自然的攪乱後の干潟地盤の自律的再生過程とその数値予測モデルの開発

Autonomous Geomorphic Recovery Process of Tidal Flat after Natural Disaster and its Numerical Model

高橋俊之¹•陸田秀実²•野村 毅³•土井康明⁴

Toshiyuki TAKAHASHI, Hidemi MUTSUDA, Tsuyoshi NOMURA and Yasuaki DOI

To make clear an autonomous geomorphic recovery process of tidal flat after natural disaster such as a powerful typhoon, and to propose technical development of restoration and maintenance in tidal land, we have observed wave height and current in the artificial tidal land and also have investigated autonomous recovery process of soil environment in the artificial tidal land after a natural disaster. We also developed the N disperse-two phase flow model considering both the Newtonian and Bingham fluid to calculate intertidal flow, topography exchange, tidal wave and underground water. The proposed model can explain qualitatively the autonomous geomorphic recovery process of tidal flat after typhoon damage.

1. はじめに

自然・人工干潟の構造と機能を考慮した長期的な安定 性の評価および維持管理方法は,現在でも試行錯誤的に 行われ,それらの技術的課題は多い.自然干潟は,台風 などの大きな自然的攪乱によるダメージを受けても短い 場合には数ヶ月,長くても数年をかけて自律的に回復す ることが知られている.一方,人工的に再生された干潟 が,台風のような大きな自然的攪乱を受けた後,どのよ うなダメージを受け,どのように自律的回復に向かうの か,もしくは,自律的回復をしないのか等については不 明な部分が多く,長期的安定性の評価および維持管理方 法に対する検討は全くされていないのが現状である.

そこで本研究では、自然的攪乱後(台風通過後)の干 潟地盤の自律的再生過程の解明とその数値予測モデルを 開発することを目的として、過去20年に亘り極めて安定 的な干潟を維持している尾道市海老地区の人工干潟を対 象に、2007年8月に来襲した台風通過前後の干潟物理環 境の現地調査を行い、その自律的回復過程を調べる。ま た、ニュートン・ビンガム流体を仮定したN分散相二流 体モデルに基づく干潟域の流動及び粒径別土壌挙動解析 手法を構築し、台風ダメージ後の人工干潟の地盤環境が 自律的に回復するメカニズムを検証する。

2. 現地観測概要と結果

(1) 観測概要

図-1は、平成元年に造成された尾道市海老地区人工干

1 正 会 員 2 正 会 員	博(工) 博(工)	復建調査設計株式会社 広島大学准教授大学院工学研究科社会環 境システム専攻
3 非 会 員		広島大学大学院工学研究科社会環境シス テム専攻
4 正 会 員	工博	広島大学教授大学院工学研究科社会環境 システム専攻

潟(約16ha)の概略図である.本干潟は,過去20年間, 地形・粒度組成等の物理環境が極めて安定であり,かつ, 生物環境も豊かな人工干潟として有名である.なお,本 干潟の東側隣接地にはアサリ養殖場があり,また,近く には造船所があるなど,年間を通じて波浪条件も穏やか な海域である.



図-1 観測対象とした尾道市海老地区人工干潟

観測期間は、台風前後の干潟の物理環境を把握するために、台風来襲前の2006年7月22日~8月10日と、台風来 襲後の2007年8月9日~11月22日とした.なお、この観測 期間中の台風は、2007年8月2日正午から未明にかけて最 も接近していた.計測は、図-2に示すように流向・流速 計,波高計を設置するとともに、毎月1回、8ヶ所の表層 の土壌粒径調査ならびに5測線の地形測量を行った.また、本観測では、細砂、シルト、粘土等の粒径別の流出・ 堆積挙動の変化過程を調べることを目的として、2006年 7月観測開始時、観測干潟中央付近に図-2に示すような 試験区画(2m×2m×0.7m)を設けた.本干潟の土壌粒 径とは大きく異なるシルト粘土分を多く含む浚渫土砂を



図-2 試験区画の概要図と観測機器の設置図

敷設(厚さ0.26m)し、その上を砂分で被覆(厚さ0.3m) した. なお、鉛直方向に5cm刻みで土壌採取し、粒度組 成を調べた.

(2) 観測結果

分かる (図-3(d)).

図-3は、対象干潟の測量結果から地盤高を求め、その 月毎の差を算出し、堆積・侵食傾向の空間分布を調べた ものである.正値は堆積傾向、負値は侵食傾向を示して いる.図より、台風ダメージ直後は、岸側で凸型の堆積 傾向の領域が出現している一方で、中央の凹域を含めて 沖側で顕著な侵食傾向となっている(図-3(a)).その後、 1ヶ月を経過しても侵食傾向が続いている(図-3(b)). これは、台風ダメージ後、侵食地形と外力(波浪・潮流) による力学バランスが崩れ、一層、侵食傾向の強い干潟 の物理環境へと遷移したことを意味している.約3ヵ月 後、堆積傾向の分布域がパッチ状に現れ始め(図-3(c))、 4ヶ月後には干潟全域で堆積傾向がさらに強まることが

図-4は、地盤高に基づいて簡易推定された総土壌量の 月別変化を示したものである。台風通過直後に総土壌量 は減少し、その傾向は1ヶ月後も続いていることが分か る。台風通過2ヶ月後に、ようやく増加傾向に転じ、そ の後、総土壌量は回復し続けていることが分かる。

図-5は、M3測点および試験区画における干潟土壌の 粒度組成の月別変化を調べたものである。台風直後に大 きな侵食傾向となったM3測点の粒度組成は、ほとんど 変化がないことが分かる。他の測点でも同様の傾向が見 られたことから、本対象干潟は水平・鉛直方向ともにほ





図-3 地盤高の増減傾向からみた干潟の堆積・侵食傾向

図-4 台風前後の総土壌推定量の変動特性

ぼ一様な粒径分布を有した干潟であることが分かる.そ の一方で,試験区画の粒度組成は台風前後で大きく変化 していることが分かる.台風ダメージ直後の観測で,試 験区画に被覆した厚さ0.3mの土壌の大半が侵食・流出 し,その下層に敷設したシルト粘土含有量の多い浚渫土 砂の上層の大部分が露出していたことを確認している. つまり,台風通過直後,この浚渫土壌の露出によって粒 度組成が大きく変化し,その結果として,シルト粘土分 の増大,砂・礫分の減少傾向となったことを意味してい る.その後,試験区画では,数ヶ月間で砂分が急激に回 復傾向にあることが分かる.これは,試験区画周辺の干 潟土壌が潮流・波浪によって移流・拡散し,露出した浚 渫土砂の表層に堆積していったことが原因と考えられる.

また,以上のような土壤粒径・地形の堆積・侵食傾向 が岸沖平均流速(干潟中央部)に与える影響について示



図-6 台風前後の岸沖平均流速の変化(観測結果)

したものが、図-6である.図より、台風直後の侵食傾向 の強い時期では沖向き流速が卓越するものの、台風通過 数ヶ月後の堆積傾向に転じる時期のそれは弱くなってい ることが分かる.また、その絶対値は台風通過前の流速 とほぼ同程度にまで回復することが確認された.

以上の観測結果から、本研究で対象とした人工干潟は 台風攪乱直後しばらくは侵食傾向が続くものの、波浪・ 潮汐と干潟地形との力学バランスが徐々に回復すること で、沖向き流速が減少するとともに、土壌堆積傾向が強 まり、わずか数ヶ月で台風ダメージ前の干潟地形・粒度 組成へと、自律的に回復する事実が明らかとなった.

次章では、このような干潟地盤の自律的再生メカニズ ムを再現することが可能な数値モデルを開発し、現地観 測結果との整合性について検証する. 3. 数値予測モデルによる地形・粒径回復過程

(1) 数値計算法の概要

著者らは干潟域の地形変化予測のための新たな数値モ デルとしてN分散相二流体モデルを提案している(陸田 ら、2005;高橋ら、2006a、2006b). これは、流体及び 土壌の領域を、各々相体積率 $\alpha_L \alpha_{dm}$ (m=1~N)を用い た連続液相と粒子分散相(N種類)で構成される混相流 場として捉えたEuler-Eulerカップリングモデルであり、 各相の質量保存則と運動量保存則を連立させ、各相の運 動量保存則に相間相互作用項 M_{Ldm} を考慮している.ま た、相互作用項の算定にはErgun (1952)及びWenら (1966)の研究に基づいた流体抵抗係数を用いている. これまでに干潟地形の変化、土壌粒径別挙動、地下水面 挙動の計算を行い、その有用性を確認してきたが、土壌 の挙動については、ニュートン流体として取り扱ってい たため、土壌の粘度やせん断抵抗など、力学的特性は考 慮されていなかった.

そこで、本論では土壌の物理的性質を考慮するために、 新たに粒子分散相構成式にビンガム流体モデルを適用し た.また、巻き上げられた底質の移流・拡散や沈降過程 については、土壌面よりも上方の液相領域に対して移流 拡散方程式を解き、沈降速度の算定には、相体積率の変 化を考慮したRichardsonら(1954)による実験式を用い た.以降では、ビンガム流体モデルの取り扱いについて 示すとともに、現地で観測された台風通過後の干潟地形 や粒度組成の再生過程に準ずる数値実験を行い、本モデ ルの有用性を検証する。

(2) ビンガム流体モデル

非圧縮性を仮定したNewton流体における応力テンソルの粘性成分は式(1)に示すとおりである.

$$\tau_{ij} = 2\eta D_{ij} \tag{1}$$

ここに、 η は粘度に相当する係数、 D_{ij} はひずみ速度テンソルで式(2)に示すとおりである.

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$
(2)

渦岡(2000)は液状化した土壌の挙動を流体力学的アプ ローチによる解析方法について検討し,式(3)に示すビ ンガム流体を取り入れている.

$$\begin{cases} \tau_{ij} = \tau_0 + \eta_{\nu} \dot{\gamma}_{ij} & |\tau_{ij}| \ge \tau_0 \\ \dot{\gamma}_{ij} = 0 & |\tau_{ij}| < \tau_0 \end{cases}$$
(3)

ここで、 $\dot{r}_{ij} = 2D_{ij}, \tau_0$ はビンガム降伏値, η_p は塑性粘度 である.一方で、渦岡が提案している式(3)の形式では 不連続となるため、藤田ら(2005)は自然対数の関数形 で近似した式(4)を用いた数値解析を行っている.本研 究では,藤田らと同様の近似式を用いてモデルの改良を 行った.

$$\tau_{ij} = \left(\eta_p + \frac{\tau_0}{|\dot{\gamma}|} \left(1 - e^{-m|\dot{\gamma}|} \right) \right) \dot{\gamma}_{ij}$$
(1)

$$\dot{\gamma} = \left[\frac{1}{2} \sum_{1 \le i, j \le \text{dim}} \dot{\gamma}_{ij}^2\right]^{1/2}$$
(2)

ここで,mは応力成長指数で時間の次元をもつ.なお, 藤田ら (2005) によると,m=1000 程度で近似精度が高く なることが報告されている.

(3) 計算条件

計算領域は図-7に示すように、岸沖方向2500m,沿岸 方向1750mで1/500の一様勾配地形とした。計算領域内 には現地観測同様に、2種類の領域を設定し、領域2は周 囲土壌面(領域1)よりも土壌表面が0.5m低い窪地地形と した. 土壌初期条件は表-1に示すとおり、粒径区分は3 種類(細砂0.5mm, シルト0.075mm, 粘土0.005mm)と して,領域1と領域2ではそれぞれ砂泥質,泥質(シル ト粘土分含有率80%)とした.外力条件は、計算領域沖 側で振幅1.0m,周期半日で強制的に水位変動を与えた。 時間刻みは外部モード1s,内部モード5sとして、計算時 間は15日間(30潮汐)とし、3.75日のスピンアップ期間 とした.水平渦動粘性係数はスマゴリンスキーモデル, 鉛直渦動粘性係数は Mellor-Yamada モデルにより求めた. 水平格子は50m等間隔正方格子とし、鉛直方向は15層に 分割した.なお、潮位振幅を考慮して初期水面(z=0.0m) より 2.0m 上を計算領域上端とし、土壌面より下方には 0.5m 間隔で9層設定した.

(4) 計算結果

図-8は領域2内部の4地点における地盤高の変化を示し ている.領域2のSt.1~St.3では堆積傾向となる一方で, 沖側St.4では侵食傾向となっている.これは,図-9及び 10に示すように,初期土壌面の上に新たに細砂が堆積し, 土壌面の粒度組成が変化したことによる.このことは, 流れと干潟土壌の相互作用に深く関わっているため,液 相と分散相(土壌内)の相互作用項の時系列を調べる ことにした(図-11).図より,沖側(St.3)ほど液相と 分散相の相互作用が大きくなることが分かる.

図-12は土壌岸沖流速と潮位の時系列変化であり,沖 側と岸側の流速は概ね逆位相で推移していることが分か る.また,図-11の相互作用項の時系列変化は,岸沖方 向に位相差が見られないことから,粒子分散相の岸沖流 速に見られる位相差は,土砂挙動をモデル化した構成式 (ビンガム流体)によるものと考えられる.

以上より,本モデルは土壌の物理的特性を踏まえた粒 径別挙動を考慮でき,現地で観測された侵食域への砂の





図-7 モデル地形の諸元とモニタリングポイント

<u>塑性粘度</u> ※領域2の土壌面:領域1の土壌面50cm下から4層分設定





堆積とそれに伴う粒度変化を定性的に再現可能で、干潟 設計における粒度組成や地形変化を予測する上で、本モ デルは有用であると考えられるが、長期的な地形変化過 程については今後の課題として残される.

4. おわりに

自然的攪乱後(台風通過後)の干潟地盤の自律的再生



過程の解明とその数値予測モデルを開発することを目的 として,現地観測および数値計算法を構築した.以下に 主要な結論をまとめる.

- (1)本研究で対象とした人工干潟は台風攪乱直後しばらくは侵食傾向が続くものの,波浪・潮汐と干潟地形との力学バランスが徐々に回復することで,沖向き流速が減少するとともに,土壌堆積傾向が強まり,わずか数ヶ月で,台風ダメージ前の干潟地形・粒度組成へと自律的に回復する事実が明らかとなった.
- (2) ニュートン・ビンガム流体を仮定したN分散相二流体モデルに基づく干潟域の流動及び粒径別土壌挙動解析手法を構築した.本モデルは,現地での観測結果を定性的に再現可能であるが,長期的な地形変化過程への適用という課題を解決することで,干潟設計において有用なツールとなり得ることを示した.

謝辞:本研究は,科学研究費補助金(代表者:岡田光正, 課題番号:17201018)による助成を受けた.ここに記し て謝意を表する.

参考文献

- 渦岡良介(2000):地盤の液状化発生から流動までを予測対象とする解析手法に関する研究,岐阜大学学位論文,第4章, p.117-127.
- 高橋俊之・新井 洋・陸田秀実・土井康明(2006a):N分散相 二流体モデルに基づく干潟土壌の粒径別挙動及び地下水 面の数値解析,海岸工学論文集,第53巻,pp.1016-1020.
- 高橋俊之・陸田秀実・新井洋・土井康明(2006): 潮汐と波 浪外力による干潟域の流動・地形変化の数値解析,水工 学論文集, pp.1459-1464.
- 藤田 学・牛島 省 (2005):固体粒子により影響を受ける ビンガム塑性流体の数値解析手法,第19回数値流体力学 シンポジウムB5-1, pp.1-5.
- 陸田秀実,高橋俊之,土井康明(2005):N分散相二流体モデ ルに基づく干潟の流動・地形変化の数値解析,海岸工学 論文集,第52巻, pp.431-435.
- Richardson, J. F. and Zaki, W. N. (1954) : Sedimentation and Fluidization. I., Trans. Inst. Chem. Eng., 32, pp. 35-53.
- Ergun, S. (1952) : Fluid flow through packed columns, Chem. Eng. Prog., 48, pp. 89-94.
- Wen, C. Y. and Yu, Y. H. (1966) : Mechanics of fluidization, Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 6, pp. 100-111.