

# 斜面発達数理モデルを用いた 白川河口干潟地形の検討

黒田 直人<sup>1</sup>・辻本 剛三<sup>2</sup>・外村 隆臣<sup>3</sup>・柿木 哲哉<sup>4</sup>・山口 龍太<sup>5</sup>

<sup>1</sup>非会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒812-8622 福岡市博多区祇園町2-1)

E-mail:53korg@gmail.com

<sup>2</sup>フェロー会員 熊本大学大学院 先端科学部土木建築学科 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

E-mail:tgozo@kumamoto-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 熊本大学工学部技術部 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

E-mail:hokamura@tech.eng.kumamoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 神戸市立工業高等専門学校 都市工学科 (〒651-2276 神戸市西区学園東町8-3)

E-mail:kakinoki@kobe-kosen.ac.jp

<sup>5</sup>正会員 熊本市役所 (〒860-8555 熊本市中央区黒髪2-39-1)

E-mail:tgozo@kumamoto-u.ac.jp

潮位差が4m余りに達する有明海の内湾の白川河口干潟で潮間帯から潮下帯の深淺測量を2013年～2018年まで水深計測用の鉛直ビームを取り付けたADCPを用いて実施し、前置層を含む干潟地形の再現と予測を移流拡散方程式型の斜面形成モデルの解析解に基づいて行った。見かけの拡散係数 $50\sim 490\text{ m}^2/\text{year}$ 、移流速度 $6\sim 15\text{ m/year}$ 、土砂堆積速度 $0.006\sim 0.016\text{ m/year}$ を観測結果より算出し、現況の地形を良好に再現した。各係数は他のデータから算出された値と比較してその妥当性が確認できた。

21世紀末の干潟の等深線は現状よりもさらに前進し、白川の滯筋よりも北側測線ではより顕著になった。しかしながら、海面が上昇することで大潮干潮時の汀線位置の前進はそれほど顕著でない。

**Key Words** : slope development model, clinoform development, delta, numerical simulations

## 1. はじめに

国内の干潟の約40%近くが有明海に存在しており、防災や生態系の観点から極めて重要かつ貴重な場所でもある。しかしながら、干潟は極めて緩勾配であり、地球温暖化に伴う海面上昇や外力変化により脆弱性が増大し、容易に変形・消失する恐れがある。干潟といえば生物に注目されることが多いが、干潟環境を理解する上で基盤となる地形の形成機構に関する知識は極めて重要である。

有明海に流入している白川河口には図-1に示すような干潟が形成されている。この干潟は2016年熊本地震で約0.4mの地盤沈下が生じ、この地盤沈下を“相対的な海面上昇”と見なすと、数十年に相当する海面上昇が生じたと考えられる。このような背景において、山口ら<sup>1)</sup>は仲西ら<sup>2)</sup>が用いたプロセスモデルを用いて、地盤沈下を考慮して将来予測を行った。しかしながら、プロセスモデルに基づく場合、外力が不確定要素となり、そのシナリオの与え方が極めて重要である。そこで、山口ら<sup>3)</sup>は将来の断面形状は平衡状態に達した時が将来形状と考え、開水路の流速分布の算定において適用事例のある、最大

情報エントロピーの概念を用いた平衡断面の検討を行った。この手法ではデータの蓄積が重要であり、保有しているデータも潮間帯のみに限られ、潮下帯は考慮できていない。

干潟地形は図-1に示すように岸沖方向のみならず沿岸方向にも変化している、本研究では地理学の分野で斜面



図-1 白川河口干潟

発達を拡散現象として扱った数理モデルを用いて、干潟の地形変化を予測することを目的とする。

## 2. 現地調査の概要

図-2に示す熊本県の有明海沿岸の白川河口干潟で2013年～2018年(2015年除く)の計5回、2.5 km x 2 kmの潮下帯においてADCPによる深浅測量を実施した。測線5では200 m間隔で岸沖方向、奇数側線の沖側端と岸側端でCTDによる塩分、水温の計測、採泥器による底泥を採取し、レーザ回折/散乱式粒子径分布測定(LA-950V2)で粒度分布を計測した。図-2に示す破線枠(5.3 km x 4.4 km)は国土交通省による1976年から2003年までの調査範囲であり、本研究の観測領域はこの範囲に含まれている。

図-3に1957～2018年までの61年間の白川の代継橋での最大流量と平均流量を示す。平均流量は約26 m<sup>3</sup>/秒であるが、最小平均流量は約11 m<sup>3</sup>/秒と最大平均流量は約55 m<sup>3</sup>/秒と5倍程度の差があり、白川からの浮遊土砂量は河川流量の約2乗に比例しており、年度によっては流出土砂量は25倍程度の差になる。

図-4に図-2の黄色の枠組みの2013年～2018年までの潮下帯部分と2003年の国土交通省の等深線の平面分布を示す。鉛直座標は熊本港のT.P.を基準面として、上向きが正である。沿岸距離2000 m～2500 mが白川の滞筋であり典型的な凸状のデルタ地形が形成されている。2012年の九州北部豪雨を経て、翌年2013年、2014年に観測を行っているが、顕著な変化は平面的には見られなかった。2016年は約200 m程度前進しており、当年、4月の熊本地震と6月の熊本市では観測史上となる1時間雨量を記録した豪雨により、白川上流域の阿蘇からの多量の土砂が河口域に流出したことによるものである(以後、2016災害)。T.P.-6 m付近では2003年からの前進が見られないが、T.P.-8 m付近では大きく前進している。

図-5に白川の滞筋に近い測線5の全観測期間の断面図と底質の平均粒径の分布を示す。干潟の断面形状の特徴として、潮間帯の勾配が緩やかな頂置層、頂置層の縁辺から急傾斜する前置層、前置層からより緩やかに傾斜する底置層の3つに区分される。

1976年～2003年は頂置層の変化量は小さく、前置層は約600 m程度の前進が見られ勾配が急になり、ほぼ同じ高さの底置層に続いている。干潟の典型的な形状である、凸状の地形となっており、頂置層から前置層の勾配が急変するroll over pointが上昇している。2012年の九州北部豪雨の影響は2013年の前置層の位置や形状変化に寄与せず、底置層への土砂の堆積が見られる。一方、2016災害の影響は前置層の200 m程度の前進に寄与するが、底置層への土砂の堆積はほとんどない。2016災害後は縦断方向には粒径の変化が小さく、2018年は頂置層では粒径が粗く

なっている。ただし、前置層においては粒径の変化はほとんど見られない。

図-6に白川右岸側の測線1、左岸側の測線10の断面図を示す。測線1の時系列的変化と同様に前置層の前進と底置層への堆積があり、傾向は測線5にしている。ただし、roll over pointが明確ではなく、頂置層の縁辺での堆積がある。前置層の前進長さは300 m程度と半分程度で

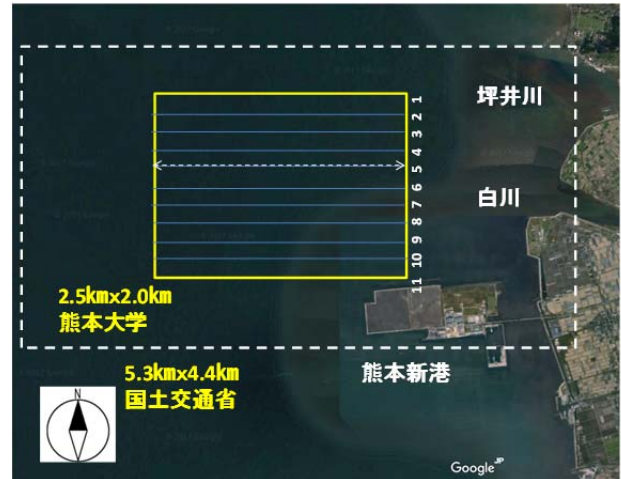


図-2 観測領域

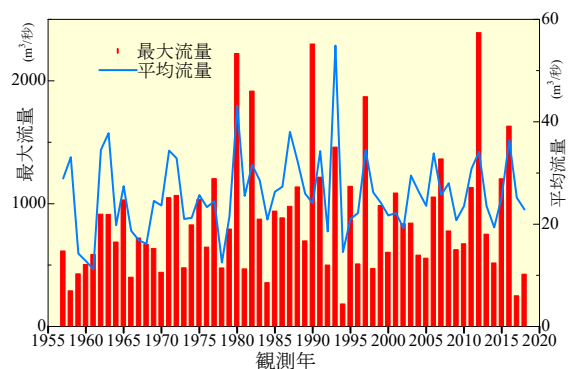


図-3 白川の最大流量と平均流量

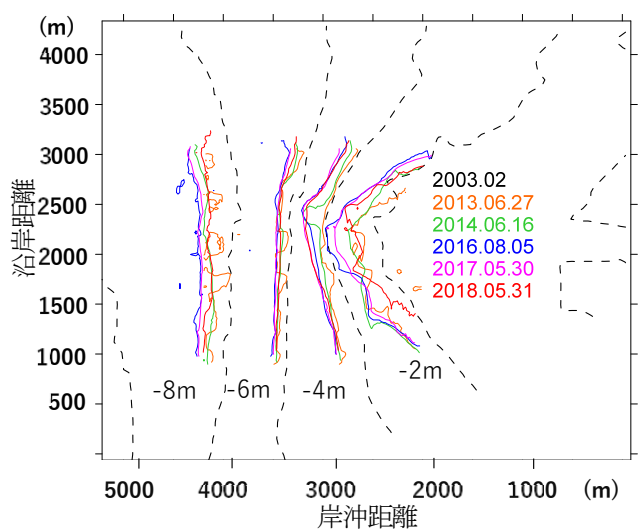


図-4 地盤高さの分布

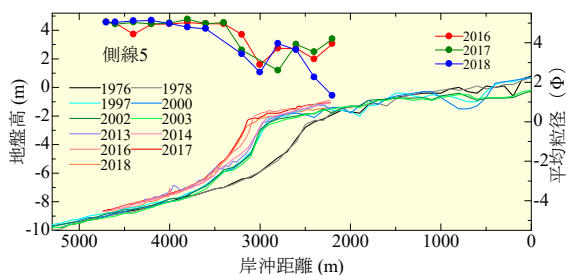


図-5 地盤高さの鉛直分布と粒径分布

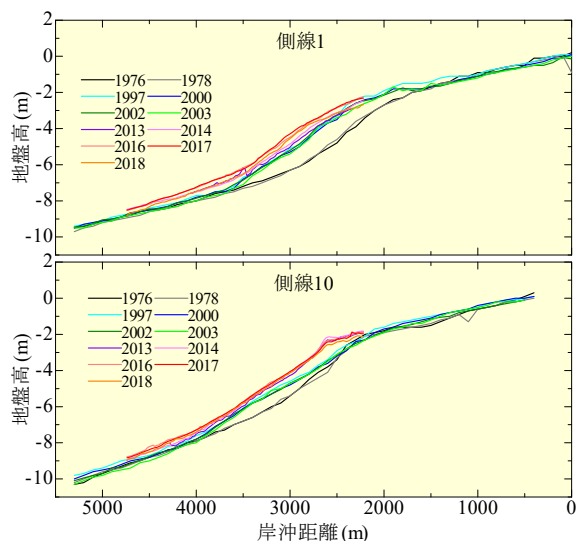


図-6 地盤高さの鉛直分布

ある。一方、測線10では1976年～2003年は前置層は前進せず、roll over pointも見られない。2013年以後にroll over pointと明確な前置層が形成されている。

### 3. 従来の研究事例

#### (1) 拡散タイプ

古くから地理学において斜面地形発達モデルとして、式(1)の拡散方程式型が用いられている（例えば、Scheidegger<sup>4)</sup>）

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで、 $h$ は地盤高さ、 $t$ は時間、 $x$ は距離、 $\kappa$ は順化係数（以後、拡散係数と称する）で斜面形状が丸みを帯びる過程を表す。

Kenyonら<sup>5)</sup>は地盤高さの時間変化と底質フラックスの空間変化が釣り合うとし、底質フラックスを地形の地盤高さの勾配と関連付け、斜面発達モデルと同様に拡散方程式を用い、Mississippi RiverとRhine Riverの河口デルタ地形の発達と形状の再現を試みている。拡散係数は前者は $2 \cdot 10^4 \text{ m}^2/\text{yr}$ 、後者は $6 \cdot 10^5 \text{ m}^2/\text{yr}$ であり、底質の組成や供給量が場所により異なるため拡散係数は異なり、陸上斜面の発達モデルにおける値よりも大きくなっている。

底質フラックスが地盤高さの勾配に比例するため、よ

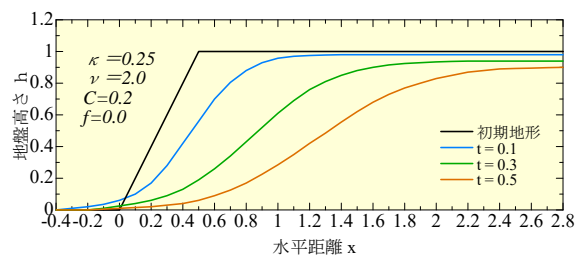


図-7 斜面発達モデルの例

り急勾配な場所から底質移動となり、結果的に斜面の後退となる。そのために前置層の前進過程とは反対の結果となる。そこで、Kaufmanら<sup>6)</sup>は拡散係数を水深によって指数変化させて、大陸縁辺部の堆積機構や前置層の形成機構について検討している。

#### (2) 移流・拡散タイプ

平野<sup>7)</sup>は拡散タイプを基本として、式(2)の斜面地形発達モデルを提案した。

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} - v \frac{\partial h}{\partial x} - ch + f(x, t) \quad (2)$$

ここで、 $v$ は後退係数（以後、移流速度と称する）、 $c$ は削剥係数、 $f$ は内営力である。 $v$ は斜面が後退過程、 $c$ は斜面の高さが低下する過程、 $f$ は隆起過程をそれぞれ表している。図-7に式(2)の結果を示す。初期の鉛直斜面が時間経過と共に、凸部では侵食し、凹部では堆積をして斜面が丸みを帯びてくるのが解る。河口干潟地形は図-5に示すように、頂置層、前置層、底置層のある凸状の地形となり、図-7は斜面発達モデルで再現された形状と類似をしていることが解る。

Driscollら<sup>8)</sup>は前置層のスケールは数cmから数100mに及び、スケールに関係なく3次元構造であり、縁辺に沿う方向には拡散機構、縁辺と横断方向には移流・拡散機構が重要であるとし、式(2)の右辺第1, 2項のみ用いて、土砂供給量や海面上昇の変化による前置層の形状を検討している。

#### (3) プロセスベースタイプ

Stefanoら<sup>9)</sup>は前置層の分類とレビューを行っており、形成機構の時空間スケールに応じて、delta-scale, shelf-edge, continental-marginのタイプに分類している。前述のKaufmanらやDriscollらによる、空間的に数10 km、時間的にkyrに及ぶshelf-edgeやcontinental-marginの前置層の堆積形状を対象とした検討では、外力である潮流や波浪の影響、底質特性等は、移流・拡散方程式中の拡散係数や移流速度に陰な形で取り込まれている。そのためにdelta-scaleの前置層の発達や形状については、流体運動と底質移動の原理に基づくモデルによる検討もある。

Friedrichsら<sup>10)</sup>は河川出水による土砂流入、波動による流体抵抗と土砂による下向きの重力流との力のつり合い

から、大陸棚に見られる上に凸型の断面についての検討を行った。前述の仲西らや山口らはMariottiら<sup>11)</sup>のモデルを用い、流体運動、底質輸送、地形変化の3つのプロセスを1サイクルとして、白川河口干潟での海面上昇や地震による地盤沈下の影響を考慮した長期予測を行った。

#### 4. 検討方法

##### (1) 干潟地形の解析解

プロセスベースモデルは、底質移動過程やその地形への影響についての理解の上では有益なモデルである。しかしながら、適用すべき定数等が多数存在するために検証すべきデータも必要である。本研究では、同一場所での42年間の干潟地形の地盤高さの年スケールの変化は把握しているが、その間の外力となる波浪や潮汐について、時空間的に十分なデータを有していない。そのためDriscollらと同様に式(2)移流・拡散方程式で $c = 0, f = 0$ として干潟地形の発達について検討した。

初期地形を式(3)、境界条件を式(4)で与えると、干潟地形は式(5)で与えられる(Carslaw and Jaeger<sup>12)</sup>。

$$h = h_0 + ax, \quad x > 0, t = 0 \quad (3)$$

$$h = h_1 + bt, \quad x = 0, t > 0 \quad (4)$$

$$h = h_0 + a(x - vt) + \frac{1}{2}(h_1 - h_0) * \left\{ \operatorname{erfc} \left[ \frac{x-vt}{2\sqrt{\kappa t}} \right] + \exp \left( \frac{vx}{\kappa} \right) * \operatorname{erfc} \left[ \frac{x+vt}{2\sqrt{\kappa t}} \right] \right\} + \frac{1}{2v} (b + av) * \left\{ (x + vt) \exp \left( \frac{vx}{\kappa} \right) \operatorname{erfc} \left[ \frac{x+vt}{2\sqrt{\kappa t}} \right] - (x - vt) \operatorname{erfc} \left[ \frac{x-vt}{2\sqrt{\kappa t}} \right] \right\} \quad (5)$$

ここで、 $h_1, h_0$ は前置層岸側、沖側の地盤高さ、 $a$ は海底勾配、 $b$ は土砂堆積速度(m/yr)、 $\operatorname{erfc}$ は誤差関数であり、 $x = 0$ は河口に相当する。

##### (2) 変数の決定方法

式(5)には、 $h_0, h_1, a, v, \kappa, b$ の6個の変数と時間変数 $t$ が含まれている。初めに $h_0$ と $h_1$ はそれぞれ前置斜面の下端部と上端部の地盤高さ、 $a$ は前置層の前面の勾配を1976年の断面より、 $v$ は1976年から2018年までに各測線の前置層が前進した42年間の距離から平均速度を観測値より決定し、式(5)にこれらの4つの変数を適用した後、以下のように行った。1976年観測値と解析解の前置層の位置が一致するように $t$ の値を決定し、次に実測値と解析解の前置層上面の位置が一致するように、 $x = 0$ での地盤高さの上昇速度 $b$ の値を設定した後、前置層斜面の勾配とその上下端の曲部の外形と観測値が一致するように拡散係数 $\kappa$ の値を決定した。表-1に各係数の値を示す。

図-8に解析解と実測値の比較を示す。各測線においても良好に1976年の地形を再現している。初期地形（ほぼ鉛直壁なる）から1976年の地形になるまで要した時間 $t$

表-1 解析解の各係数

測線	a	b(m/year)	v(m/year)	$\kappa$ (m <sup>2</sup> /year)	h0(m)	h1(m)	t(year)
1	-0.0014	0.016	13.6	490	-5.6	-2.6	172
2	-0.0014	0.016	13.5	350	-5.7	-2.5	180
3	-0.0015	0.014	12	150	-5.7	-2.4	215
4	-0.0015	0.015	14.2	210	-5.8	-2.1	185
5	-0.0016	0.015	14.3	180	-5.7	-2.2	185
6	-0.0018	0.008	13	160	-5.5	-1.9	204
7	-0.0019	0.013	10.7	50	-5.4	-2.4	252
8	-0.0018	0.009	7.2	80	-5.7	-2.5	385
9	-0.0019	0.007	6	80	-5.3	-2.4	450
10	-0.0019	0.006	6	210	-5.3	-2.2	440

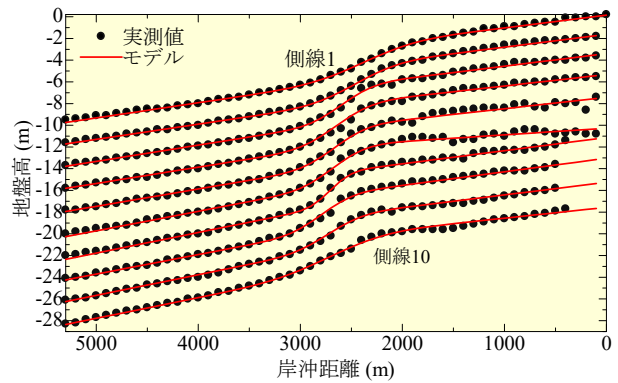


図-8 解析解の妥当性

は、各測線には差がみられる。白川河口から北側の方が発達が速く、2.5倍程度の差が見られる。移流速度も同様な結果になっている。

土砂堆積速度 $b$ は年間で数cm程度であり、各測線の差はみられない。栗山ら<sup>13)</sup>は、1978年から1997年の堆積期間中の地形変化量を34.16万 m<sup>3</sup>/yearと見積もっており、これは1 km<sup>2</sup>の観測領域に置き換えると、約2.5万 m<sup>3</sup>/yearである。土砂堆積速度に2.5 cm/yearとなり、解析解の値とほぼ同程度である。ただし、Mississippi川の干潟では前置層上部と潮間帯では堆積速度が10倍異なり、長江沖合での堆積速度が5.4 cm/year、4.4 cm/monthと短期間での堆積速度が10倍程度早くなる事例もあり、領域内全体で均一に一定の速度で堆積していない事もある<sup>14)</sup>。

また、拡散係数 $\kappa$ の値は50~490 m<sup>2</sup>/yearとなり m<sup>2</sup>/sに換算すると、10<sup>5</sup>~10<sup>4</sup>程度である。この値は、西ら<sup>15)</sup>が白川河口干潟でプイを用いた流動観測結果から算定した拡散係数のオーダーと同程度であった。なお、白川の右岸側の方が大きな値となっている。前述のMississippi川やRhine川の値と比較すると流量が1/100~1/1000程度であるため、拡散係数 $\kappa$ は極めて小さい。

##### (3) 解析解と現在地形との比較

式(5)の解と表-1の値を用いて、2018年時点での各測線の検討を行った。表-1における時間係数をそれぞれ1976年から42年分ずつ増加させた。2018年の観測は、前置層を含む潮間帯は行われていない。

図-9に結果の一部を示す。前置斜面の位置は、概ね良好に再現され、測線3, 7は、前置層辺々からroll over point

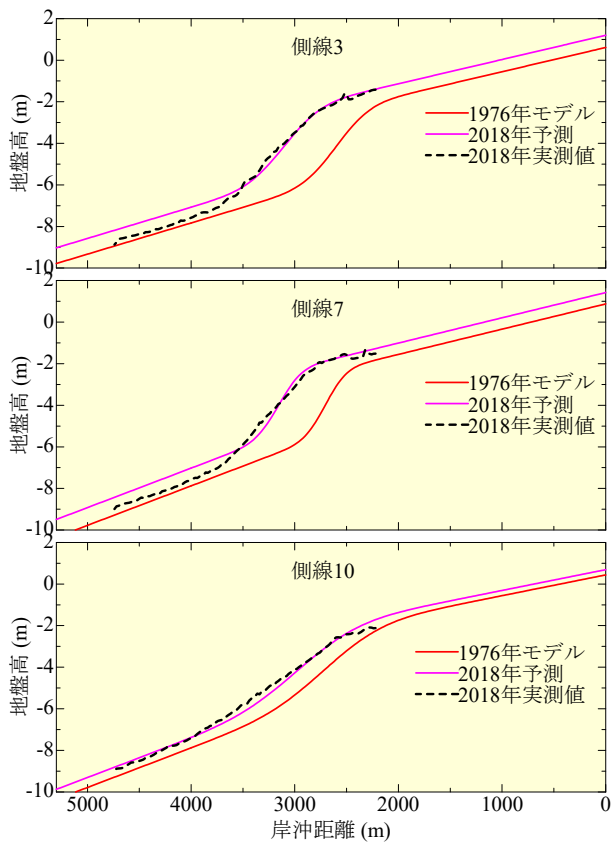


図-9 現況との比較

を越えて前置層までかなり再現性が高くなっている。一方、前置縁辺から底置層にかけては、予測地形ほど土砂の堆積は進んでおらず、予測モデルに比べて初期地形からの変化量が小さく、仲西らと同様の結果であるが、測線10では、計測範囲においては良好に再現されている。

### (3) 将来地形

解析解からも明らかなように、土砂の堆積速度、移流速度、見かけの拡散係数の3つのパラメータが干潟地形の予測に必要なものである。土砂の堆積速度は、白川からの河川流量に関連するため、阿蘇山周辺の降雨量が影響を与える。一方、移流速度は干潟の前進速度であり、見かけの拡散係数は、順化係数と称されるように地形が丸みを帯びる度合いであり、外力である波浪や潮汐によって、底質が移動、浮遊している現象を直接的に表しているものではない。

気候変動に伴う干潟の将来予測においては、前述のパラメータの評価が重要であるが、ここでは時間変数 $t$ を増加させて、図-10に2100年の平面地形を示す。熊本港の干潮時の平均海面の地盤高さは、大潮時で約2.2 mであり、IPCCの第5次評価報告書では21世紀末での約0.8 mの海面上昇と予想であるため、大潮の干潮時の汀線位置は-1.4 mとなる。図中にその位置を点線で示す。

干潟は河川から流出した土砂が河口付近から堆積する

地形であり、将来においても等深線が全体に前進し、沿岸距離1000 m付近の河口の滞筋から北側の方が南側よりも前進が見られ、滞筋付近がより顕著である。より明確にするために両者の差を図-11に示す。

## 5. 数値計算方法

柿木ら<sup>16)</sup>は簡単な数値モデルで当該水域の潮流計算を行い、潮流楕円の比較しモデルの妥当性を確認している。図-4の形状の非対称性を検討するために、このモデルで2020年度天文潮を用いて1年間の計算を行った。図-12に平均流速を示し、図中の赤枠が熊本大学の観測領域である。河口からは約0.1 m/s程度の西南方向向きであるが、観測領域内では数cm/s程度の北向から白川の右岸側にかけて北西向きの流れであり、流軸に対して非対称な流動が干潟形状に寄与している。

## 6. まとめ

斜面発達モデルで現況の干潟地形を良好に再現することができ、適用した拡散係数 $\kappa$ 、土砂堆積速度 $b$

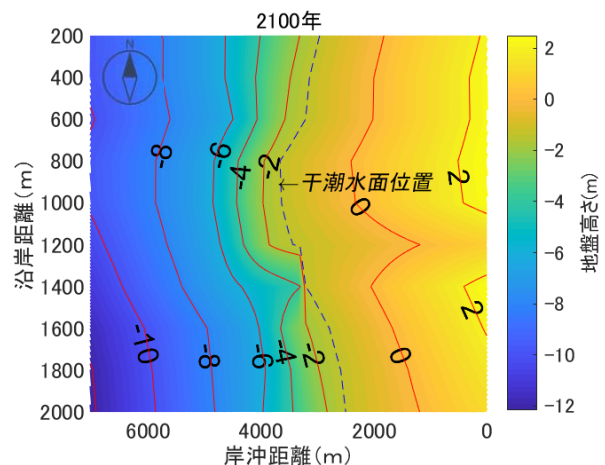


図-10 将来の平面分布

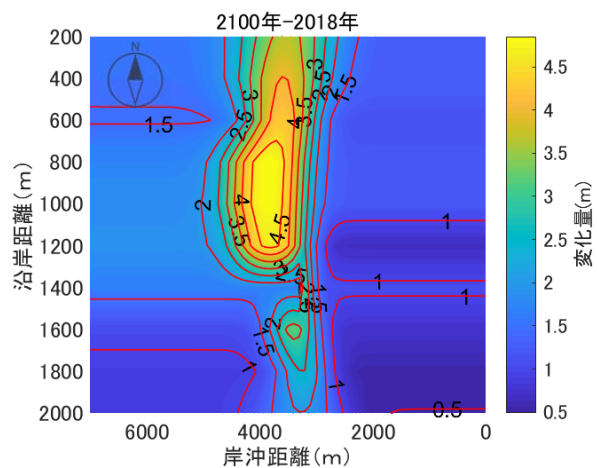


図-11 現況と将来の変化量

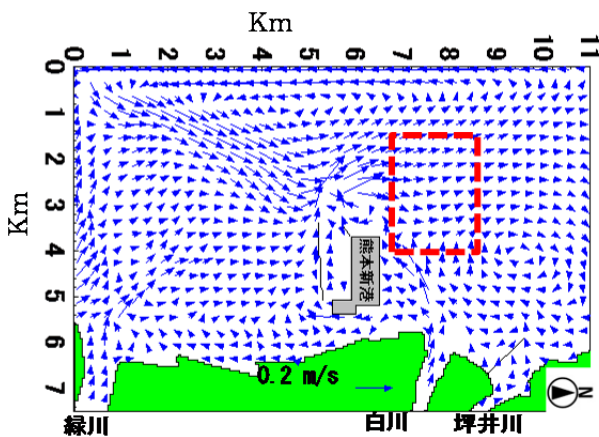


図-12 平均流速分布

の値は従来の知見と同程度であり、その妥当性が確認できた。移流速度は数値計算でその傾向を検証した。将来予測では、干潟が前進する結果となっているが、外力の変化と変数との関連を明確にする必要がある。

**謝辞：**本研究を行うにあたり現地調査は、沖新漁業協同組合、小島漁業協同組合にご配慮いただいた。深浅測量データは国土交通省九州地方整備局熊本河川国道事務所、熊本港湾空港整備事務所、熊本県農林水産部水産局漁港漁場整備課より頂いた。また、熊本大学応用海岸研究室の学生の協力を頂いた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 山口龍太, 辻本剛三, 外村隆臣: 熊本地震後の疑似的海面上昇下の白川河口干潟地形の長期変動予測に関する検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.74, pp.725-730, 2018.
- 2) 仲西耕平, 中條壯大, 外村隆臣: 将来の外力変動を考慮可能な河口デルタ地形長期予測モデルの基礎的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.71, No.2, I\_506-I\_510, 2015.
- 3) 山口龍太, 行村理那, 外村隆臣, 辻本剛三: 情報エント

- ロピーを用いた白川河口干潟の将来の平行断面地形予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.74, pp.811-816, 2018.
- 4) Scheidegger, 奥田節夫 監訳: 理論地形学, 古今書院, 463p., 2008.
- 5) Kenyon, P. M. and Turcotte, D.L.: Morphology of a delta by bulk sediment transport, Geol. Soc. Am. Bull., 96, pp.1457-1465, 1985.
- 6) Kaufman, P., Grotzinger, J.P. and McCormick, D.S.: Depth-dependent diffusion algorithm for simulation of sedimentation in shallow marine depositional systems, Kansas, Geol. Surv. Bull., pp.490-508, 1991.
- 7) 平野昌繁: 斜面発達とくに断崖発達に関する数学モデル, 地理学評論, 39 卷, pp.324-336, 1966.
- 8) Driscoll, N.W. and Karner, G.D.: Three-dimensional quantitative modeling of clinoform development, Marine Geology, 154, pp.383-398, 1999.
- 9) Stefano, P. and William, H.H.: Clinoforms and clinoform systems: Review and dynamic classification scheme for shorelines, subaqueous deltas, shelves and continental margins, Earth-science Reviews, 185, pp.202-233, 2018.
- 10) Friedrichs, C. T. and Wright, L. D.: Gravity driven sediment transport on the continental shelf: Implications for equilibrium profiles near river mouths, Coastal Engineering, 51, pp.795-811, 2004.
- 11) Mariotti, G. and Fagherazzi, S.: A numerical model for the coupled long-term evolution of salt marshes and tidal flat, J. Geophys. Res., Vol.115, F01004, 2010.
- 12) Carslaw, W.E.H. and Jaeger, J.C.: Conduction of heat in solids (2nd ed.), Clarendon Press, Oxford, 510pp., 1959.
- 13) 栗山善昭, 橋本孝治: 熊本県白川河口干潟における土砂収支, 港湾空港技術研究所資料, No.1704, pp.16, 2004
- 14) 堀和明, 斎藤文紀: 大河川デルタの地形と堆積物, 地学雑誌, 112(3), pp.337-359, 2003.
- 15) 西敬浩, 郷原慎一郎, Charles L., 外村隆臣, 山本浩一, 濱田孝治, 山田文彦: ラ克蘭ジュ・ブイを用いた潮間帯での渦動粘性係数・渦拡散係数の時空間分布推定, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, I\_1386-I\_1390, 2010.
- 16) 柿木哲哉, 滝川清, 山田文彦: 白川・緑川河口域の干潟形成に及ぼす潮位・潮流と河川流入の影響, 海岸工学論文集, 第47 卷, pp.636-640, 2000.

(Received March 16, 2020)

(Accepted July 27, 2020)

## MORPHOLOGICAL CHANGES AT THE MOUTH OF SHIRAKAWA RIVER USING A MATHEMATICAL MODEL OF SLOPE DEVELOPMENT

Naoto KURODA, Gozo TSUJIMOTO, Takaomi HOKAMURA,  
Tetsuya KAKINOKI and Ryuta YAMAGUCHI

Focusing on clinoform, we have analyzed the morphological changes of delta using the slope development model based on the advection-diffusion. The coefficient of diffusion from 50 to 490m<sup>2</sup>/year, the advective velocity from 5 to 15m/year and the sediment rate from 0.006 to 0.016 m/year have applied to the analytical solutions. These values have obtained from the measurement data. The relationships between the measurement and the calculation have been in very well.

The delta at the end of the 21<sup>st</sup> century have developed further than the present one, the tendency was remarkable at the right bank of Shirakawa River. But the progress of shoreline during low level at spring tide is not so noticeable due to the sea level rises.