

On development of a numerical model
for understanding mercury behaviors in
Minamata Bay
– 水俣湾における水銀動態の理解のため
の数値モデルの開発 –

Shinichiro YANO (矢野真一郎)
Kyushu University (九州大学)

February 5, 2010 (2010年2月5日)



KYUSHU UNIVERSITY



I. Introduction: はじめに

- Low level mercury(<10ppm) contains in bottom sediment in Minamata Bay.

水俣湾では、微量な残留水銀(<10ppm)が底質に含まれている

- It was confirmed that this mercury has been spreading in the southern Yatsushiro Sea.

これらが、八代海南部へ拡がっていることが確認されている

- It is considered that rest of useful life of sheet pile cell used for the reclamation may be approx. 20 years.

環境修復事業における埋立地に使用された矢板セルの耐用年数が残り約20年程度と言われている



I. Introduction: はじめに

- In addition, it is necessary to evaluate the effect of global warming on the mercury fate.

さらに、地球温暖化の残留水銀動態への影響も評価する必要がある

- Under these circumstances, development of numerical model for mercury fate in coastal environment is required from a perspective understanding mercury behavior and risk management.

これらの状況下で、微量残留水銀の動態を予測することやリスク管理の観点から、数値モデルの開発が求められている



II. Outline of our research process(1):

我々の研究の流れ(1)

2001-2005:

- physical oceanographic features by in-situ measurement
 - tides, currents (tidal current, density current, drift current), wave, stratification (salinity & temperature), SS flux

海洋物理学的特性に関する現地調査

-潮汐, 流れ(潮流, 密度流, 吹送流), 波浪, 成層(塩分と水温), 浮遊懸濁物フラックス



II. Outline of our research process(2): 我々の研究の流れ(2)

2003-present:

- water quality and mercury profiles by monthly/weekly water sampling
 - nutrient (N, P), TOC, MMHg, THg

毎月または毎週の採水調査による水質と水銀の分布

 - 栄養塩類(窒素, リン), 炭素量, メチル水銀, 全水銀
 - correlation between mercury and water quality/
stratification condition
- 水銀と水質・成層状態との相関



II. Outline of our research process(3): 我々の研究の流れ(3)

2006-present:

- development numerical model for hydrodynamics
-2Dmodel, 3Dmodel
流動モデルの開発 – 2次元, 3次元モデル

2009-

- development numerical model for mercury fate
-3Dmodel
水銀動態モデルの開発 – 3次元モデル



III. Review of numerical models: 数値モデルのレビュー

- 1st generation model 第1世代モデル -

- box model ボックス・モデル
 - Officer and Lynch(1989)
- 1D model 1次元モデル
 - Turner and Lindberg (1978) : river environment(河川)
- Mercury cycling model 水銀動態モデル
 - Hudson et al.(1994),Leonard et al.(1995),
Gbound-Tugbawa&Driscoll(1998), etc.
 - :in freshwater environment 淡水中のモデルが大半

III. Review of numerical models: 数値モデルのレビュー

- 2nd generation model 第2世代モデル -

Bale (2000):

- Clear Lake model

Clear湖モデル

- 2D unsteady model

平面2次元非定常モデル

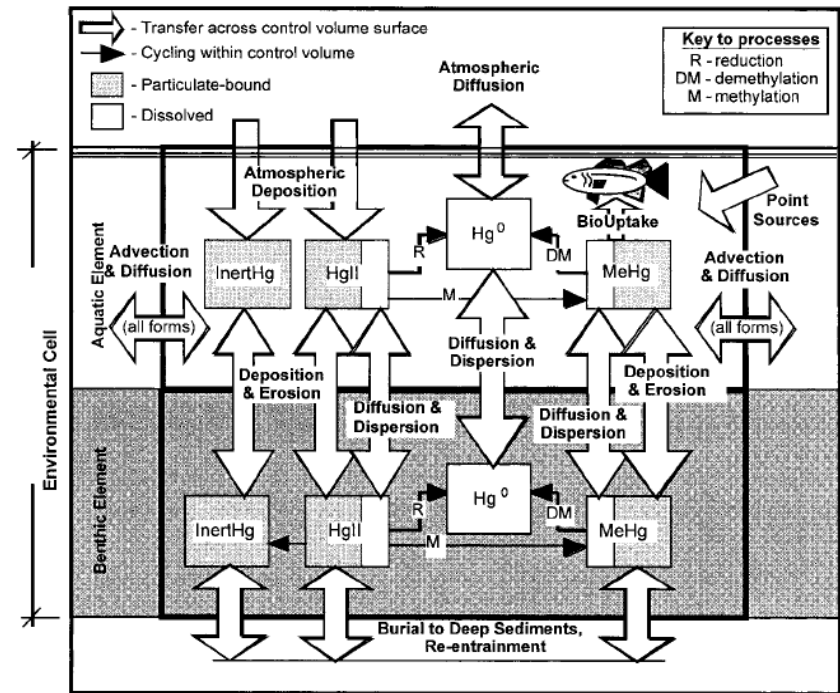
*application for only water column
(適用は水柱についてのみ)

- sediment-water and air-water exchange modules

底面・水表面交換モジュール

- biogeochemical and food chain module

生物地球化学的・食物連鎖水銀動態モジュール

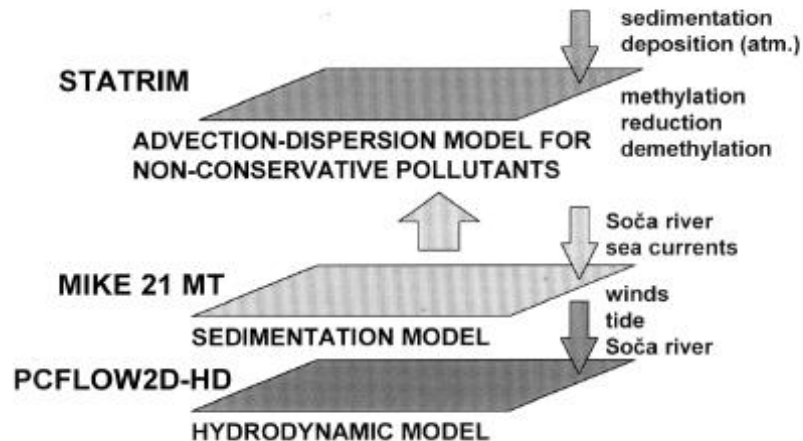


[Bale(2000):*J.Env.Engng.* 126(2)]

III. Review of numerical models: 数値モデルのレビュー - 2nd generation model 第2世代モデル -

Sirca et al. (1999):

- 2D unsteady model 2次元非定常モデル
- Hydrodynamic module 流体力学モジュール
- sediment transport module 底質輸送モジュール
- mercury cycling module 水銀動態モジュール



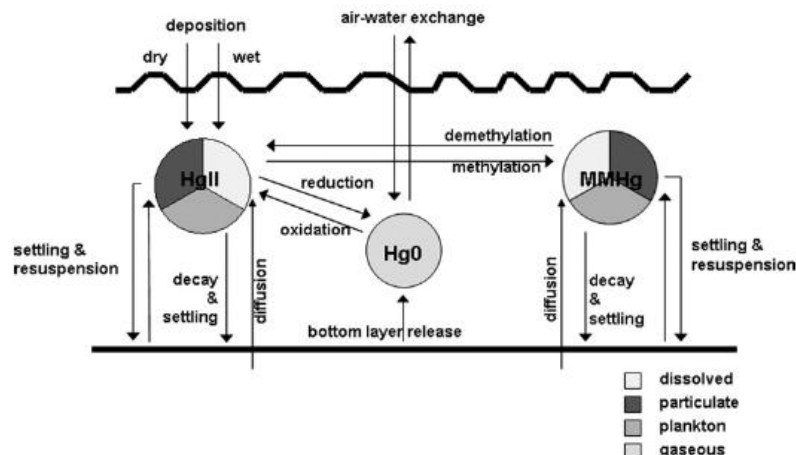
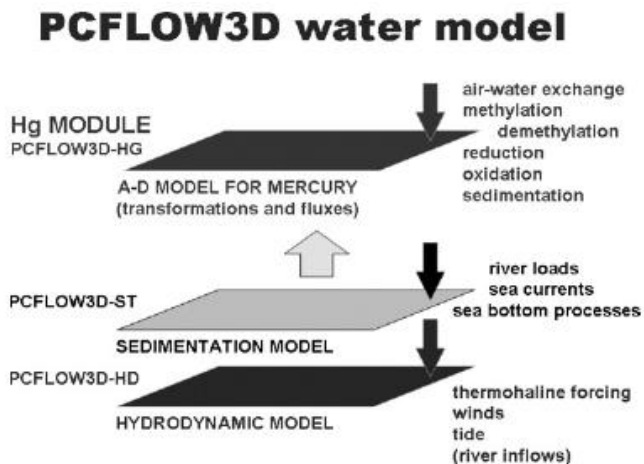
[Sirca et al. (1999):*Env. Model. Soft.* 14]

III. Review of numerical models: 数値モデルのレビュー

- 3rd generation model 第3世代モデル -

Rajar *et al.*(2000), Rajar *et al.* (2004), Zager *et al.* (2007):

- 3D unsteady model 3次元非定常モデル
- Hydrodynamic module 流体力学モジュール
- combined with sediment and air-water exchange modules
底質モジュールと水表面交換モジュールとの結合
- biogeochemical module 生物地球化学的水銀動態モジュール
: first order transformation (1次変化で表現)



IV. Computational Results of Particle Tracking (1)

粒子追跡計算の計算結果(1)

[Tai&Yano,2007]



Initial Condition (初期条件)



After 3 days (3日後)

IV. Computational Results of Particle Tracking (2)

粒子追跡計算の計算結果(2)

[Tai&Yano,2007]



After 5 days (5日後)



After 10 days (10日後)



IV. Computational Results of Particle Tracking (3)

粒子追跡計算の計算結果(3)

[Tai&Yano,2007]



After 30 days (30日後)

- water in MB can spread overall YS for 1 month in barotropic condition

: 水俣湾の海水は、非成層条件では1ヶ月で八代海全体に拡がる。

NOTE: This result dose NOT mean sediment in MB can spread overall YS.

注意: この結果は水俣湾の底質が八代海全体へ拡がっていることを意味していない。



V. Problems of existing numerical models for application to Minamata Bay: 既存数値モデルの水俣湾への適用における問題点

- need to use σ -coordinate system due to very large tidal range(>4m)
潮汐が大きいため σ 座標系を使用する必要がある。
- tidal flat modeling
干潟モデル
- evaluation of freshwater inflow rate
淡水流入量の決定法
- mercury attached various sediment (mud – sand)
様々な底質(泥～砂)に付着した水銀

etc.....

VI. Brief description of our new model(1): 新しいモデルの概要(1)

Ariake Bay (有明海)

area (表面積): 1,700km²

(18km wide, 96km long)

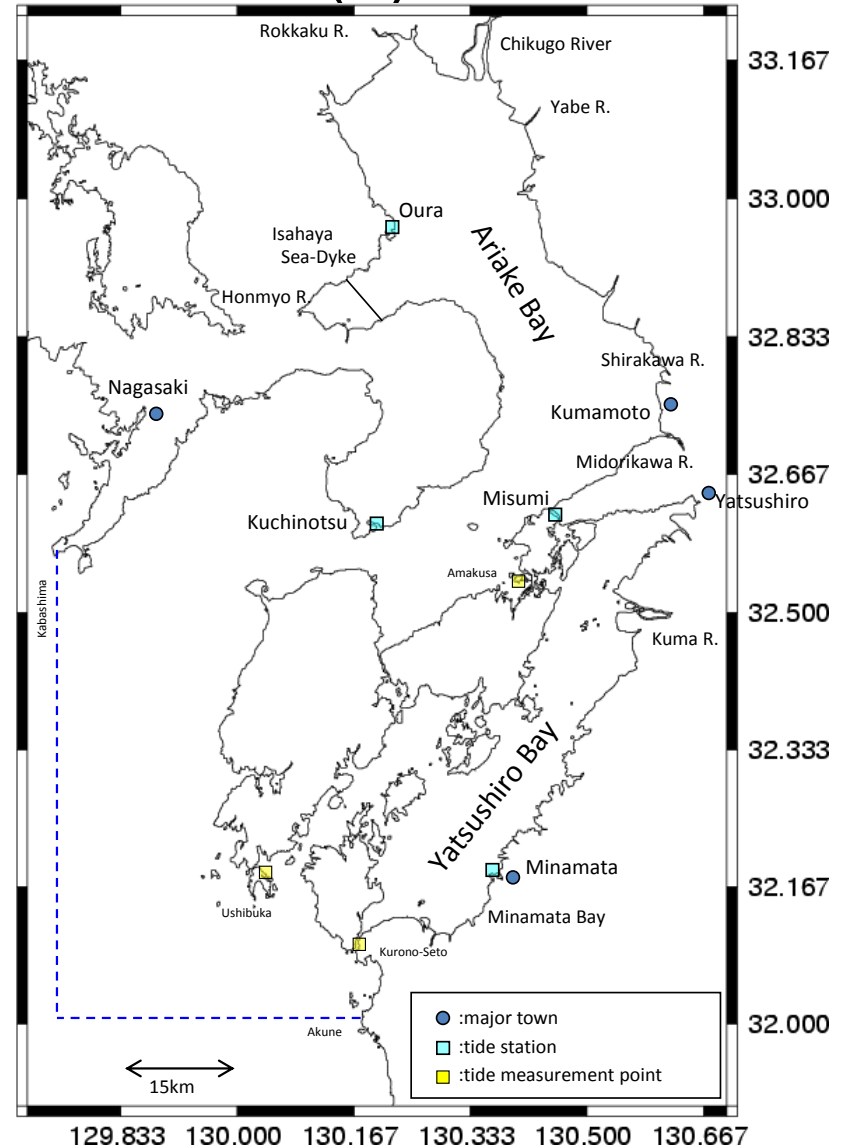
mean depth (平均水深): 20m

Yatsushiro Bay (八代海)

area (表面積): 1,200km²

mean depth (平均水深): 22m

Computational domain (計算領域)



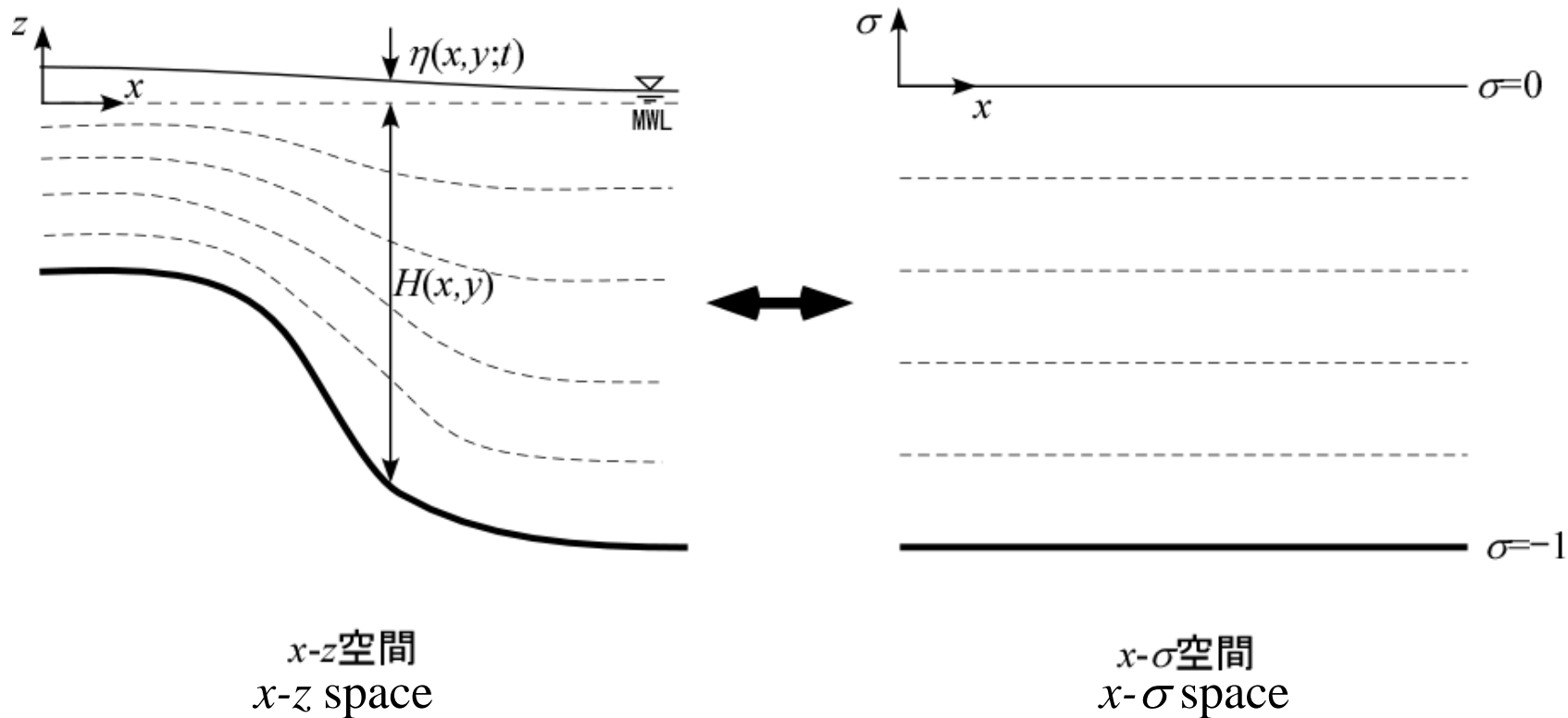


VI. Brief description of our new model(2): 新しいモデルの概要(2)

DELFT3D:

- σ -grid in the vertical (σ -座標系)
- highly resolved horizontal grid (高解像度水平グリッド)
($0.1^\circ \times 0.1^\circ$ app. $\Delta x = 250\text{m}$)
- sub-grid scale model: horizontal (SGSモデル: 水平)
- k - ε turbulence model: vertical (k- ε 乱流モデル: 鉛直)
- tidal flat: dry-wet process (干潟モデル)
- hydrostatic approximation (静水圧近似)
- f -plane approximation (f 平面近似)
- forcing with 40 tidal constituents (40成分による潮汐)

σ -grid system: σ -座標系變換



$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad t^* = t, \quad \sigma = \frac{z - \eta(x, y, t)}{H(x, y) + \eta(x, y, t)} = \frac{z - \eta}{D}$$



Basic Equations(1): 基礎方程式(1)

3D-RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) eqs. (RANS方程式)

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} - fV = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xx} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yx} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zx} \right)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} + fU = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xy} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yy} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zy} \right)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} \tau_{xz} + \frac{\partial}{\partial y} \tau_{yz} + \frac{\partial}{\partial z} \tau_{zz} \right)$$

Continuity eq. (連続の式)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial z} = 0$$

State eq. for density (密度の状態方程式)

$$\rho = \rho(S, T)$$





Basic Equations(2): 基礎方程式(2)

Advection-Diffusion eq. for salinity: 塩分の輸送方程式

$$\frac{\partial S}{\partial t} + U \frac{\partial S}{\partial x} + V \frac{\partial S}{\partial y} + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} F_{Sx} + \frac{\partial}{\partial y} F_{Sy} + \frac{\partial}{\partial z} F_{Sz}$$

Advection-Diffusion eq. for heat: 水温(熱)の輸送方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} + V \frac{\partial T}{\partial y} + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} F_{Tx} + \frac{\partial}{\partial y} F_{Ty} + \frac{\partial}{\partial z} F_{Tz} + S_T$$

$$S_T = \frac{1}{\rho C_p} \frac{dq}{dz} = \frac{\alpha}{\rho C_p} (1 - \beta) Q_s \exp \{-\alpha(\eta - z)\}$$

ここで, $S(x, y, z, t)$: 塩分, $T(x, y, z, t)$: 水温, $F_{Sx}(x, y, z, t)$ など: 塩分の各方向の乱流拡散flux, $F_{Tx}(x, y, z, t)$ など: 水温の各方向の乱流拡散flux, S_T : 日射(短波放射)による熱源項, C_p : 比熱 [$\approx 3.93 \sim 4.18 \times 10^3 \text{ J/kg/K}$], β : 海面での吸収率 (0.06~0.4), $Q_s = (1-r)I_0$ [W/m^2]: 海面
上での有効日射量, I_0 : 日射量 [W/m^2], r : アルベド (0.06~0.09), α : 消散係数 [m^{-1}] (≈ 0.1) である.





Horizontal Eddy Viscosity: 水平方向の渦動粘性係数

・SGS(Sub-Grid Scale) model: SGSモデル

Smagorinski model: スマゴリンスキー・モデル

$$\nu_{tH} = (C_s \Delta)^2 (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (i, j = 1, 2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)$$

$$S_{ij}S_{ij} = S_{11}^2 + 2S_{12}S_{21} + S_{22}^2 = \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)^2$$

where C_s : Smagorinski constant, Δ : Filter scale(= $(\Delta x \Delta y)^{1/2}$)

ここで, C_s : Smagorinski定数, Δ : フィルター幅(= $(\Delta x \Delta y)^{1/2}$).





Vertical Eddy Viscosity:鉛直方向の渦動粘性係数

Two equation model: 2方程式モデル

• k - ε model: k - ε モデル

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

k -eq.: k -方程式:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_{tk}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{g}{\rho} \frac{\nu_t}{\sigma_{t\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial x_3}$$

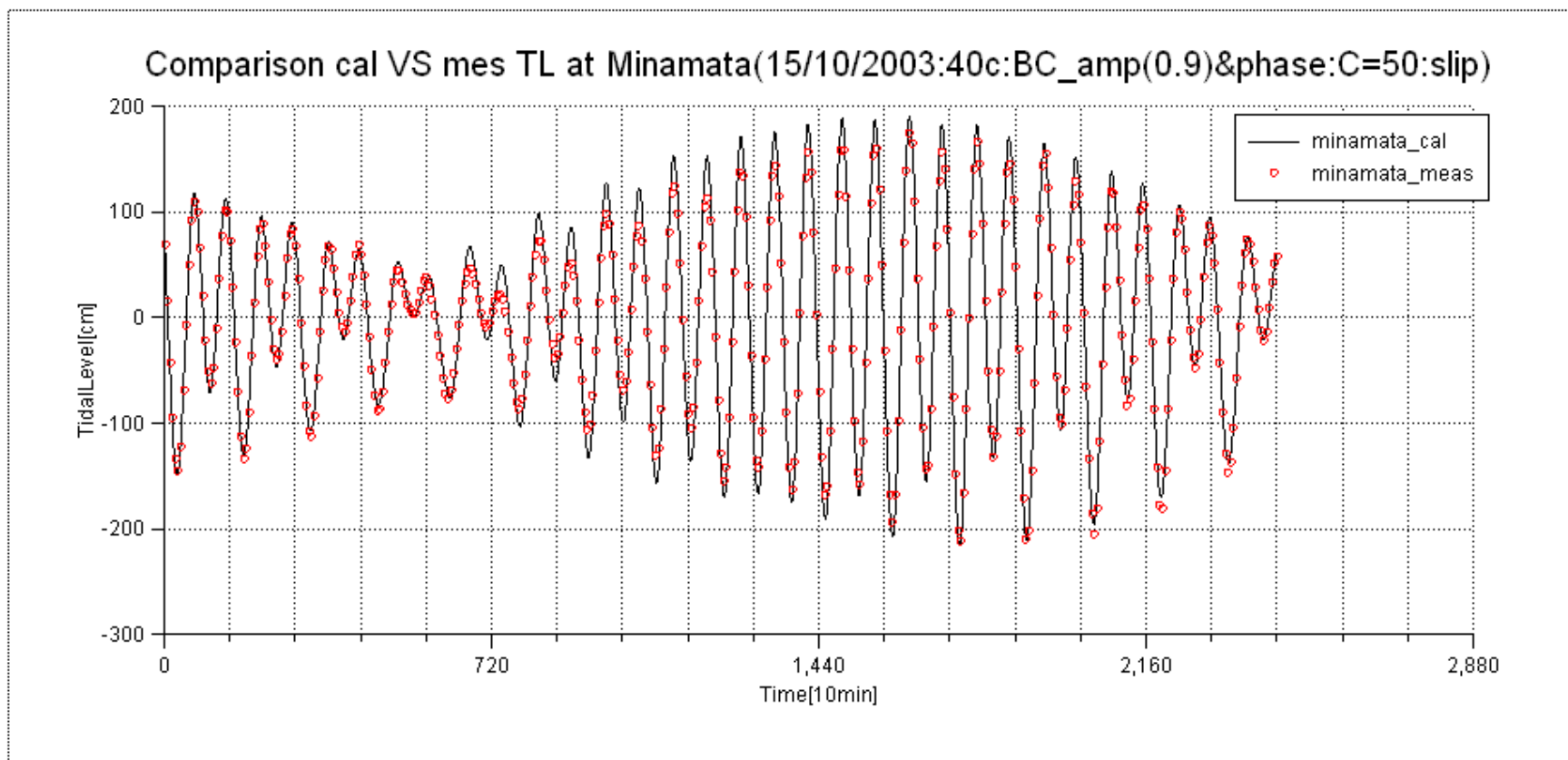
ε -eq.: ε -方程式:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_{t\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left\{ \nu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{g}{\rho} \frac{\nu_t}{\sigma_{t\rho}} \frac{\partial \rho}{\partial x_3} (1 - c_{3\varepsilon}) \right\} - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

where, $C_\mu=0.09$, $c_{1\varepsilon}=1.44$, $c_{2\varepsilon}=1.92$, $\sigma_{tk}=1.0$, $\sigma_{t\varepsilon}=1.3$

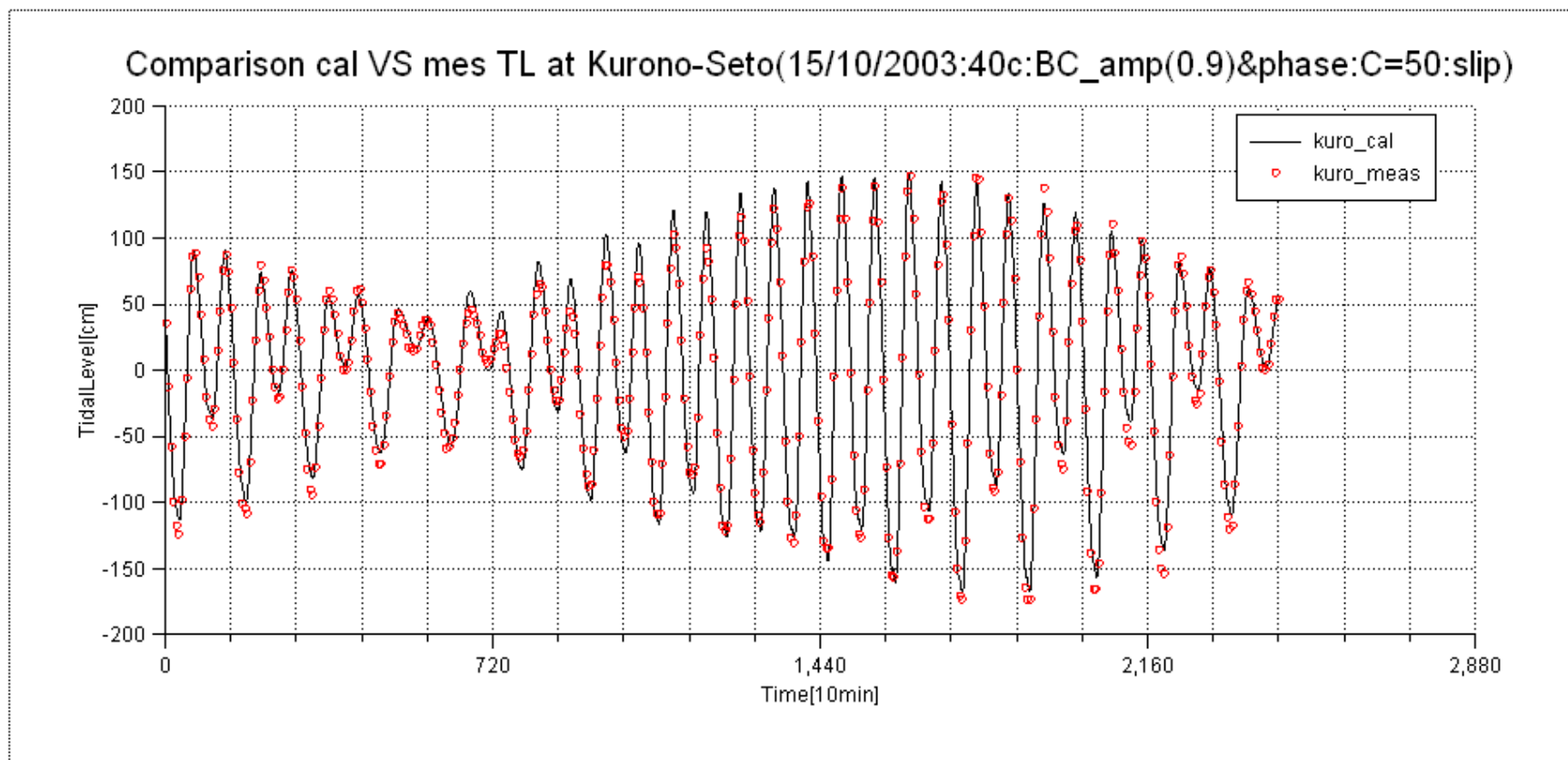


VII. Computational result: 計算結果



temporal variation of tidal level at Minamata: 潮汐変動(水俣港)

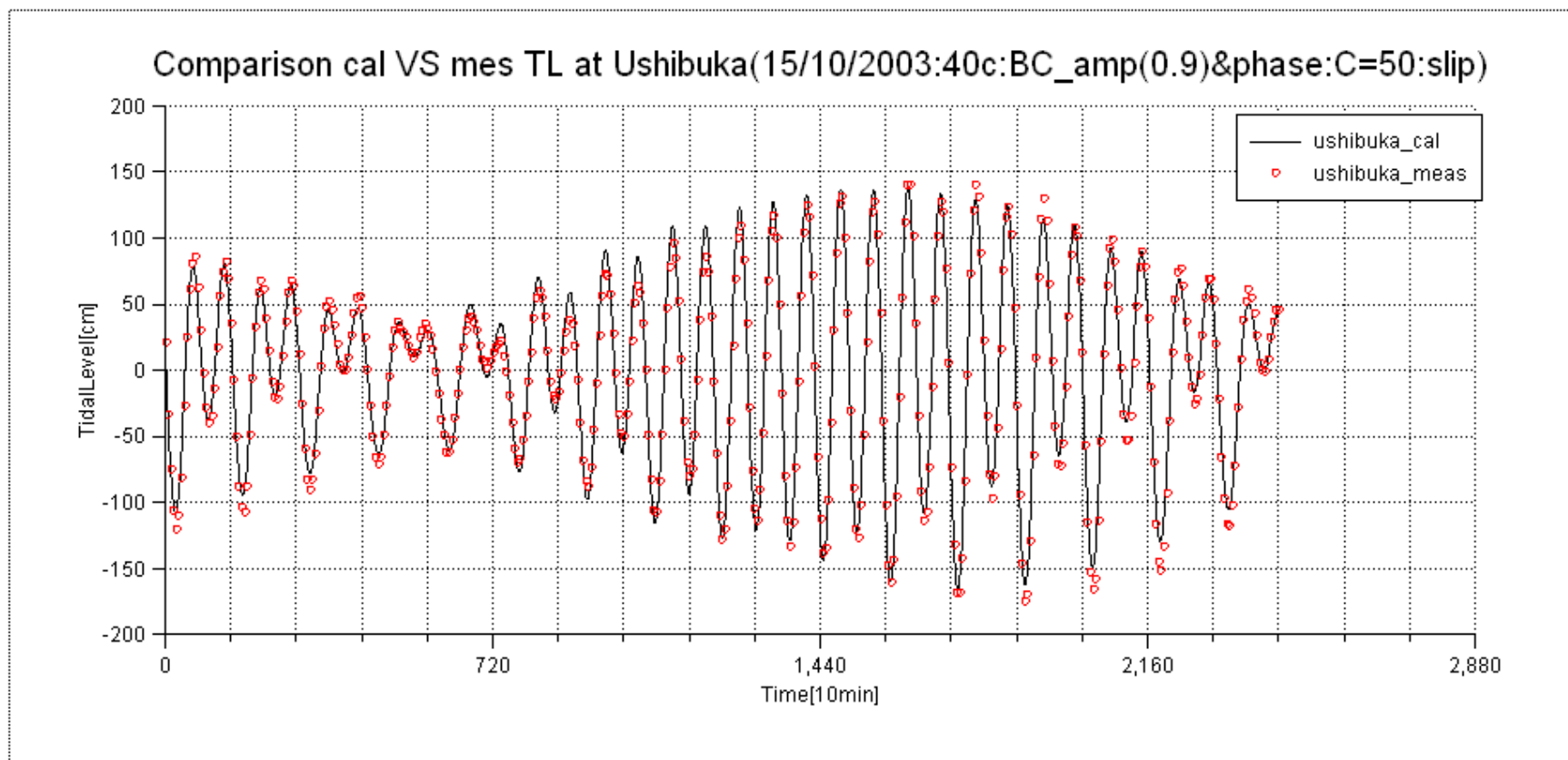
VII. Computational result: 計算結果



temporal variation of tidal level at Kurono-Seto:

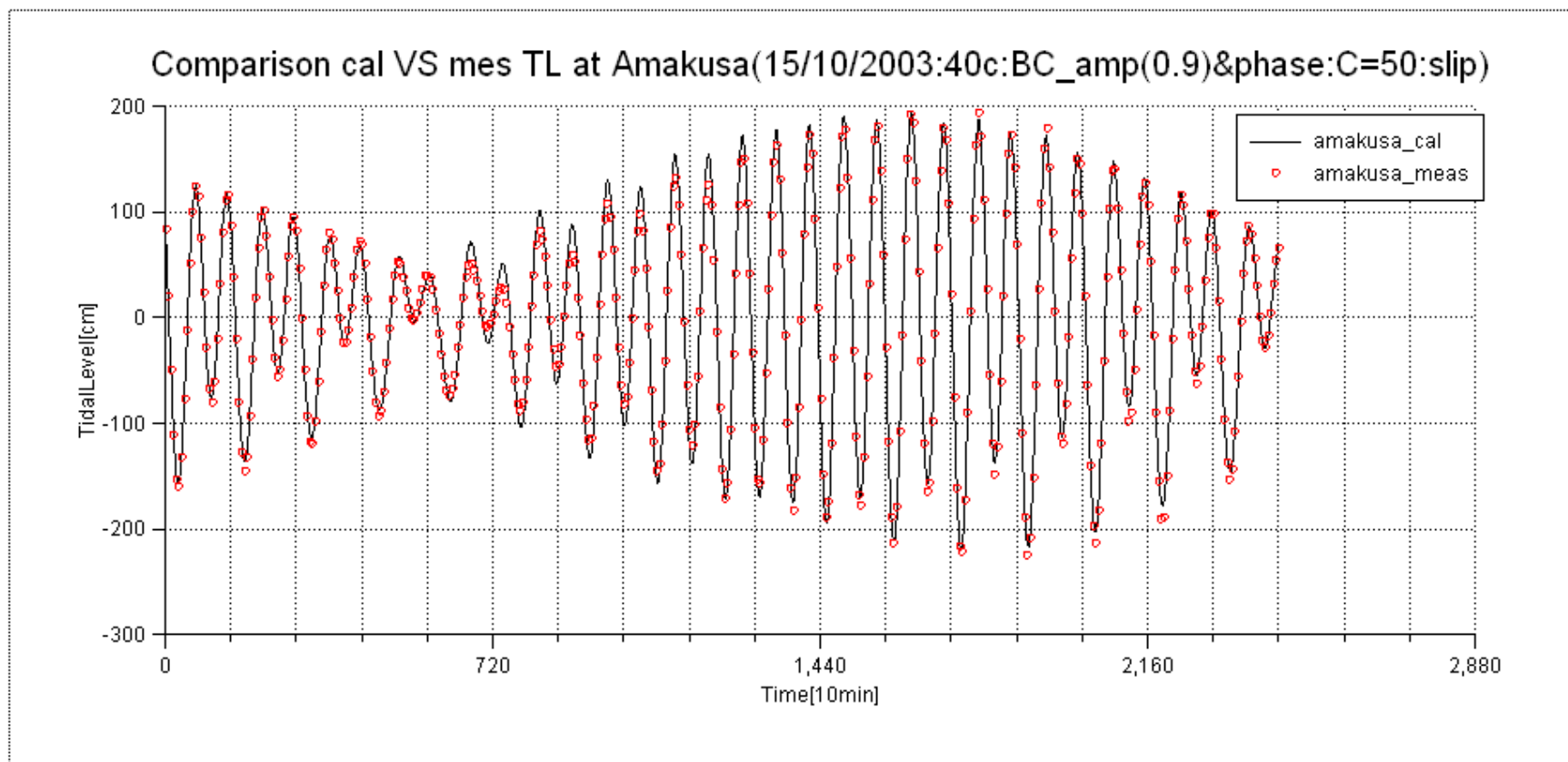
潮汐変動(黒ノ瀬戸)

VII. Computational result: 計算結果



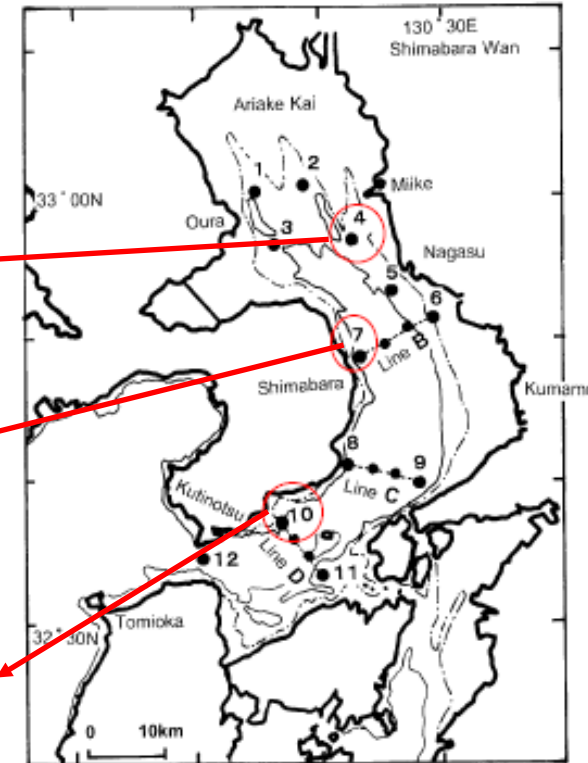
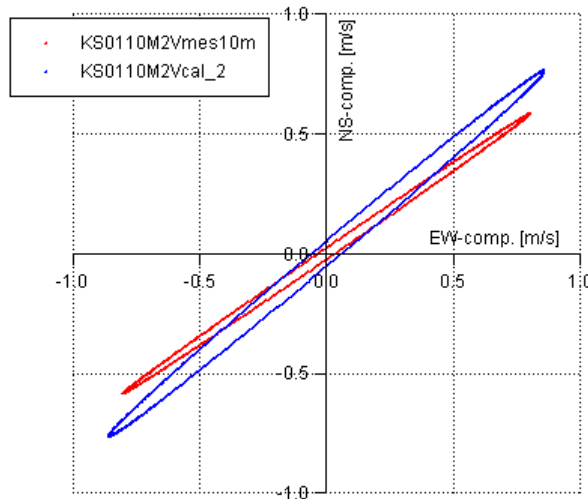
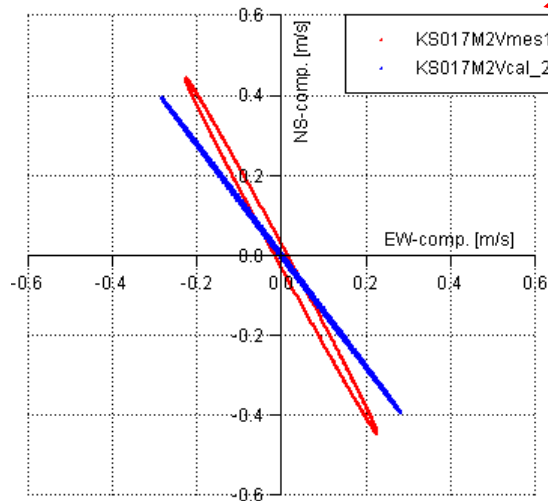
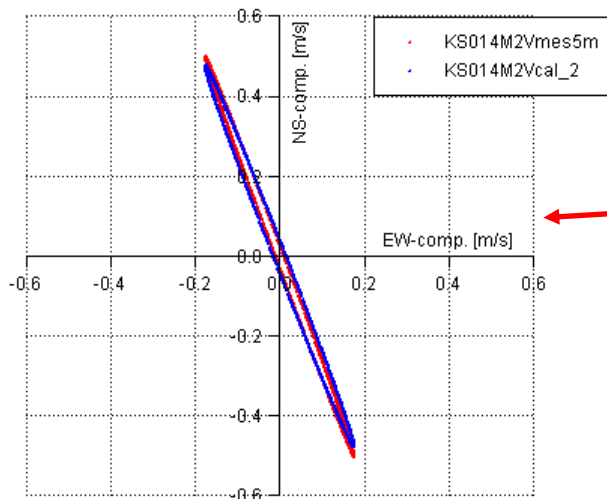
temporal variation of tidal level at Ushibuka: 潮汐変動(牛深)

VII. Computational result: 計算結果



temporal variation of tidal level at Amakusa: 潮汐変動(天草)

Comparison between measured and calculated tidal ellipse: 潮流楕円の比較



Measurement points in
2001 by Odamaki *et al.*
(2003):
小田巻ら(2003)による観
測地点



VIII. Fine (cohesive) sediment transport model: 微細土砂(粘着性堆積物)の輸送モデル

Advection-Diffusion eq. for sediment (土砂の輸送方程式)

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + V \frac{\partial c}{\partial y} + (W - w_s) \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{tH} \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{tH} \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{tV} \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

- Numerical experiment for erosion/sedimentation of fine sediment (mud, silt)

粘着性堆積物(泥, シルトなど)の浸食・堆積傾向のテスト計算

・to confirm characteristics of erosion/sedimentation of fine sediment in Ariake Bay and Yatsushiro Bay

: 有明海, 八代海において一定厚の底泥が分布している場合の浸食・堆積傾向の確認



Parameters: 計算パラメータ

Settling velocity (沈降速度): $w_s=1.8\text{mm/s}$ (Nakagawa&Yoshida,2008)

Critical shear stress for deposition
(堆積に対する限界せん断応力): $\tau_{cr,d}=1000\text{N/m}^2$ (default)

Critical shear stress for erosion
(浸食に対する限界せん断応力): $\tau_{cr,e}=0.025\text{N/m}^2$ (N&Y,2008)

Erosion parameter (浸食パラメータ): $M=0.00033\text{ kg/m}^2/\text{s}$ (N&Y,2008)

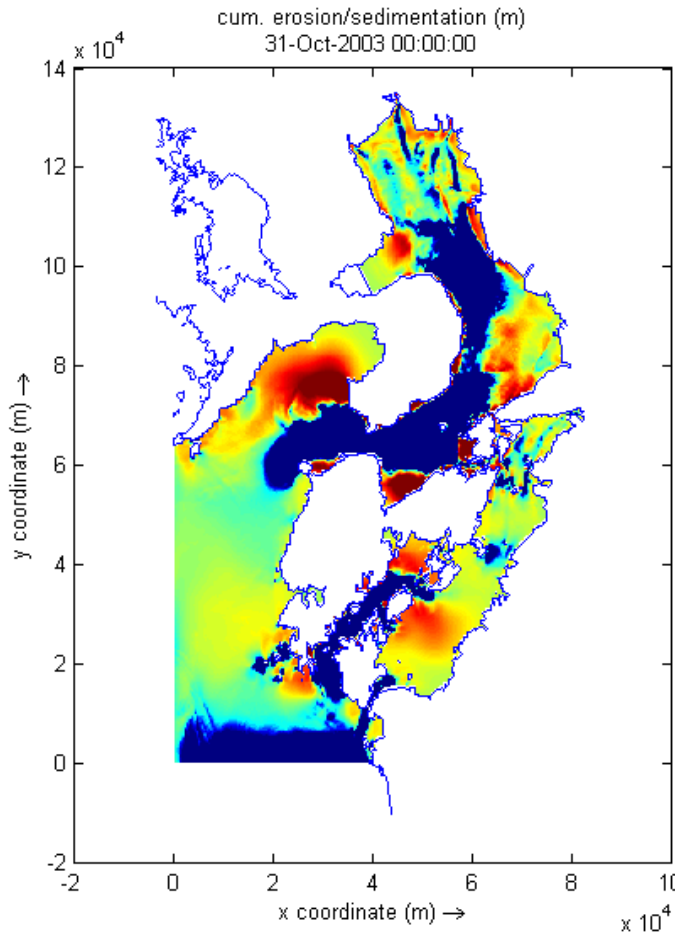
Reference density (基準土砂密度): $C_{soil}=1600\text{ kg/m}^3$ (default)

Note: These values were determined for Ariake Sea.

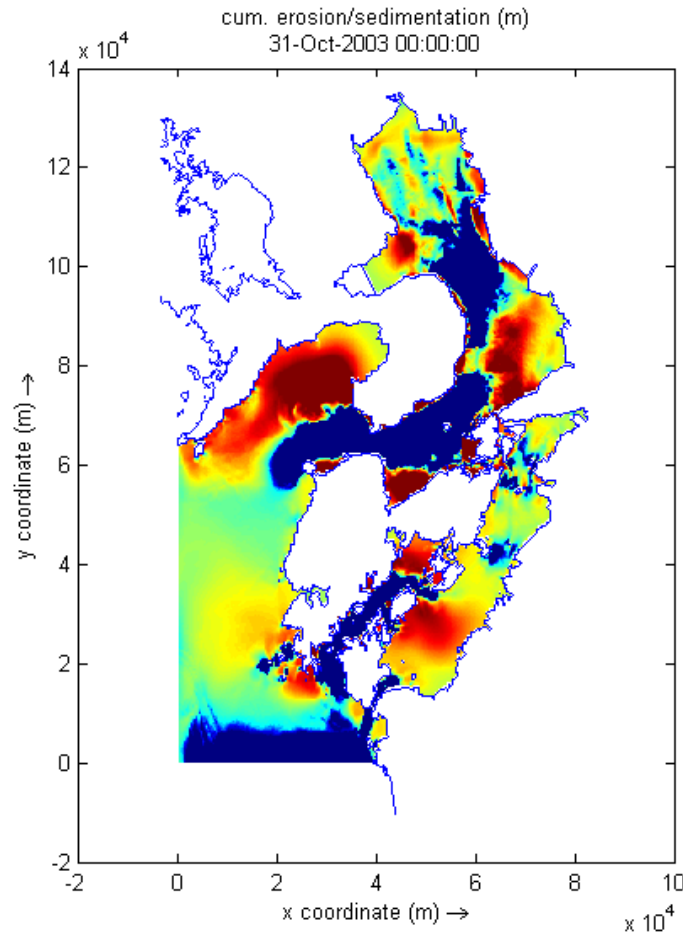
注意:これらの値は有明海について同定されたものである。



Comparison with cumulative sedimentation/erosion(1 month later): 堆積・浸食の比較(1ヶ月後)

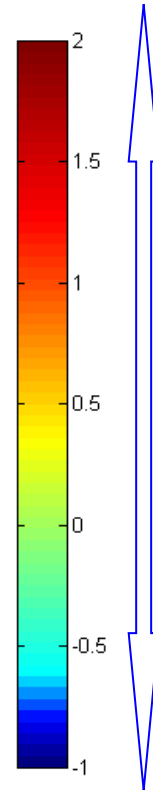


the present (現況)



no tidal flat (干潟無し)

sedimentation :
堆積



erosion : 浸食



IX. Plan for mercury cycling modeling

:水銀変化モデリングの計画

- 2 components: Total-Hg, MM-Hg
:2成分(総水銀, メチル水銀)
- methylation/demethylation processes
:メチル化／無機化過程
- settling, resuspension
:沈降, 再懸濁過程
- Hydrodynamic advection-diffusion
:流体力学的な移流・拡散過程
- not to take into account air-water exchange, biouptake, transformation in bottom sediment,
:大気－海水間の交換, 生物の取り込み, 底泥内変化は考慮しない



X. Conclusions: 終わりに

- Our attempt to develop new numerical model for mercury fate in MB is quite primitive. We need many data from in-site measurements and laboratory experiments, and also correction from other sectors.

:我々の数値モデルの開発はまだ始まったばかりであり、今後の進展のためには、多くの現地調査、データ収集、室内実験が必要と考えられる。



■ further datasets: 今後必要なデータセット

-bottom sediment features (ex. grain size distribution, critical shear stress, etc.)

:底質の性状データ(粒度分布, 限界せん断応力など)

-discharge of B-class rivers around MB

:水俣湾周辺の2級河川などの流量データ

-relation between mercury concentration and grain size of sediment

:底質中水銀の粒度別分布特性

-precise bathymetry in MB

:精密な水俣湾の地形データ

-measured current data in YS

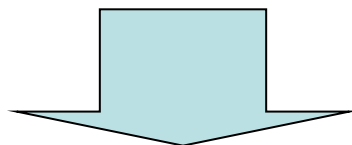
:八代海の潮流実測データ

etc.

■ further knowledge : 今後必要な知見

- governing methylation/de-methylation process in MB
 - effects of salinity, temperature, SS, light condition, etc?
:水俣湾で支配的なメチル化機構の特定とモデル化
塩分, 水温, SS, 光条件などの影響?
- exchange rate of mercury between sea and air
:海面-大気間の水銀交換速度
- mercury process in pore water in bottom sediment
:底質間隙水中の水銀の反応過程

etc.



Interdisciplinary collaborations: 学際的共同研究

Thank you

for your kind attention!

ご清聴ありがとうございました！



Bed boundary condition: 底面境界条件

At $z=z_b$,

$$-D_{tV} \frac{\partial c}{\partial z} = D - E$$

where

D_{tV} : vertical eddy diffusivity : 鉛直乱流拡散係数 [m^2/s],

D : deposition rate : 堆積速度 [$kg/m^2/s$],

E : erosion rate : 浸食速度 [$kg/m^2/s$].

Deposition rate : 堆積速度

Krone's formula クロンの式 (Krone, 1962):

$$D = w_s c \left(1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cr,d}} \right) ; \tau_b < \tau_{cr,d}$$
$$= 0 \quad ; \tau_b > \tau_{cr,d}$$

where

c : sediment concentration in bottom layer : 海底直上の土砂濃度 [kg/m³],

τ_b : bottom shear stress : 底面せん断応力 [N/m²],

$\tau_{cr,d}$: critical shear stress for deposition : 限界せん断応力 [N/m²].

Erosion rate : 浸食速度

Ariathurai(1974)-Partheniades(1962) formula:

$$E = M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{cr,e}} - 1 \right) ; \tau_b > \tau_{cr,e}$$
$$= 0 \quad ; \tau_b < \tau_{cr,e}$$

where

M : erosion parameter : 浸食パラメータ [kg/m²/s],

τ_b : bottom shear stress : 底面せん断応力 [N/m²],

$\tau_{cr,e}$: critical shear stress for erosion : 限界せん断応力 [N/m²].

On development of a numerical model for understanding mercury behaviors in Minamata Bay

Shinichiro YANO, Kyushu University

A major part of mercury has been removed by dredging bottom sediment highly contaminated by mercury (>25ppm, dry weight) and disposal them by coastal reclamation in Minamata Bay. However, bottom sediment contaminated by low level mercury (<25ppm) was not dredged. Thus, low mercury less than 10ppm has remained in bottom sediment at the present day [Tomiyasu et al., 2006], and has been spreading in the southern part of Yatsushiro Sea [Tomiyasu et al., 2000].

In addition, it is considered that rest of the useful life of sheet pile cell used for the reclamation may be approximately 20 years. So, we need to devise some countermeasures to prevent from leakage of sediment containing very high mercury. From a perspective of understanding mercury behaviors and risk management, it becomes to be necessary that a numerical model to reproduce and predict mercury fate for a long-term from a few months to one year (or more) in Minamata Bay is developed.

Since 2001, our research group has been trying to understand characteristics of hydrodynamics (tidal currents, density currents, drift currents and stratification) [Tada et al., 2005], sediment transport (horizontal SS and suspended mercury exchange between Minamata Bay and the Yatsushiro Sea) [Yano et al., 2003; 2004; 2006] and mercury profile (dissolved/suspended total/mono-methyl mercury) in water column [Matsuyama et al., in preparation] by in-site measurements in Minamata Bay. Based on the results of these measurements, we started to develop new numerical model of mercury transport and its transform consisting of three sub-models: a three-dimensional unsteady baroclinic hydrodynamic (HD) module, a sediment transport (SD) module and a mercury transformation (MT) module. Until now, HD and SD modules have been developed for overall Yatsushiro Bay [Yano et al., 2009].

In this presentation, we will report on existing numerical models in coastal environments, progress of development of our numerical model, and additional problems with the further development of accurate numerical model in Minamata Bay.

水俣湾における水銀動態の理解のための数値モデルの開発について

九州大学, 矢野真一郎

高濃度の水銀で汚染された底質 (25ppm 以上, 乾重量) の浚渫と海岸埋立により, 水俣湾における水銀の大部分は除去されている. しかしながら, 低濃度水銀 (25ppm 以下) しか残留していなかった海域の底質については, 浚渫されなかった. したがって, 10ppm 以下の低レベル水銀が現在でも底質中に含まれており [Tomiyasu et al., 2006], 八代海南部に拡がっている [Tomiyasu et al., 2000].

加えて, 埋立に使用された矢板セルの寿命が残り約 20 年程度であると考えられている. よって, 非常に高い水銀を含んだ土砂の漏出を防ぐ方策が必要とされている. 水銀動態の理解とリスク管理の観点から, 水俣湾における数ヶ月から 1 年 (またはもっと多くの年月) の長期間にわたる水銀の動態を再現し予測できる数値モデルの開発が必要となってきた.

2001 年以来, 我々の研究グループは, 水俣湾における流体力学的な特性 (潮流, 密度流, 吹送流, 成層) [Tada et al., 2005], 底質輸送 (水俣湾と八代海の間における水平方向の懸濁物と懸濁態水銀の交換) [Yano et al., 2003, 2004, 2006], ならびに水柱中の水銀の分布 (溶存態/懸濁態の総水銀/メチル水銀) [Matsuyama et al., (準備中)] を理解することを現地調査により試みてきた. これらの調査の結果をもとに, 水銀輸送とその変化の新しい数値モデルの開発が始められている. そのモデルは, 以下の 3 つのサブモデルにより構成されている: 3次元非定常バロクリニック (傾圧) 流体力学 (HD) モジュール, 底質輸送 (SD) モジュール, ならびに水銀変化 (MT) モジュールである. これまでに, 八代海全体を対象とした HD モジュールと SD モジュールについては開発済みである [Yano et al., 2009].

今回の発表では, 沿岸域環境中における既存の数値モデル, 我々の数値モデルの開発状況, ならびに水俣湾における精度良い数値モデル構築に向けての問題点について報告したい.