

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420525

研究課題名(和文)干潟底質環境総合解析モデルの構築と実用化

研究課題名(英文)Tidal flat sediments environment comprehensive analysis model and its practical application

研究代表者

山下 隆男 (Takao, Yamashita)

広島大学・国際協力研究科・教授

研究者番号：30111983

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：河川では浮遊していたシルト成分は、河口水の濃度の増加に応じてフロックと呼ばれる凝集体を形成し、沈降して干潟の土砂成分となる。フロックや砂を運搬する河口域での平均流は、潮汐、吹送流、波浪流の他に、塩分濃度と水温で決まる浮力の影響を受ける。このような土砂動態を再現する干潟底質環境モデルの構築を行った。干潟環境を再現するために、干潟底質環境モデルの他に、降雨、水文流出、河川・海岸流、海上風、海岸波浪、外洋環境のモデルを結合させた大規模な数値モデルの集合体である干潟底質環境総合解析モデルの構築を行った。さらに、近未来気候変動予測モデルの結果から、気象、水文、河川、海洋環境の変化を知る手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：Silt components suspended in the rivers, aggregate to form so called flocs with an increase in positive ion concentration of estuarine water, resulting in settlement of tidal flat sediment. The mean flow at the estuary that transports the flock and sand, are affected by tide, wind currents, wave induced flow, and the buoyancy determined by the salinity and water temperature. Establishment of sediment environment model at tidal flat were carried out in this study to reproduce such a complex sediment dynamics. Other models for precipitation, hydrological runoff, rivers and coastal currents, sea surface wind fields, coastal waves, and open ocean environment, were bound as a collected large-scale numerical model system to construct a comprehensive analysis model for tidal flat sediments environment that was applied not only for historical environment reproduction but also prediction of the future tidal flat environment based on the output of near future climate change model.

研究分野：海岸工学

キーワード：干潟土砂環境 海洋モデル 波浪モデル フロック 近未来気候変動 水文流出モデル シルト・砂

## 1. 研究開始当初の背景

粘土・シルトなどの粘着性底質は、河川などの淡水域から塩水域の海域へ流出するとflocが形成されて、沈降が加速される。さらに、底層には高濃度流動層(CBS層と呼ばれる高濃度層)が形成される。エスチャリーに見られる淡水と塩水とが混合する海域における粘着性底質の挙動には、このようなfloc形成による凝集・沈降および高濃度流動層の存在などが大きく関与する。さらに、堆積および再浮上過程には堆積した底泥層の圧密による密度変化が影響するなど、幾つかの現象が複雑に絡んでいる。

エスチャリーでの流況場および土砂輸送を計算する代表的なモデルとしては、ECOMSEDが知られている(HydroQual, 2002.)。

ECOMSEDは、海洋モデルPOM(Princeton Ocean Model)のエスチャリー版であり、沿岸域および湖沼での3次元の流体運動、粘着性・非粘着性底質の輸送および地形変化を対象とするモデルである(Mellor, 1998)。一方、1990年代に欧州連合で実施されたMAST-IIIのCOSINUSプロジェクトにおいては、エスチャリーおよび沿岸域における粘着性底質の挙動に関する大きな研究成果が得られているが、我が国においてはこの成果が干潟底質環境モデルとして、実務面で十分に適用されているとは言い難い。

COSINUSプロジェクトにおける主な成果は、i) 浮遊底質と乱流との相互作用、ii) flocの成長に及ぼす流れのせん断応力と濃度の関係式、iii) 圧密による堆積層の強度増加機構、iv) 沈降抑制効果による高密度界面の形成、v) 高密度界面に形成される内部波とその不安定化による鉛直混合および乱流の生成、vi) CBS層、fluid mud層および圧密層からなる堆積層のモデル化、vii) CBS層・fluid mud層の流動モデル、圧密過程モデルのモデル化などである(Winterwerp, 1999, Winterwerpら, 2002)。

申請者は、エスチャリーを対象とす

るECOMSEDに、それらのCOSINUSプロジェクトにおける粘着性底質に対する研究成果を取り込んだ形で、干潟底質環境モデルを開発してきた(2005-2010)。

ここでは、粘着性底質を重量濃度で鉛直成層を考慮し、CBS層として、濃度が100mg/L以下のLow-Concentrated Mud Suspension(LCMS)と濃度が100~1000mg/LのHigh-Concentrated Mud Suspension(HCMS)を設定し、Fluid Mud層としては濃度が10~100g/Lの層を定義し、両者を総称して高濃度流動層と定義した。さらに、バロクリニック流動場と高濃度流動層を結合させる為には、Bingham塑性流体としての構成式を流動モデルに反映させ、高濃度流動層の形成を考慮した堆積モデルの導入が必要で、CBS層ではその上層の乱流の影響を受ける乱れを伴うゲル状の浮泥層として、fluid mud層では、乱れを伴わない層流状に流れる浮泥層を考え、圧密層に遷移させるモデルとした。

## 2. 研究の目的

平成25年度:

(1)バロクリニック流体モデル: 平均流場は海洋モデルPOM, 乱流場はMellor-Yamada乱流モデル, 水温・塩分濃度はこれらの移流・拡散モデル, 浮遊底質と乱流との相互作用, さらに鉱物素粒子のfloc形成モデル(floc個数密度Nと重量密度Cの保存式で構成)で構成される。CBS層の流動場もこのモデルで解析される。

(2)高濃度流動層モデル: Fluid mud層は、海底面付近に粘着性底質により形成される高濃度の流動層で、その境界には、Lutocline layerと呼ばれる濃度躍層が形成される。質量濃度が100g/L以上になると流動しない圧密層が形成される。これらの高濃度流動層~圧密層に対して、floc構成にフラクタル次元の概念を用いて有効応力を設定し、Gibson方程式より高濃度流動層から圧密層への重量濃度が連続的に変化する高濃度流動層・圧密層に対する移

流・拡散モデルを構築する。本研究で用いるモデルでは、地形変化に伴う流況場の変化までは考慮するため、地形変化に伴う海底の変動量を組み込んだ鉛直座標系を導入する。さらに、実海域での底質はシルト・粘土および砂で構成されているため、非粘着性底質（砂質成分）に対する流動モデルを構築し海面から海底（圧密層）まで一貫した流動モデルを構築した。

バロクリニック流動場での鉱物粒子の floc 形成過程、高濃度流動層（CBS 層, fluid mud 層）および Cohesive bed の圧密過程を考慮する干潟底質環境モデルは既に作成しており、本研究では、人工干潟での観測データを用いて、「干潟底質環境モデル」の検証解析を行う。

#### 平成 26 年度：

日射, 降雨, 海上風場：気象観測データ, 気象再解析データまたはメソ気象モデル（WRF）により解析。

波浪流（吹送流, 沿岸流）：浅海域波浪モデル SWAN の白波砕波, および水深規定砕波エネルギー減衰項の総和から海面に作用する砕波せん断応力を計算し, 波浪エネルギーの流れ場へのエネルギー伝達を解析する。浅海域では, 潮汐流よりも波浪流（深海域では吹送流, 砕波帯近傍では沿岸流と定義される）によって物質輸送の量と方向が規定されるため, これが流動場の主たる外力となる。

潮流, 河川流入, 外洋環境：潮汐計算には Matsumoto の NAOtide モデル, 河川からの淡水流量や物質輸送には水文モデル HSPF を用いる。また, 外洋での水温, 塩分濃度, 流れ場の情報は, 初期境界条件として FRA-JCOPE データを用いる。以上により, 外洋, 河川, 気象の影響を考慮した「干潟底質環境総合解析モデル」を構築する。

#### 平成 27 年度：

干潟底質環境総合解析モデルを, 有明海・八代海系および周防灘の新門司緑人工干潟の流動場に適用する。

干潟環境の将来予測のために, 気候変動および海面上昇に関する気候変動予測データベースと海面高度観測データを解析する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 干潟底質環境モデルの構築

既往 ECOMSED+COSINUS モデルでは, 高濃度流動層モデルは, 特に流況場モデルと完全には結合されていない。流況場モデルと高濃度流動層モデルを結合させるためには, Bingham 塑性流体としての構成式を流況モデルへ反射させる必要がある。また, 浮遊底質（LCMS, HCMS）から高濃度流動層（fluid mud）へ接続する浮遊底質モデルの構築, 高濃度流動層の形成を考慮した堆積モデルの導入などが必要である。ここでは, それらのモデルの構築・導入を行うことにより, 流況場, floc および高濃度流動層の結合を行う。

浅い海域では地形変化に伴う流況場等の変化は無視できないため, 干潟底質環境モデルではそれを考慮できるモデルとして構築する必要がある。そこで干潟底質環境モデル構築にあたっては, 鉛直座標系に地形変化に伴う海底の変動を組み込むことにより, 地形変化に伴う流況場等の変化を考慮できるモデルを構築する。

#### 3.2 JCOPE データおよび気象データ

JCOPE データおよび気象データは, 2000 年から 2013 年までのデータを収集・整理した。このうち, 前者の JCOPE（日本沿海予測可能性実験：JCOPE）データは, 宇宙開発事業団と海洋科学技術センター（JAMSTEC）宇宙開発事業団と海洋科学技術センターによって共同運営されていた地球変動予測研究計画によって開始された海中天気の予測システム（2001 年 12 月から開始）による予測データである。さらに, 気象データ（風向・風速, 降水, 日射等）として, 気象庁の数値予報 GPV（Grid Point Value）を収集し, JCOPE データと同様に整理する。

#### 3.3 水文流出解析

BASINS4.1\_HSPF による水文流出解析モデルを構築する。対象河川は、筑後川、球磨川で、河川流量、水質データを収集、整理する。日射量は日最低・最高気温から推定できるが、これを検証するため、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）による日射量データベースを収集、解析する。これらのデータはBASINS4.1\_HSPFによる水文流出解析モデルのパラメーター同定に用いる。

### 3.4 海面上昇と近未来気候変動予測

IPCC, CMIP5 の MIROC4h による近未来気候変動予測結果および NASA の海面変動再構築データ（RESTRUCTURED SEA LEVEL VERSION1）を用いて、以下の解析を行った。

(1) 降水量:MIROC4h の日降水量データを解析し、2014 年に JAXA が公開した GSMaP (Global Satellite Mapping for Precipitation)の降雨観測データによりモデル検証を行うとともに、予測・観測が重複する 2006~2015 年間の比較から予測誤差の特性を見出し、将来予測値の修正アルゴリズムを作成する。

(2) 日最高・最低気温:MIROC4h の予測結果をアジア・オセアニア地域で解析し、水文流出モデルの蒸発散解析に用いる。

(3) 台風:MIROC4h の海上風から渦度を解析し、閾値より高い渦度を持つ気象じょう乱を台風中心であると見なし、これが3日以上継続するものを、台風として抽出する。

(4) 海面上昇:長期間の潮位計のレコードと短期間の衛星高度計のグローバルカバレッジを使用して、潮位計と衛星高度計を組み合わせた解析から、1950年から2009年までの1週間平均の時間分解能と0.5度の空間分解能を持った全球の相対的海面変動データベースである。これを用いて季節変動を考慮した自己相関和分移動平均過程から海面上昇の将来予測を行う。

### 3.5 干潟底質環境総合解析モデル

干潟底質環境モデルに、上述の機能を結合させ、「干潟底質環境総合解析モデル」を構築

するとともに、気候変動の近未来予測結果とを解析し、降雨、気温、台風、海面上昇の将来予測結果を構築した干潟モデルに適用する。

## 4. 研究成果

### 4.1 干潟底質環境モデル

エスチャリーでの流況場および土砂輸送を計算する代表的なモデルとしては、ECOMSED が知られている（HydroQual, 2002.）。ECOMSED は、海洋モデル POM (Princeton Ocean Model)のエスチャリー版であり、沿岸域および湖沼での3次元の流体運動、粘着性・非粘着性底質の輸送および地形変化を対象とするモデルである。一方、欧州連合(EU)で3年間かけて実施された MASK-IIIの COSINUS プロジェクトにおいて、エスチャリーおよび沿岸域における粘着性底質の挙動に関する大きな成果が得られている。このプロジェクトにおける主な成果は、i)浮遊底質と乱流との相互作用、ii)floc の成長に及ぼす流れのせん断応力と濃度の関係式、iii)圧密による堆積層の強度増加機構、iv)沈降抑制効果による高密度界面の形成、v)高密度界面に形成される内部波とその不安定化による鉛直混合および乱流の生成、vi)CBS 層、fluid mud 層および圧密層からなる堆積層のモデル化、vii)CBS 層・fluid mud 層の流動モデル、圧密過程モデルのモデル化などである（Winterwerp, 1999 ; Winterwerp ら, 2002.）。

図1に、COSINUS プロジェクトの成果である粘着性底質の挙動の概念図を示す。

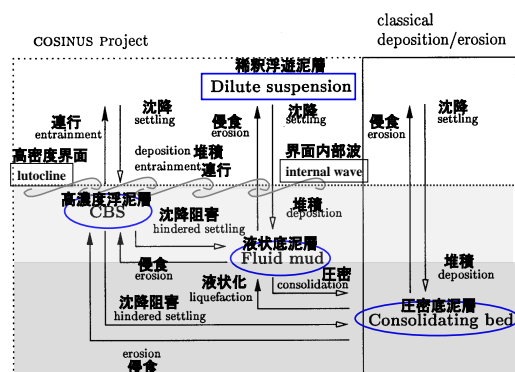


図 1

圧密に対する基礎方程式は、高濃度流動モデルにおける透水係数および有効応力に関連する項のみを考慮した鉛直1次元モデルとして表される。また、圧密層に対する基礎方程式は図2に示すGibson方程式で与えられる。

**Consolidation model**

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = -\rho g = -(1-m)\rho_w g - m\rho_s g \quad \text{Vertical momentum equation}$$

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} = \frac{e}{1+e}\rho_w g + \frac{1}{1+e}\rho_s g$$

$$(1-m)v_f + mv_s = \frac{e}{1+e}v_f + \frac{1}{1+e}v_s = 0 \quad \text{Continuity equation}$$

$$p_w = \sigma_{zz} - \sigma_{zz}^{sk}, \quad v_s = k + \frac{k}{\rho_w g} \left( \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} - \frac{\partial \sigma_{zz}^{sk}}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + (1+e)^2 \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v_s}{1+e} \right) = 0 \quad \text{Gibson equation}$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + (1+e)^2 \left( \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k}{(1+e)^2} \right) + \left( \frac{1+e}{\rho_w g} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k}{1+e} \frac{\partial \sigma_{zz}^{sk}}{\partial z} \right) = 0$$

図2

ここに、 $k$ : 透水係数、 $e$ : 間隙率、 $\sigma_{zz}$ : 有効応力である。

#### 4.2 有明・八代海への適用

図3にFRA-JCOPEデータを境界条件として接続した場合の解析結果の表層塩分濃の一例を示す。

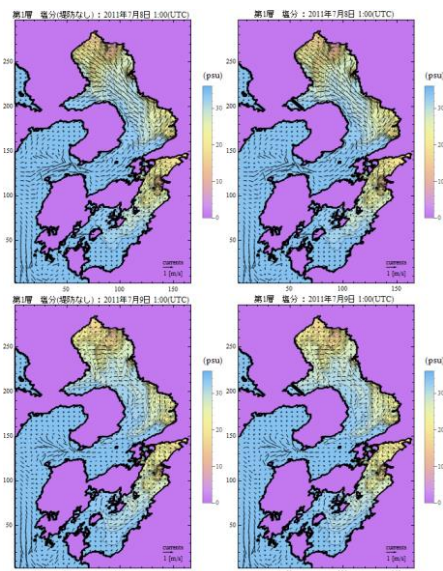


図3

図4に河川流出解析の対象となる八代海・球磨川系の対象範囲と、2006年の南九州豪雨による球磨川の水文流出モデルの結果と観測値の比較を示す。

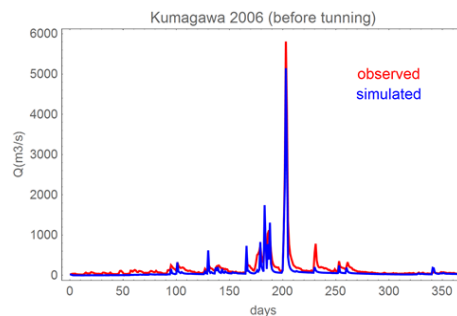
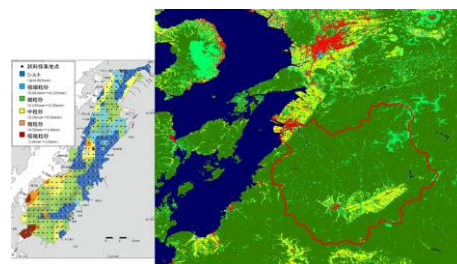


図4

#### 4.3 海面上昇と近未来気候変動予測

図5に、NASAの海面変動再構築データ(青色)を用いて、自己相関和分移動平均過程から海面上昇の将来予測(赤色)を行った結果の天草灘での海面上昇を示す。

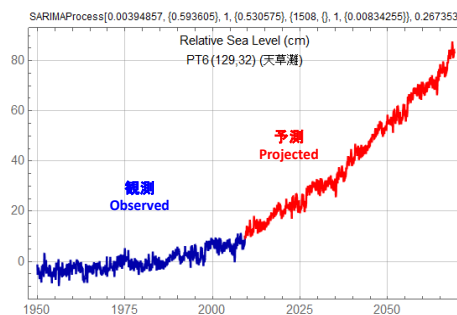


図5

図6にはMIROC4hの海上風将来予測結果から検出した2016年の台風経路を示す。2034年と並んで、2035年までの間で、最も発生台風数が多い年である。

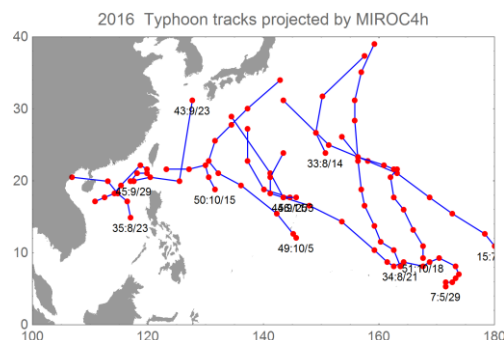


図6

図 7 に、MIROC4h の予測降雨量を修正した結果を、福岡について示す。青は GSMaP の観測降雨で、赤が修正降雨予測である。

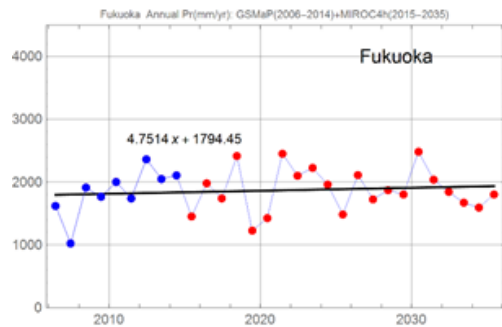


図 7

#### 4.4 干潟底質環境総合解析モデル

干潟底質環境モデルを核として、水文流出モデル、波浪モデルの機能を結合させ、図 8 に示す干潟底質環境総合解析モデルを構築した。さらに、気候変動の近未来予測結果を解析し、降雨、気温、台風、海面上昇の将来予測結果を、構築した干潟底質環境総合解析モデルに適用することで将来予測を可能にした。

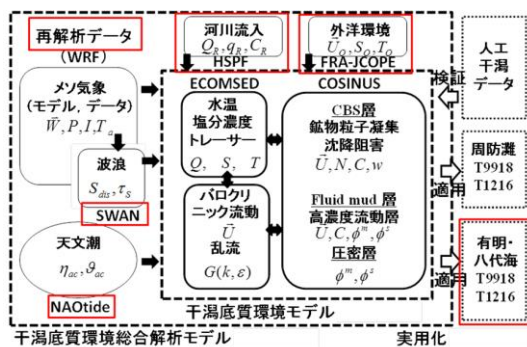


図 8

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

1. Takao Yamashita and Htay Aung: Projection and Historical Analysis of Hydrological Circulation in Sittaung River Basin, Myanmar, Journal of Civil Engineering and Architecture, Volume 9, Number 2, ISSN 1934-7359, 6p., 2016.(査読有り)
2. Tran Thi Khuyen and Yamashita Takao: Coastal Wave Reanalysis in Hue Beach, South China Sea, Journal of International Development and Cooperation, Vol.23-1, 18p., 2016. (査読有り)
3. T.Yamashita, H. Bambang, K. Teti and Hendri; Near-Term Perspective of Ocean Climate

Changes in Indonesia for Tropical Coastal Engineering, Proceedings of the 7th International Conference Asian and Pacific Coasts 2013, pp.944-949, 2013. (査読有り)

4. Takao YAMASHITA and Batincila Glenn: Regional Environment Simulator and Its Applications to Environmental Assessment in Estuary with Consideration of Climate Changes, Special Edition of ITB Journal, pp.327-350, 2013. (査読なし)

[学会発表] (計 6 件)

1. Takao Yamashita: NEAR FUTURE PROJECTION OF PRECIPITATION, TEMPETARURE, TYPHOON AND SEA LEVEL RISE IN ASIA OCEANIA , Vietnam-Japan Workshop on Estuaries, Coasts, and Rivers 2016, Ho Chi Minh, Vietnam, 2016年9月20日～2016年9月21日 (講演確定)
2. Takao Yamashita: Climate Changes and Coastal Processes (招待講演), Coastal Zones 2016, Osaka, 2016年5月16日～2016年5月18日
3. Takao Yamashita: 八代海数値シミュレーションモデルの構築, シンポジウム「八代海の再生をめざして」(招待講演), 熊本大学工学部百周年記念会館, 2015年01月24日。
4. Takao Yamashita: Projection and historical analysis of hydrologic circulation in Myanmar, AOGS 12th Annual Meeting, Singapore, 2015年08月02日～2015年08月07日。
5. Takao Yamashita: Near-Term Perspective of Ocen Climate Changes in Indonesia for Tropical Coastal Engineering, Asian and Pacific Coasts2013(APAC2013), Bali, Indonesia, 2013年09月24日～2013年09月26日。
6. Takao Yamashita: Regional Environment Simulator and Its Applications to Environmental Assessment in Estuary with Consideration of Climate Changes, The Second International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment (SIBE-2013) (招待講演), Bandung, Indonesia, 2013年11月19日～2013年11月20日。

[図書] (計 1 件)

1. Takao Yamashita and Lee HanSoo : Part VII Climate Change and Urbanization, book title: "Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia", Edited by Tetsu Kubota, Hom B. Rijal, Hiroto Takaguchi, Springer, 2016, 18p./400p. (発刊確定)

[その他]

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/~takao52/index.htm>

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

山下 隆男 (Takao Yamashita)  
 広島大学・国際協力研究科・教授  
 研究者番号: 30111983