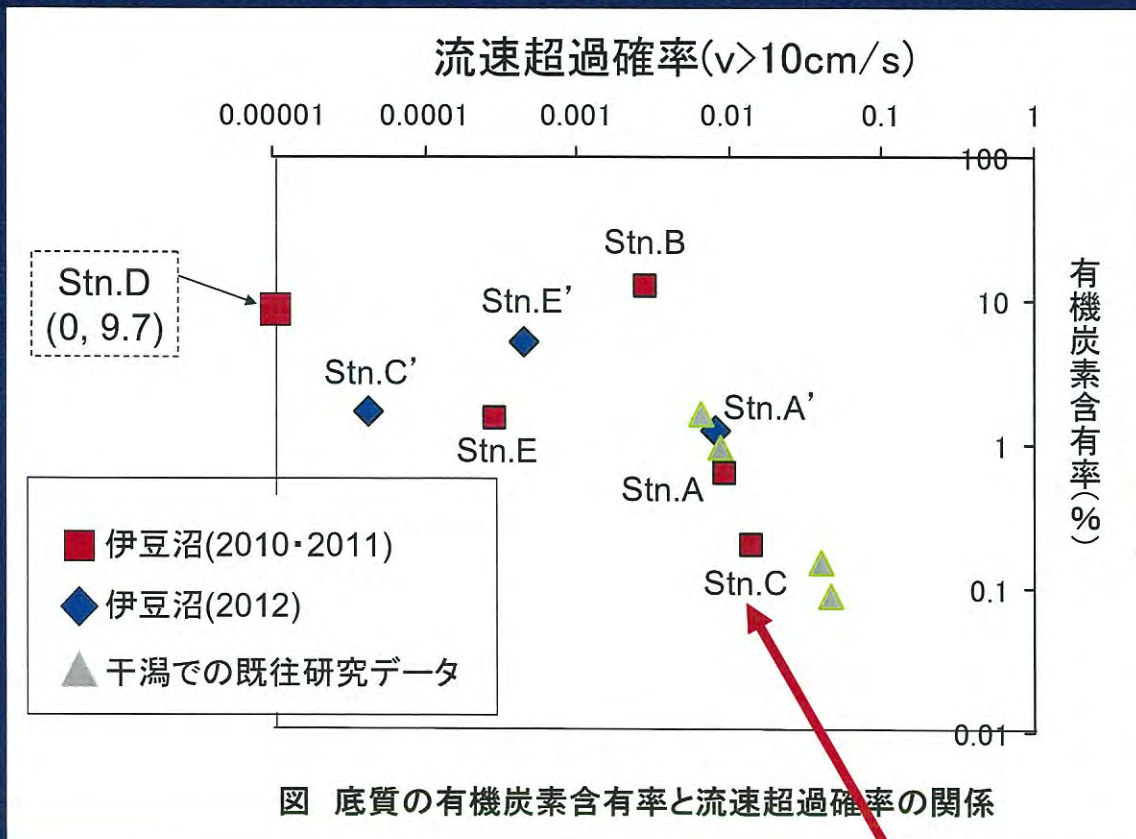
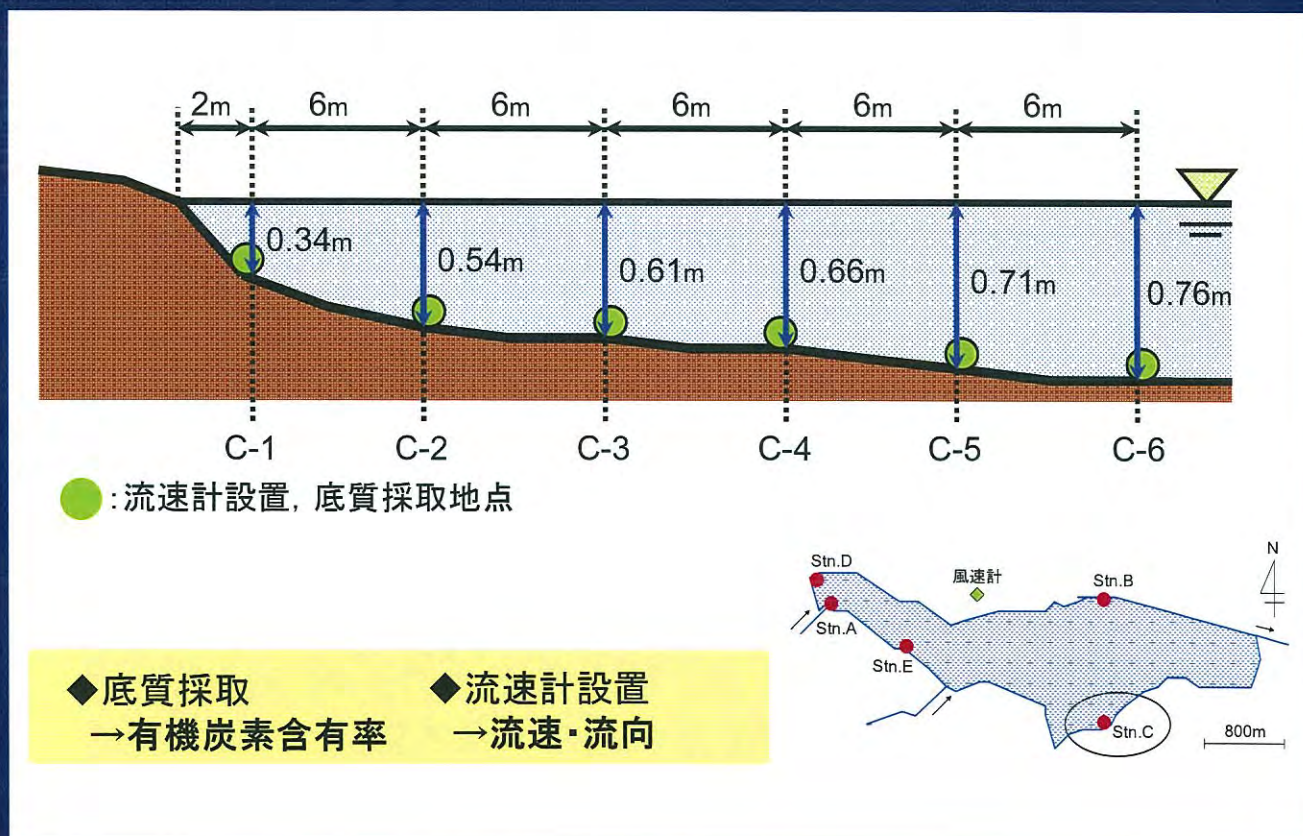


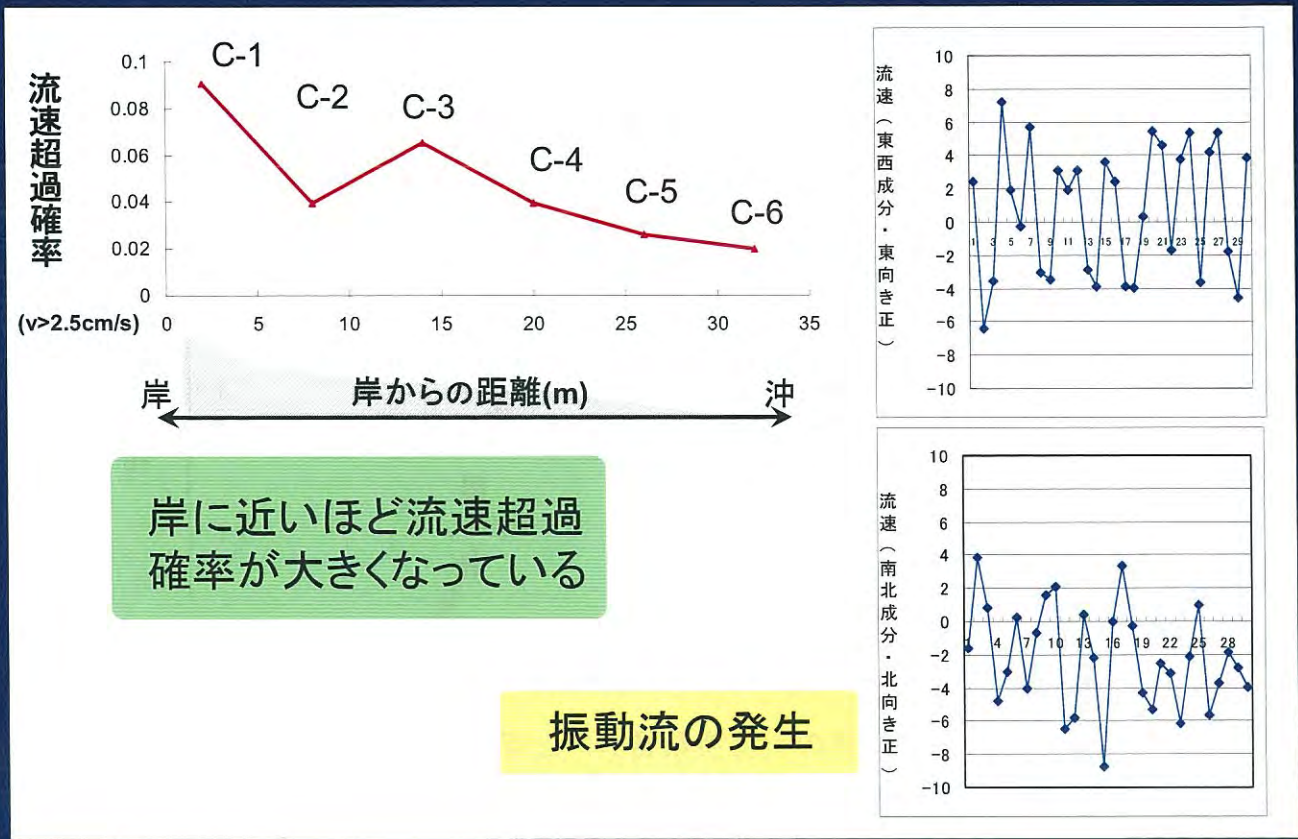
図 底質の有機炭素含有率と流速超過確率の関係

比較的砂質化しているStn C(原因は?)

3. 本研究の主な成果②水の流動と泥化の関係解析/緩傾斜岸の特徴



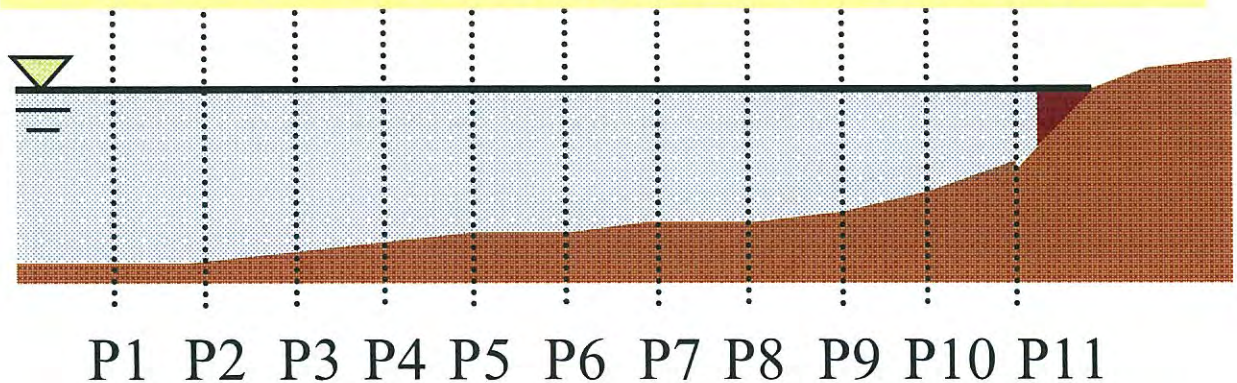
3. 本研究の主な成果②水の流動と泥化の関係解析/緩傾斜岸の特徴



19

3. 本研究の主な成果②水の流動と泥化の関係解析/岸形状の影響

岸の埋め立て(垂直護岸化)の影響は？



数値実験による検証

気液2相を含む流体運動、および底質輸送の支配方程式を同時に評価する数値解析を行うことで、自然風(自由表面の変形やそれに伴う水流の発生も考慮)による底質の挙動の解明を試みる。(立命館大学吉岡先生との共同研究)

20

本研究の数値解析は、微分方程式ソルバーCOMSOL Multiphysicsを利用し、流体運動と物質輸送の連成問題として行った。

支配方程式は、流体運動に対しては表面張力および重力を考慮した2次元非圧縮性ナビエ・ストークス方程式及び連続の式、底質輸送に対しては多化学種の物質移流拡散方程式とした。

流体運動

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u})^r] + \rho \mathbf{g} + F \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

底質輸送

$$\rho_s \frac{\partial \omega_i}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} + \rho_s(\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega_i = 0$$
$$\mathbf{j} = - \left(\rho_s D \nabla \omega_i + \rho_s D \frac{\nabla M_n}{M_n} \right) \quad (3)$$

$$M_n = \left(\sum \frac{\omega_i}{M_i} \right)^{-1}$$

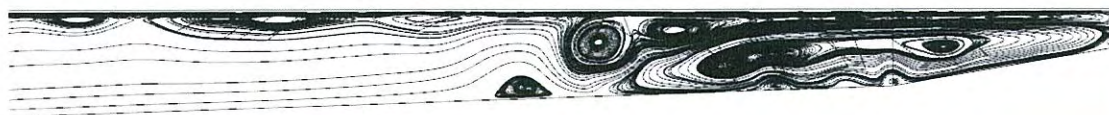
気液界面は、フェーズフィールド法により再現した。これは、気相と液相の間に、2種類の流体の物性値が緩やかに変化する有限厚さのフェーズフィールドを配置する手法である。気液界面に生じる表面張力Fは、ナビエ・ストークス方程式の外力項として取り扱う。本計算では、COMSOL Multiphysics に実装されている気液界面取扱い手法をそのまま利用した。

流線

緩傾斜護岸

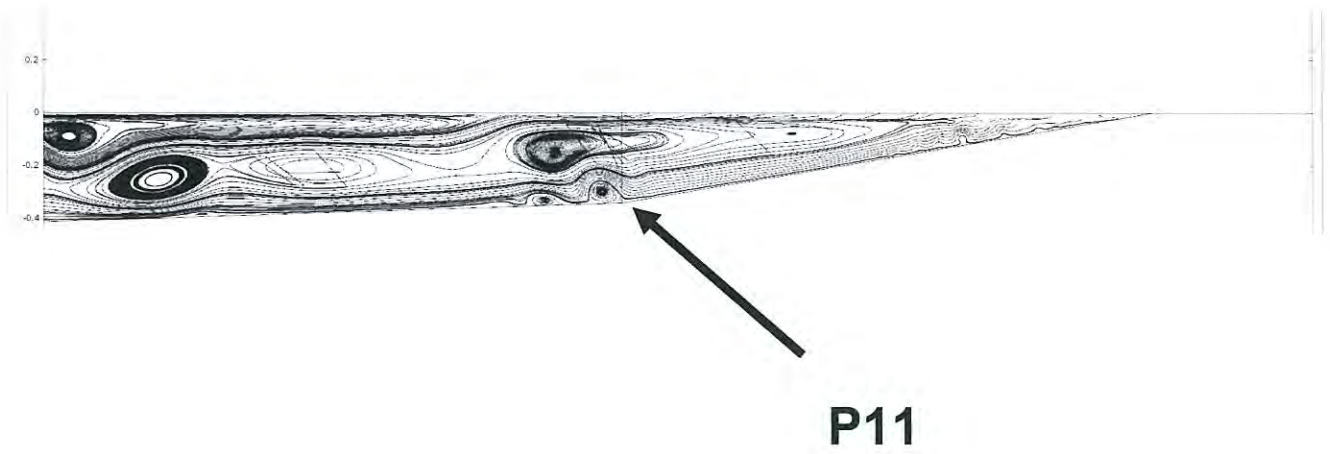


垂直護岸

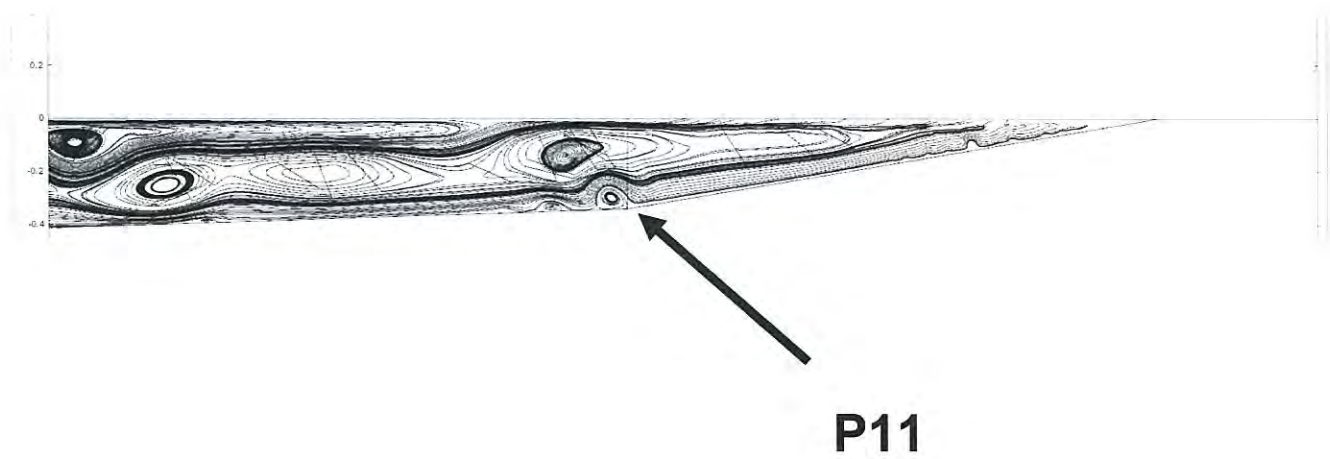


渦の空間スケールに違いがある
緩傾斜護岸 沖まで影響
埋め立てた垂直護岸 岸付近に集中

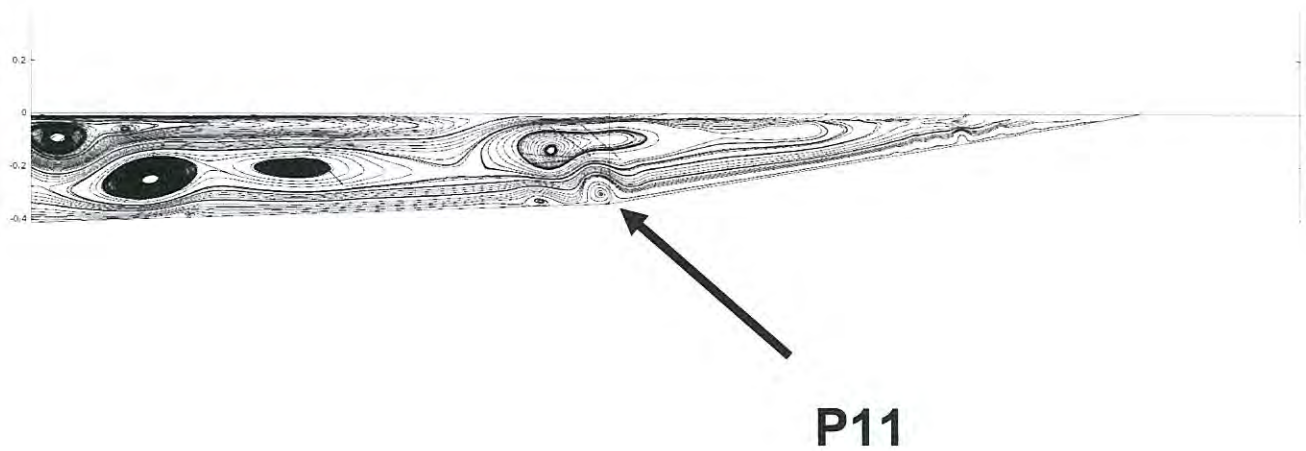
流線 $t=47.4s$



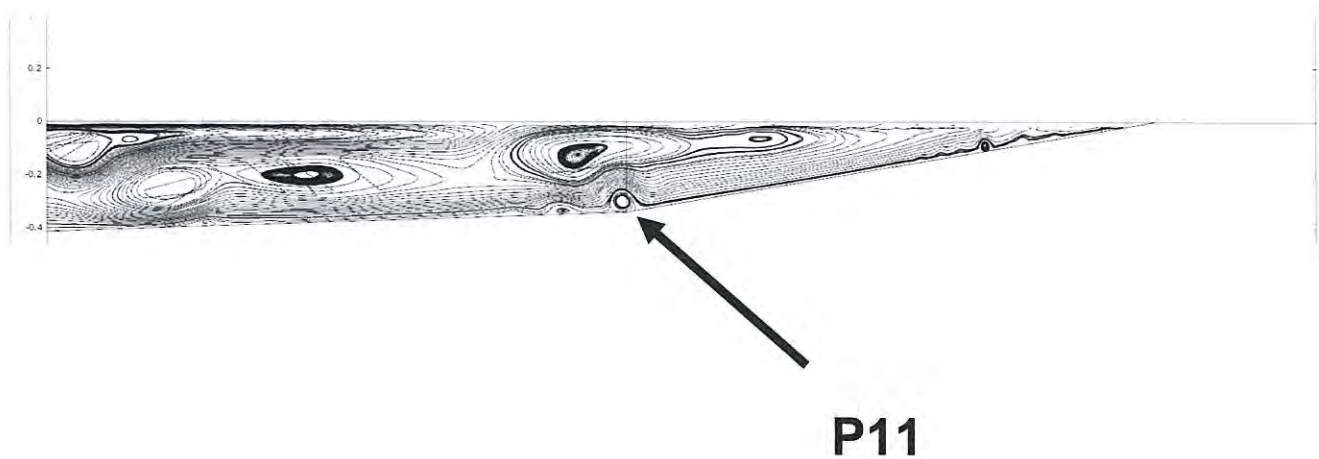
流線 $t=48.0s$



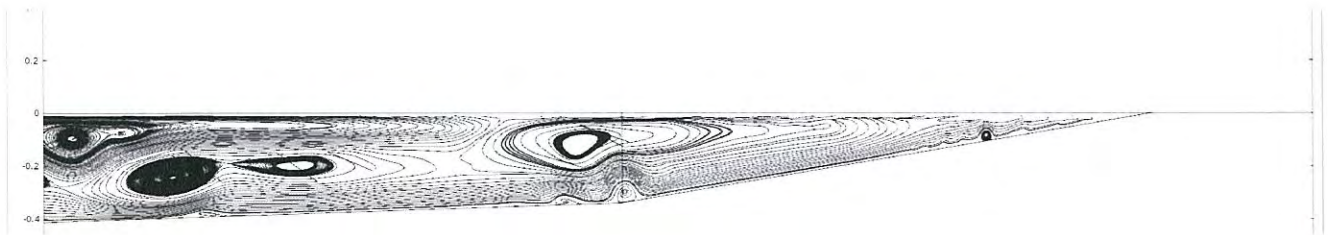
流線 $t=48.4s$



流線 $t=48.8s$



流線 $t=49.2s$



速度変動 渦の通過
緩傾斜護岸では、底面に沿って
渦が多数発生し、振動流を形成



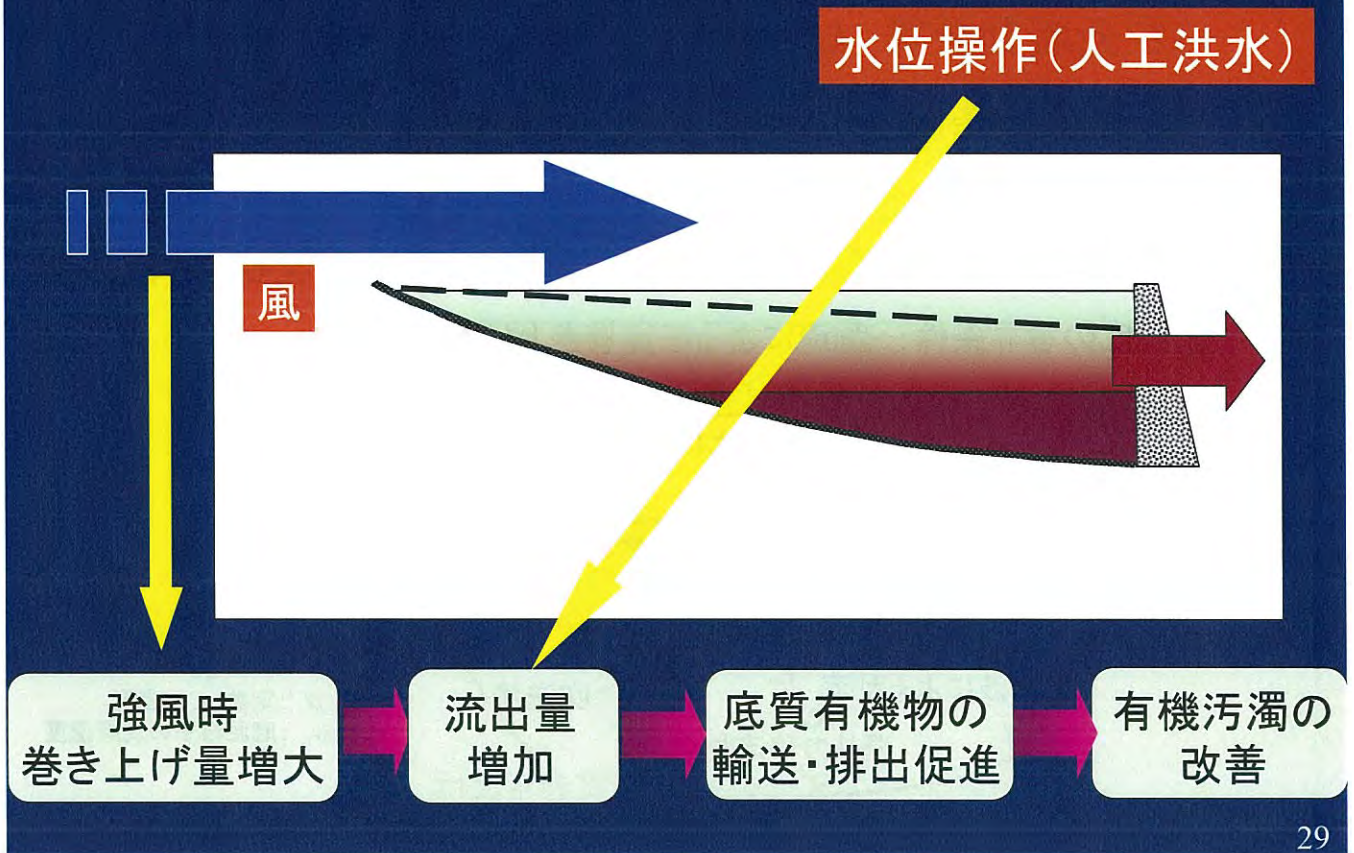
流速超過確率の上昇
砂質化

3. 本研究の主な成果③泥化の原因をふまえた底質制御技術の提案

底泥の有機汚濁化の原因

- ・高等植物の分解物(難分解性有機物)が堆積
→高等植物の管理(刈り取り・有効利用)
- ・難分解性有機物が水の流動の弱いところに堆積
→緩傾斜護岸化による流動の強化
(ただし効果は部分的)
- ・さまざまな治水・利水事業(堰の建設、堤防による
氾濫の制御等)が閉鎖性を強化・堆積を促進
→人為的攪乱に泥の排出

3. 本研究の主な成果③泥化の原因をふまえた底質制御技術の提案



底質巻き上げの力学的プロセス



従来の底質巻き上げ概念

浅い閉鎖性水域における
底質挙動の特性

強風時の底質巻き上げシミュレーション

3次元流動計算, $k-\varepsilon$ 乱流モデル

①水面の境界条件: 吹送距離 F と風速 W の関数

風応力

$$\tau_i = A(F_i W_i^2)^2$$

乱流エネルギー

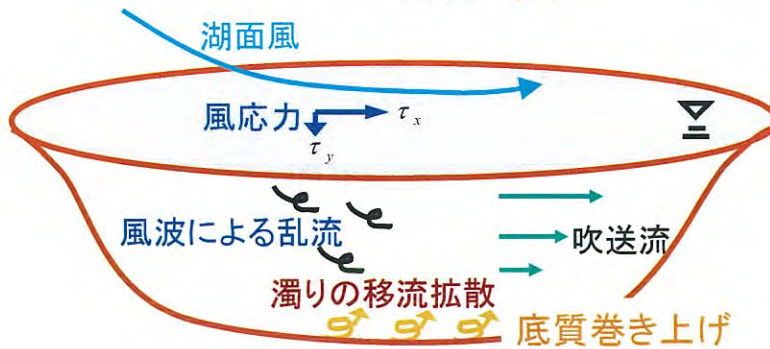
$$k = B \left[(F_x W_x^2)^2 + (F_y W_y^2)^2 \right]$$

本研究独自の評価式

②湖底の境界条件: 乱流による底質巻き上げ

$$\text{底質flux} = \alpha \varepsilon - w_0 C$$

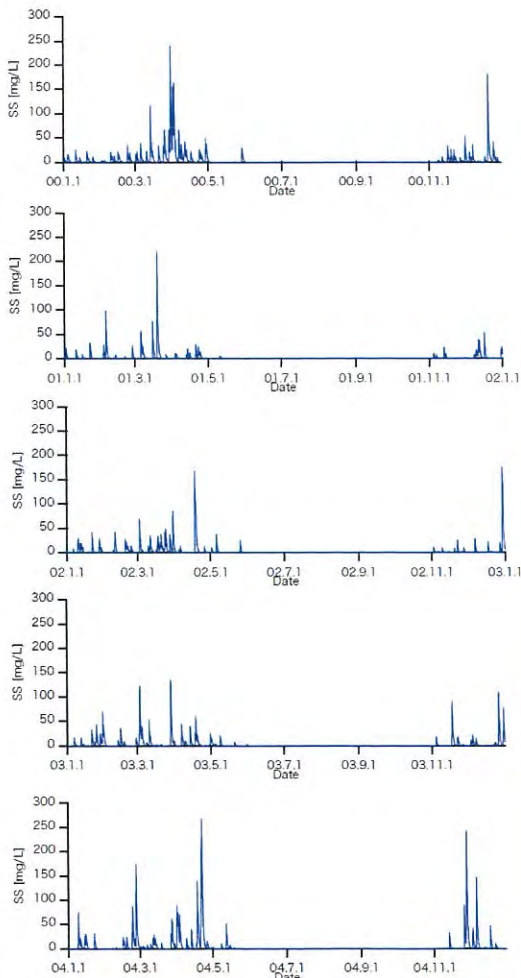
巻き上げ 堆積



A, B : 定数

α : 定数, C : 濁度

w_0 : 底泥粒子の沈降速度



2000年から2004年の5カ年の風データを用いた巻き上げの発生状況のシミュレーション結果



地域特性: 冬季には風下側にあたる伊豆沼の東側ほど風の影響を受けやすく, 巻き上げが発生しやすい。

ハスによる難分解性有機物の生成

- 伊豆沼におけるハスによる難分解性有機物の生産量(1年間)

伊豆沼湖水面積: 2.87km²

ハスの被覆率: 50% (2008年)

ハスの単位面積あたり乾燥重量¹⁾: 250g/m²

難分解性有機炭素量²⁾: 60g/m²

∴ 86ton

1) 鈴木ら、2010 2) 本研究

33

人工洪水の効果

- 人工洪水による底質中難分解性有機物の流去(1年間)

水位5cm低下に相当する洪水の放流量:

14.5千ton

巻き上げ時のSS濃度: 50mg/L

1回の人工洪水によるSSの排出量: 7ton

難分解性有機物の排出量: 0.7ton

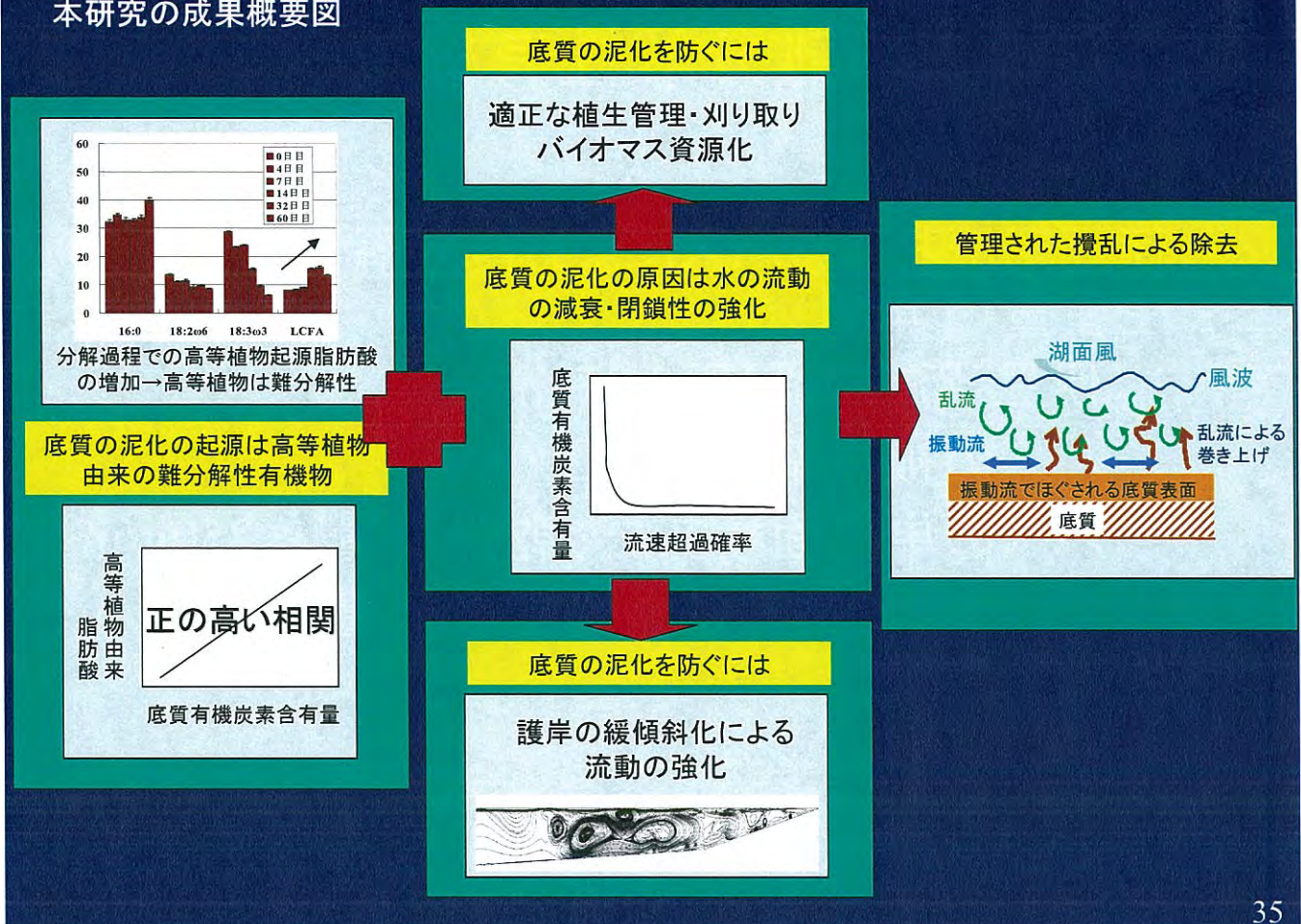
年間10回の人工洪水を起こすと: 7ton

人工洪水の効果は限定的(1割以下)

→ 過繁茂対策が必要

34

本研究の成果概要図



35

本研究のまとめ

科学的意義

- ・有機底泥の起源が高等植物由来であることを解明
(アオコ発生湖沼においても) **土木学会論文集に掲載**
- ・高等植物の分解による難分解性を定量化
底質の脂肪酸組成により分解の履歴を推定可能
- ・緩傾斜護岸の底質輸送現象のモデル化(流速超過確率の導入)
メカニズムの定性的説明(渦の発生)
+ 振動流

環境政策への貢献

- ・底質の有機汚濁化のメカニズムをふまえた底質改善対策の提案
 - ・植生管理(刈り取り)
 - ・緩傾斜護岸化
 - ・人工攪乱

研究代表者が会長をつとめる伊豆沼・内沼自然再生協議会にて
事業の推進に活用

36