

サンゴ礁池に形成された砂州の成長メカニズム

Growth Mechanism of a Sandbar Formed in Coral Reef Pond

津田修一¹・與那覇健次²・國場幸恒³・海老原俊広⁴・片野明良⁵・小野信幸⁶・久留島暢之⁷

Syuichi TSUDA, Kenji YONAHARA, Yukitsune KOKUBA, Toshihiro EBIHARA

Akiyoshi KATANO, Nobuyuki ONO and Nobuyuki KURUSHIMA

In Awase area, Okinawa, two sandbars which extend perpendicular to the coastline are formed. This study intends to understand growth mechanism of the sandbars and to examine if the predicted sea level rise by global warming influences the sandbar formation. By analyzing sounding survey data, it is confirmed that the centroid of the sandbar is moving onshore with 26m/y and the volume is increasing with 500m³/y. These facts show that the sandbar gradually grows extending in the onshore direction. The onshore extension is caused by that the wave energy concentration on a shoal gathers coral sand and supplies them to the sandbar. It is also confirmed that high waves at high tide deform the sandbars rapidly. Therefore, the sandbar deformation by sea level rise is important and should be carefully examined.

1. 研究の目的

沖縄県中城湾港泡瀬地区は、沖縄本島南部の太平洋側に面し、久高島、津堅島、サンゴ礁に囲まれた中城湾の北部に位置する(図-1参照)。泡瀬地区にはサンゴ砂を主成分として形成された2つの砂州が約2.2km離れた場所に形成されている(写真-1参照)。西側砂州は延長が約550m、幅が約60mであり、過去60年間にわたりこの形状は安定して保たれている。一方、東側砂州はかつて、延長が約1.4km、幅が約60mであったが、1974年頃に岸から約1.0km沖で、航路確保のために人工的に掘削され、沖側に約200m程度の砂州が残された。東側砂州は人工的に掘削されてから35年経過し、岸側に砂州が成長し続けて、現在では約900mにまで回復している。

一方、サンゴ礁により守られた島では地球温暖化による海面上昇により災害リスクが増加しつつある。このため、礁池内の浅瀬に形成された東側砂州の成長メカニズムの解明は、サンゴ礁により守られた島の海岸保全を考える上で、重要な検討課題であると考えられる。

本研究は、①深浅・汀線測量データに基づいて砂州形状の特徴を調べ、②波浪、潮位、風の条件などの外力情報に基づいて、砂州の変化特性および成長過程について検討し、③数値シミュレーションで砂州の変形、成長過程を再現・確認した。また、④平均海面が上昇すると砂州が没水し、消滅することが懸念されるため、砂州成長

過程を数値シミュレーションにより海面上昇による影響を考察するものである。

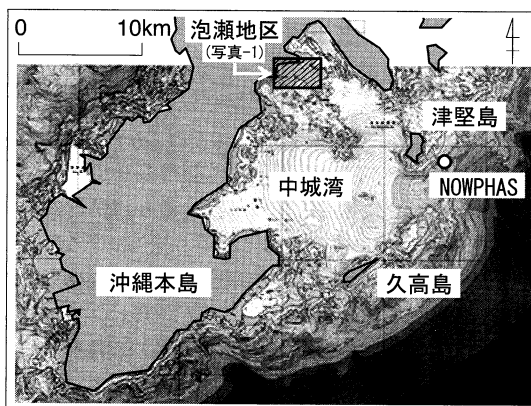


図-1 泡瀬地区の位置

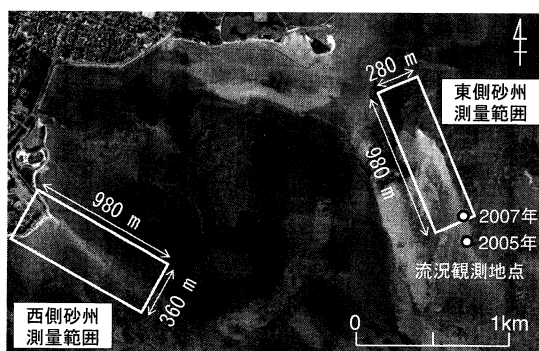


写真-1 砂州測量範囲および流況観測地点

2. 東側砂州の変遷

写真-2に示す東側砂州の代表時期に撮影した空中写真

- | | | |
|-------|---------------|------------|
| 1 | 那覇港湾・空港整備事務所 | 所長 |
| 2 | 内閣府 沖縄振興局 | 専門職 |
| 3 | 那覇港湾・空港整備事務所 | 中城出張所 係長 |
| 4 | (財)沿岸技術研究センター | 主任研究員 |
| 5 正会員 | (株)エコー | 調査・解析部 副部長 |
| 6 正会員 | (株)エコー | 調査・解析部 課長 |
| 7 正会員 | (株)エコー | 調査・解析部 |

から、片野ら(2007)は東側砂州の変遷を次のように整理している。東側砂州は人工的に掘削する以前は西側砂州と同様に陸に繋がっており、ほぼ直線状に約1400m沖まで連続していた(写真-2;1973年)。その後、1974年頃に行われた小型船舶の航路を確保するための掘削工事と、何らかの目的で砂の採取があったこと(関係者談)により、砂州の岸側部(約1200m区間)がなくなり、沖側の約200m部分が残される状態になった(写真-2;1977年)。2005年には砂州が岸側に成長し、砂州の延長は約800mになっている。

東側砂州の変形特性と成長メカニズムを明らかにすることを目的として、写真-1に示す東側砂州周辺の約0.3km×1.0kmの範囲を対象に、深浅・汀線測量を2003年11月から2007年10月までに合計16回実施した。2005年と2007年には台風来襲時期(2ヶ月間)に、砂州の沖側で流れの観測を実施した。以降に東側砂州の地形変化の特徴と成長特性について述べる。

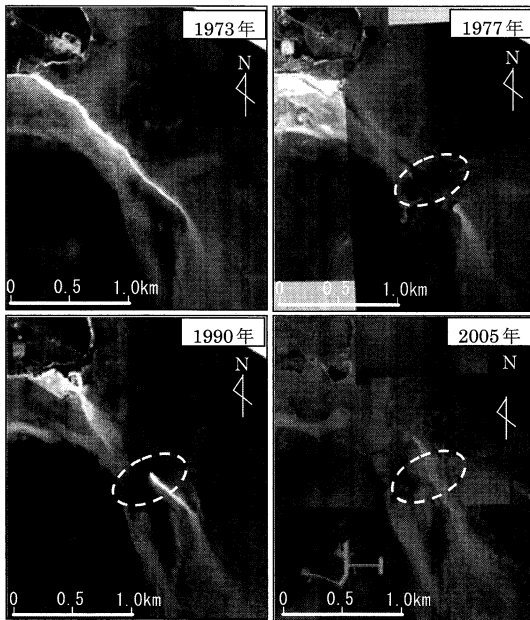


写真-2 東側砂州の空中写真

3. 砂州地形の変化特性

図-2は2003年11月から2007年10月までの砂州周辺の地形変化を示したものである。東側砂州の地形変化は、砂州縦断方向に侵食(300-650m)と堆積(100-600m)が帯状に分布し、西側の堆積域は東側の侵食域よりも岸側に現れており、この4年間に砂州は西側へ移動するとともに岸側へ移動していることがわかる。

図-3は2003年11月と2007年10月の等深線を重ね合わせたものである。C.D.L.+0.5mの等深線に着目すると、沖側の位置はほぼ同じ位置にあるのに対して、岸側の位置

は200m程度岸側に伸びている。このことから、砂州は成長しながら移動していると考えた。

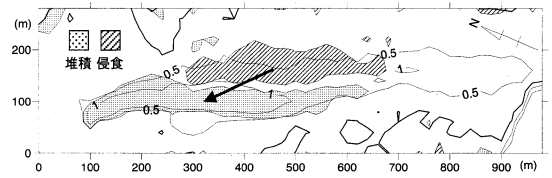


図-2 東側砂州の地形変化 (2003年11月→2007年10月)

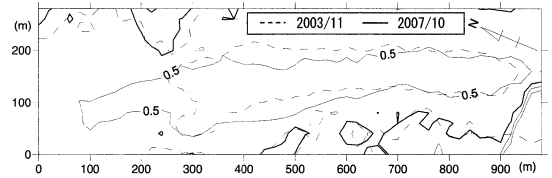


図-3 東側砂州の等深線図 (2003年11月, 2007年10月)

そこで、まず砂州の移動速度を把握するために、測量結果から比較的砂州の形状や移動が明瞭に確認され、平均的な潮位条件である地盤高M.S.L.(C.D.L.+1.26m)以上の領域に対して、砂州の体積の重心位置の変化を調べる。図-4は砂州の重心位置の経時変化を岸沖方向成分と東西方向成分に分けて示している。砂州の重心位置の経時変化を線形近似すると、岸側へ26.3m/yr、西側へ10.8m/yrの移動速度となっている。砂州の重心位置の移動は、岸側、西側ともにほぼ一様であるが、高波浪が来襲した3期間で西側への顕著な移動が確認できる(図中の○印)。各期間に来襲した台風は次の通りで、期間①はT0423($H_{1/3}=11.93\text{m}$, $T_{1/3}=13.6\text{s}$)、期間②はT0603($H_{1/3}=4.99\text{m}$, $T_{1/3}=9.7\text{s}$)、T0604($H_{1/3}=5.28\text{m}$, $T_{1/3}=11.5\text{s}$)、T0605($H_{1/3}=2.64\text{m}$, $T_{1/3}=8.4\text{s}$)、期間③はT0704($H_{1/3}=13.61\text{m}$, $T_{1/3}=14.9\text{s}$: 既往最大)が来襲している(波浪諸元は、津堅

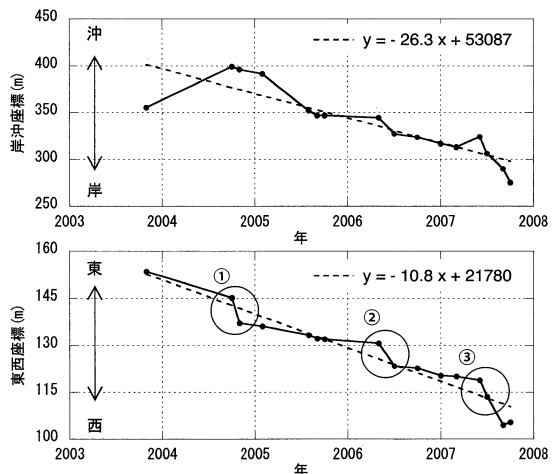


図-4 砂州重心位置の経時変化

島沖で観測された波浪データ(NOWPHAS))。期間①、③は有義波高10mを超える波浪が来襲しており、期間②は約2週間の間に有義波高5m前後の波浪が立て続け(2回)に来襲している。

次に、砂州の成長を調べるために、空中写真で判読できる砂州形状が深浅測量成果のC.D.L.+0.5mのコンターラインと良好に対応することから、C.D.L.+0.5m以上の砂州の土量変化を調べる。図-5はC.D.L.+0.5m以上、およびM.S.L.以上の砂州の土量変化を示したものである。図には、来襲台風の有義波高最大時の潮位(中城湾港出張所観測)を併せて示す。砂州全体の土量と考えられるC.D.L.+0.5m以上の土量は、増減を繰り返しながら僅かに増加傾向となっており、増加速度は約500m³/yrである。M.S.L.以上の土量変化についてもC.D.L.+0.5m以上の土量変化と同じ傾向を示す。このことから、砂州は岸に重心を移動させながら成長していることが明らかとなった。一方、土量が減少する期間は、砂州の重心位置が西側へ顕著に移動した期間と対応している。C.D.L.+0.5m以上の土量に対するM.S.L.以上の土量は1割程度である。C.D.L.+0.5m以上の土量変化の減少量に対するM.S.L.以上の土量変化の減少量は期間②、③に5割弱となっている。期間②、③はC.D.L.+0.5m以上に対するM.S.L.以上の「土量の割合」よりも「減少量の割合」が大きいことから、砂州頂部付近の侵食が顕著に生じていることが推測される。土量が減少する期間②、③は、最大有義波高が観測された時間の海面が砂州頂部高とほぼ同じレベルまで上昇していることが分かる。

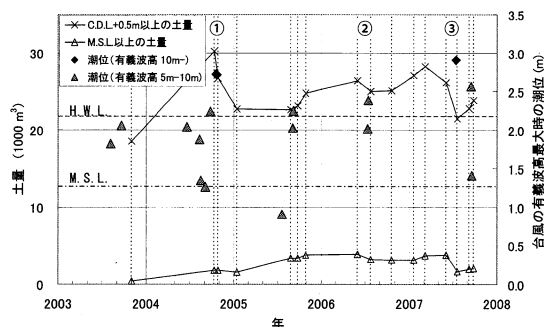


図-5 地盤高別の土量変化と潮位履歴

図-6は期間①～③の岸沖方向の断面地形変化を示している。期間①と期間③は、ほぼ同じ外力条件($H_{1/3}>11\text{m}$, 潮位: H.W.L.+0.5m以上)であり、期間②は $H_{1/3}=5.3\text{m}$, 潮位: H.W.L.+0.2mと期間①、③に比べて砂州に作用するエネルギーが小さい。期間①は岸沖距離400m付近の頂部高が最も高い箇所でもH.W.L.程度であり、満潮時には没する形状となっており、局所的に顕著な地形変化は見られない。対して、外力条件がほぼ同じであった期間③は岸沖距離200m～400m付近で最高頂部がH.W.L.よ

り約1.0m程度高いC.D.L.+3.0mまで高くなっている形状に高波浪が作用した場合である。砂州頂部の高さが期間③と同じ期間②に比べて、期間③の変形は著しい。期間③の変化後の断面地形は期間①の断面地形と同様に、砂州頂部高はH.W.L.と同じ高さまで低下している。砂州の変形は、潮位が高く、砂州が没する状況で高波浪が来襲した場合に顕著になることを示している。その後、高波浪が来襲しない時期には波の遡上高であるH.W.L.+0.5～+1.0mまで頂部高が回復する。

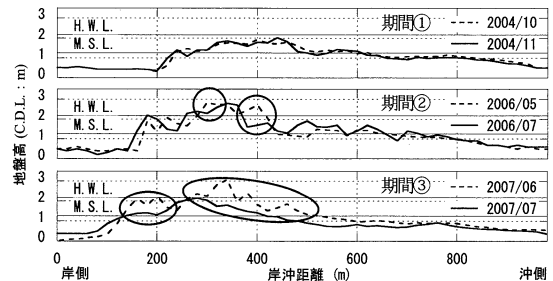


図-6 岸沖方向の断面地形変化

図-7は岸沖方向を200m間隔の領域に分けて土量の経時変化を示したものである。岸沖距離400mを境界に岸側で増加傾向、沖側で横這いか若干減少傾向が見られる。岸沖距離0m-200mの領域では、2006年まではC.D.L.+0.5m以上に土砂はほとんど無く、2006年以降から増加してきており砂州が岸側へ延伸していることを示している。岸沖距離400mより沖側の領域で土砂量の変化がほぼ横這いであり岸側の領域で増加傾向であることから、砂州の岸側への移動は周辺からの土砂供給を伴い成長していると考えられる。そこで、次項では土砂供給源について検討する。

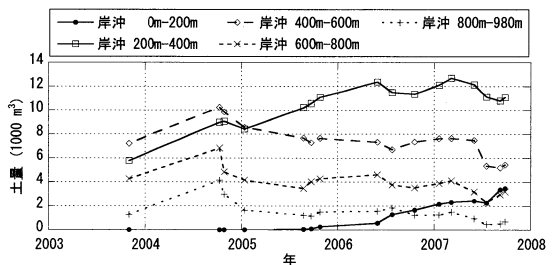


図-7 岸沖方向の領域別土量変化 (C.D.L.+0.5m以上)

4. 漂砂の供給源

砂州が継続的に成長するためには砂州への土砂の供給が必要である。そこで砂州沖側で観測した流速データから砂州沖側の漂砂を推定する。砂州沖で観測した流速は2005年8月から10月と2007年7月である。2005年は他の期間と比べて砂州の変形が少ないものの、観測期間の2ヶ月間に4回の台風が来襲した。2007年7月は既往最大波高

が観測され、砂州頂部高が著しく低下した期間である。

図-8は砂州沖で観測した流速を台風期に着目して平均流ベクトル、および掃流漂砂が底面の流速の3乗に比例する(例えば, Bowen, 1980)ことから, (1)式に示す流速ベクトルの3乗の平均値を3乗根としたベクトルを示している。3乗根ベクトルは、砂州の法線方向成分(波の進行方法成分)を示している。なお、水位変動も同時に観測(2007年)し、砂州前面の波向が常に砂州法線方向に入射することが確認されている。

$$u_3 = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n u_i^3}{n}}, \quad u_i: \text{流速データ}, \quad n: \text{流速データ数} \quad (1)$$

平均流ベクトルは観測期間中の平均風向と対応しており、風による流れの影響を受けて、バラツキが大きくなる。T0514時は平均風速10m/s以上の北風が観測されており、平均流ベクトルが沖向きとなっている。T0704では南からの強風による平均流が岸向きとなる。その他の期間では西向きの平均流ベクトルとなっている。

一方、流速の3乗根はT0514を除いて岸向きが支配的であり、砂州を形成するサンゴ砂は砂州の沖から輸送されたと考えられる。また、写真右の防波堤先端から岸側に砂州が形成されていることから岸向きの漂砂が支配的であることが分かる。

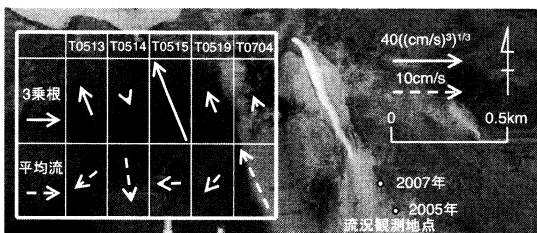


図-8 台風期における流速の平均流および3乗根ベクトル

5. 砂州の成長メカニズム

砂州の変形特性、漂砂供給源の検討から、砂州の変形、成長特性は以下のとおり要約される。

- ① 砂州は約26m/yrの速度で岸側に重心が移動している。
- ② 砂州の沖側端部の位置はほぼ一定である。
- ③ 台風の接近によりリーフ内水位が上昇し砂州がほぼ完全に没水すると砂州頂部はH.W.L.程度の高さまで低くなるものの、その後、数ヶ月間で通常時の波が遇上する高さ程度まで砂州頂部高が回復する。
- ④ 砂州の底質は主に沖から供給される。

以上のことから、砂州の成長メカニズムは、図-9に示すように、①砂州の沖から砂州法線方向から入射し、砂州周辺の浅瀬地形の影響で砂州に収斂する。②砂州の沖端部に比べて砂州の岸端部では波のエネルギーが小さく

なるため、砂州の岸端部付近に砂が堆積し、岸側に砂州が成長する。③砂州の沖側端部の変化が少ない要因は漂砂の供給量が砂州の成長量と釣り合っているからであると考えられる。

なお、砂州周辺の波浪観測結果から、周期300s程度の長周期波成分が観測されたため、周期300sの長周期波の変形計算を実施した結果、エネルギー平均波より、広い範囲から砂州への収斂が認められ、長周期波による砂の寄せ集め効果も働いていると考えられる。



図-9 砂州成長メカニズムのイメージ

6. 数値シミュレーションによる検討

(1) 砂州の成長過程の再現

砂州の成長過程を再現するための地形変化計算を行った。計算方法は、エネルギー平衡方程式による波浪変形を計算した後、radiation stressを介して海浜流を算定して波と流れの場を評価し、水深変化量を算定する。漂砂量の算定には、渡辺の漂砂量公式(渡辺ら, 1984)を用いて、波・流れによる漂砂量を算定する。

まず、入射波条件や水位条件を変えた試行計算をおこない、砂州周辺の地形変化に、水位が高い(H.W.L.)ときに砂州の頂部が侵食されて岸端に堆積するという岸向き移動が生じ、水位が低い(M.S.L.)ときに砂州周辺に全体的に砂が集まるという特徴的な変形パターンがみられた。砂州の形状は、このような移動・回復過程が繰り返されつつ保たれていると考えられるため、潮位をH.W.L.として計算した後、潮位をM.S.L.として計算して1サイクルとし、これを繰り返す計算を実施した。計算範囲は、中城湾を囲むように点在する島、サンゴ礁によるエネルギー逸散の影響を考慮し、中城湾を含む30km四方の領域とした。計算格子は100mの正方格子とし、泡瀬地区の10km四方については20m格子に接続して計算する。波浪条件は砂州が岸に延伸する速度は高波浪の履歴とは関係しないことから、エネルギー平均波(波高1.6m, 周期7.4s, 波向ESE)を代表波とした。

図-10は、2003年の砂州地形を初期地形として、4年後の砂州地形を計算した結果と実測(2007年6月)を比較したものであり、図-11は、計算における砂州の移動と測量データの解析結果(図-4の岸沖方向成分)を比較したも

のである。この結果は、測量データにみられた「砂州の沖端位置は変化せず、岸端が岸に向かって徐々に伸びる。」といった測量データに見られた特徴をよく再現するよう、漂砂量係数を試行計算により定めたものである。これらの図より、砂州の形状については、実測値に認められる砂州の西向きへのシフト(高波浪の影響と考えられる)は計算で表現されていないものの、砂州の全体の形状や岸向きへの延伸状況はよく再現されているように思われる。

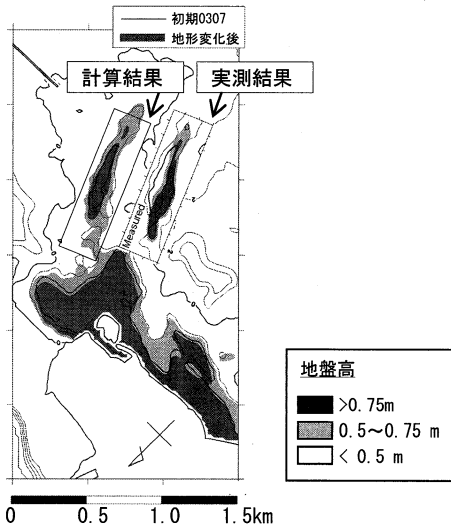


図-10 砂州形状の実測と計算結果の比較(4年後相当)

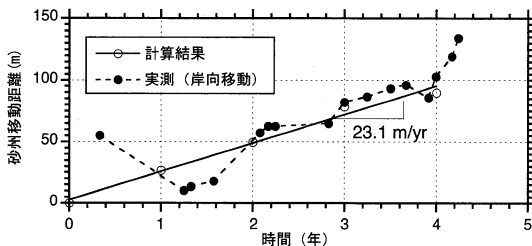


図-11 砂州の岸向き移動速度の実測値と計算値の比較

(2) 海面上昇による砂州成長への影響

砂州は没水する条件で侵食されることから、長期的な地球温暖化による海面上昇の影響による砂州の侵食が懸念される。そこで、図-12は、図-10の計算をそのまま10年後まで進めた場合と、仮に潮位条件のみを+0.5mとした場合の予測計算結果を示す。潮位が+0.5m上昇すると現況の砂州は維持されない可能性が示唆される。実際には年間1cm未満の平均海面上昇に留まっていることから、緩やかな海面上昇に応じて砂州の成長が追いつくとも考えられる。一方、地球温暖化により水温が上昇するとサンゴの生息環境が悪化し、サンゴ砂の供給量が減少する可能性も懸念されるため、今後も継続的に監視し、海面

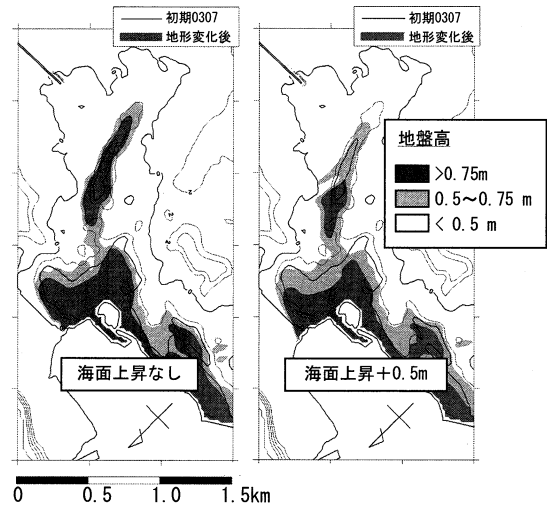


図-12 海面上昇を考慮した場合の砂州形状の比較(10年後相当)

上昇による影響を検討することが重要である。

7. 結 論

①砂州の重心は26m/yrの速度で一様に岸側に移動している。②砂州頂部(H.W.L.+0.5m)が完全に没水すると、砂州頂部の砂が西側に運ばれ、砂州頂部高が低下する。③その後、数ヶ月間で砂州頂部は回復し、結果として重心が西へ移動する。④これらの機構を考慮した数値モデルを構築し、高波浪時の変形と通常時の回復過程、砂州が岸側へ延伸し成長することを再現し、砂州の変形、成長過程を確認した。平均海面が50cm上昇すると砂州の成長が弱まると予測され、砂州の維持保全の検討は重要である。

謝辞：本研究を行うにあたり、独立行政法人港湾空港技術研究所の栗山善昭リーダー、九州大学の入江功名名誉教授、琉球大学の津嘉山正光名誉教授から貴重なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 片野明良・三宅光一・池原興栄・與那覇健次・吉川貴志(2007)：海岸線に対して直角に形成された砂州の形成過程と維持機構について、海工論文集，第54巻，pp.466-470。
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・榊山 勉(1984)：構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル，第31回海工論文集，pp.406-410。
- Bowen, A. J. (1980) : Simple models of nearshore sedimentation, beach profiles and longshore bars, The Coastline of Canada, edited by McCann, S. B., Geological Survey of Canada, Paper 80-10, pp.1-11.