

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

Study on Formation Process and Maintenance Mechanism of Sandbars Formed Perpendicular to the Coastline

片野明良¹・三宅光一²・池原興栄³・與那覇健次⁴・吉川貴志⁵

Akiyoshi KATANO, Koichi MIYAKE, Koei IKEHARA
Kenji YONAHARA and Takashi YOSHIKAWA

In Awase area, Okinawa, unique sandbars which extend offshore perpendicular to the coastline are formed. This study intends to understand formation process and maintenance mechanism of the sandbars. By analyzing aerial photographs, characteristics of long-term stability of the sandbars have been examined. Also, field observations, sounding survey, and sediment analysis were carried out to examine the sandbar deformation in storm. Based on the results of the examinations, it is hypothesized that the sandbars are formed and maintained by the wave energy concentrated onto shoals. By conducting morphology change simulations it has been confirmed that the hypothesis is almost reasonable.

1. はじめに

沖縄県沖縄市泡瀬地先（泡瀬地区）には2つの砂州が約2.2 km離れた場所に形成されている（写真-1の楕円で囲む範囲）。西側砂州は延長が約550 m、幅が約60 m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1.4 km、幅が約60 mであったが、1974年頃に岸から約1.0 km沖で、航路確保のために人工的に掘削され、沖側に200 m程度の砂州が残された。これら2つの砂州の他に類を見ない特徴は、その形状が海岸線に対して直角方向に形成されているということである。

本研究は、①砂州の掘削時期を含む長期的な砂州の変形、②荒天時の短期的な砂州の変形、③地形条件や底質特性などの基礎情報に基づいて、海岸線に対して直角に形成された砂州の形成過程、および維持機構を検討し、④数値シミュレーションで再現・確認したものである。

2. 空中写真を用いた長期的な砂州変形の把握

砂州の長期的な変遷を把握するために、1947年から2005年の間に撮影された15回の空中写真を用いて東西砂州の延長、幅、位置を定量的に調べた。

写真-2は東側砂州を代表的な時期に撮影した空中写真である。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1400 m沖まで連続していた（写真-2；1973年）。1974年頃に行わ

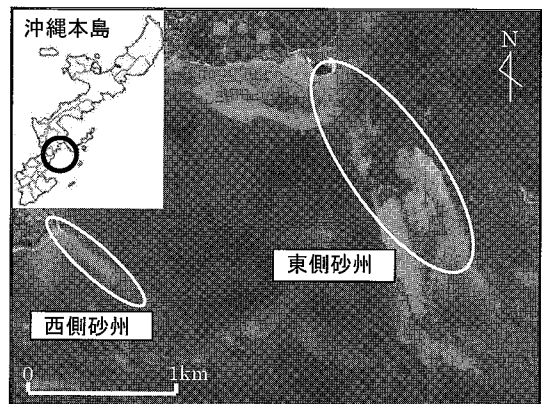


写真-1 泡瀬地区の位置と砂州形状

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1200 m区間）がなくなり、沖側の約200 m部分が残される状態になった（写真-2；1977年）。その後、掘削部（写真中の点線）より岸側まで砂州が自然に成長（延伸）した（写真-2；1990年）。一方、航路を掘削した岸側の海域に残された僅かな砂はほとんど消失し、新たに岸部に小島が形成されている（写真-2；2005年）。1990年の写真には、形成されて始めている。小島から沖側に一筋の砂州が形成されていることが確認される。このことから、航路掘削後に残された掘削部岸側海域の砂が小島周辺に集まり、小島が形成されたものと考えられる。

図-1は砂州が人工的に掘削され後の1977年の砂州を基準として東側砂州の岸側端部と沖側端部位置の経時変化（縦断方向）を示したものである。岸側端部は現在までに約500 m延びている。延伸速度は1977年から1984

1 正会員 (株)エコー 調査解析部 課長
2 正会員 那覇港湾・空港整備事務所 所長
3 那覇港湾・空港整備事務所 中城出張所 所長
4 那覇港湾・空港整備事務所 中城出張所 環境管理官
5 (財)沿岸技術研究センター 主任研究員

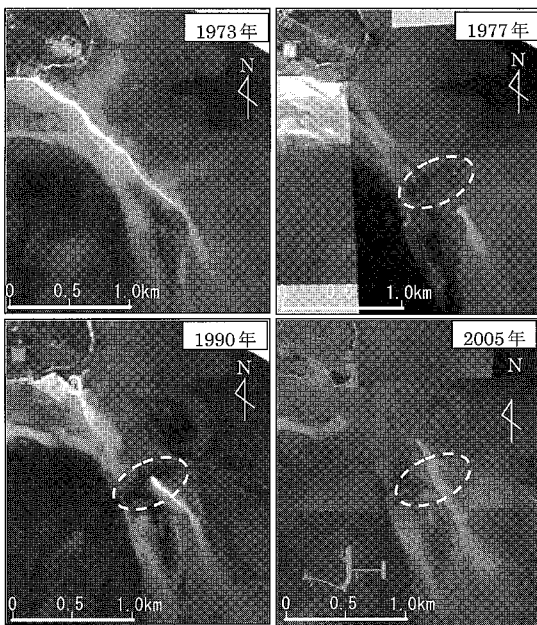


写真-2 東側砂州の空中写真

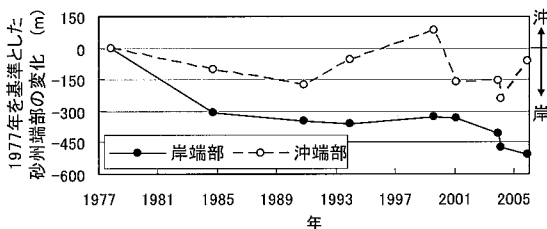


図-1 東側砂州の端部位置の経時変化

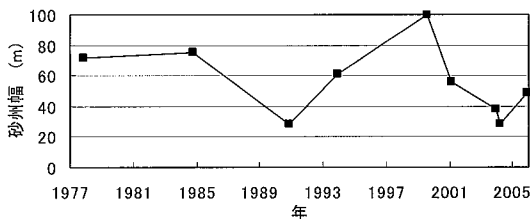


図-2 東側砂州幅の経時変化

年までの期間では約 44 m/yr となっており、1984 年に砂州の岸側端部が掘削航路部に到達した。掘削部での砂州の延伸速度 (1984 年から 2001 年) は、約 1.7 m/yr と遅くなっている。2001 年以降の砂州延伸速度が約 35 m/yr となり、再び延伸速度が速くなっている。2005 年の写真では航路掘削跡はほとんど砂で覆われて視認できなくなっている。このことから、掘削部で延伸速度が著しく遅くなった要因は、砂州の砂が航路部に流出したためであると考えられる。

一方、砂州の沖側端部の位置は、150 m 程度の範囲で変動しているものの、1977 年と 2005 年の位置はほぼ同じ位置にある。また、図-2 は 1977 年の砂州の岸側部位置で砂州幅を判読して、砂州幅の経年変化 (横断方向) を示したものである。砂州幅は 40 m 程度の範囲で変動するものの平均的には約 60 m となっている。砂州の沖側端部および砂州幅の変化は、岸端部より不明瞭であることから判読値にばらつきがあるものの、ほぼ一定である。以上のことから、砂州岸側端部の延伸は、砂州が岸側に移動したためでも、砂州自身が変形したのでもなく、砂州が岸側に成長したことによると考えられる。

砂州が成長 (延伸) するためには、周辺海域からの砂の供給が必要である。そこで、砂州延伸量から砂の供給量について概略の検討を行った。砂州断面は C.D.L.0 m 上に幅 60 m、高さ C.D.L.+2.0 m の三角形で近似される (図-3 参照)。2001 年以降の砂州延伸速度 (35 m/yr) に砂州断面積 (60 m³/m) を乗じると 2100 m³/yr となる。航路掘削部で 2006 年に実施したボーリング調査から、砂層と原地盤の境界は約 C.D.L.-1.8 m であり、航路掘削幅は約 600 m である。掘削航路が C.D.L.0 m まで埋まるためには 1080 m³/m の砂が必要になる。航路掘削部での砂州延伸速度 (1.7 m/yr) に、掘削航路断面と砂州断面を加えた面積 (1080 m³/m + 60 m³/m) を乗じると 1940 m³/yr となる。延伸速度の異なる 2 期間に対して推定した供給土砂量がほぼ一致することから、砂州への砂の供給量は概ね 2000 m³/yr であると考えられる。

以上のように、砂州は周辺からの土砂供給により岸に向かって徐々に成長しており、掘削などの人為的なインパクトが加わっても、自然に回復することが明らかとなった。

3. 荒天時の砂州変形に関する現地調査

2005 年 8 月から 10 月までの 2 ヶ月間に東側砂州周辺の地形測量を 3 回実施した (図-6 中の点線で囲んだ範囲)。同期間中に砂州の東西では水位変動および 2 成分流速を連続観測し、砂州に作用する外力を調べた。

図-3 は沖波有義波高が約 7 m となったじょう乱 (2005 年 9 月 4 日) を含む期間の砂州の地形変化を示したものである。観測期間中の潮位は最大で H.W.L. 程度であり A-A' 断面が没水することは無かった。地形変化の平面分布には、砂州縦断方向に帯状の変化域が認められる。帯状の変化は砂州東側で侵食、西側で堆積となっている。また、砂州岸側端部では明瞭に堆積していることが分かり、砂州が延伸されている。砂州頂部が高く没水しない A-A' 断面の変化は少なく、砂州頂部が没水する B-B' 断面では砂州の東側が侵食され、その西側に堆積する。図-5 に示すように、じょう乱の影響を受けな

い場合の地形変化は、A-A'断面とB-B'断面で砂州西側のC.D.L.+0.5~+1.5mを中心として堆積する。その結果、B-B'断面では砂州頂部高が回復する。

同期間に砂州東西で観測した波浪観測データから、砂州東側の波向はNEからSEに広く分布し、西側の波向はS, SSWが卓越しており、砂州東西の波は砂州の頂部に向う波向が支配的である。9月4日のじょう乱時に着目しても砂州頂部に向う波向となる。波はじょう乱時、通常時を問わず砂州頂部に向かう波向となっていた。次に、砂州横断方向のエネルギーフラックスと砂州移動との関係を調べる。2005年8月から9月の期間では台風の影響を受けており、砂州の東側で $87.2 \times 10^3 \text{ kw/m}$ 、西側で $71.6 \times 10^3 \text{ kw/m}$ となる。この期間のB-B'断面は、東側のエネルギーフラックスが相対的に大きいことから、砂州頂部が西側に移動したものと考えられる。2005年9月から10月の期間の横断方向のエネルギーフラックスは東側で $28.5 \times 10^3 \text{ kw/m}$ 、西側で $42.8 \times 10^3 \text{ kw/m}$ となる。台風来襲期とは逆に西側のエネルギーフラックスが卓越する。しかし、砂州は東側に移動しないことから、砂州はエネルギーフラックスが大きいときに移動し、移動方向は東西のエネルギーフラックスの大小に関係すると推定される。波エネルギーフラックスが小さい場合には、砂州頂部付近で波エネルギーが逸散され、砂を動かす力が小さいため、図-4に示すB-B'断面のように砂州頂部が回復すると考えられる。

東側砂州は台風後に変形することが漁業関係者から指摘されていたため、2004年10月19日に泡瀬地区を直撃した台風23号の通過前後に、砂州周辺の地形測量を

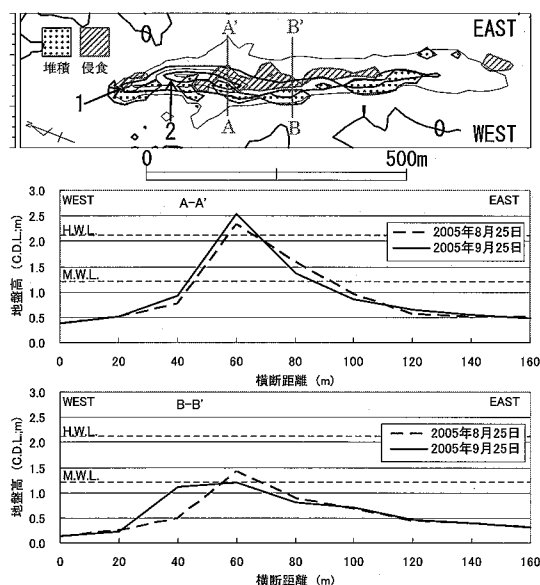


図-3 東側砂州の地形変化 (8月25日→9月25日)

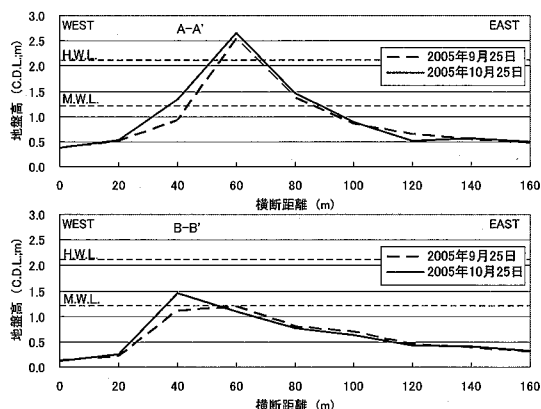


図-4 東側砂州の地形変化 (9月25日→10月25日)

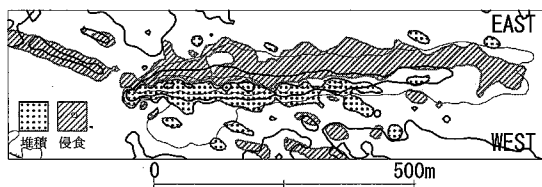


図-5 2004年10月の台風23号来襲前後の地形変化

実施した。

図-5は2004年10月と11月に実施した地形測量から、東側砂州の地形変化の平面分布を示したものである。2005年のじょう乱時に比べて、砂州の地形変化が大きい。台風23号来襲時の沖波有義波高は11.9mで、有義波周期は13.6sであったことから、2005年のじょう乱に比べて、砂州に作用する波エネルギーフラックスが明らかに大きいことから、2005年に比べて地形変化が大きくなっていると考えられる。

4. 砂州の形成過程についての基礎調査

砂州の形成過程を検討するために、砂州周辺海域の深淺測量、底質調査を実施した。

泡瀬地区を対象とした深淺測量は2003年7月から2005年2月までに、東西の砂州を含む約3.5km四方の範囲で合計4回実施した。図-6は2005年2月の泡瀬地区の等深線図を示したものである。図中の中央および左上の深掘れは人工的な掘削によるものである。

東西の砂州は、浅瀬地形のほぼ中央部に形成されている。泡瀬地区のC.D.L.0mの等深線に着目すると、海岸線に対して直角に沖に張り出した浅瀬地形が形成されており、東西の砂州は浅瀬地形のほぼ中央に形成されていることが分かる。波は等深線に対して直角となるように屈折変形するため、浅瀬が沖に張り出した地形では浅瀬の両側から中央に波向が変化すると考えられる。前述し

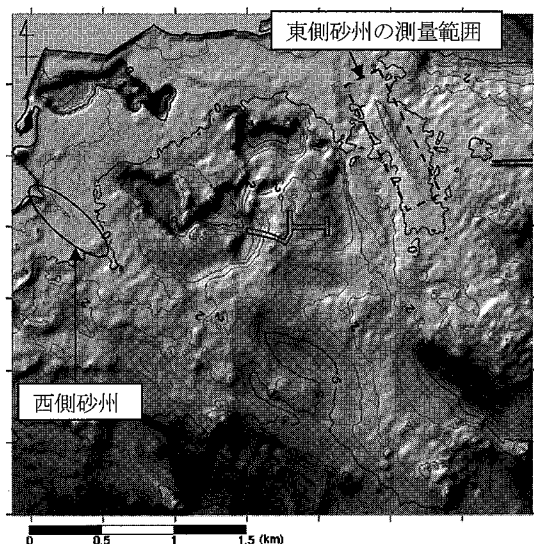


図-6 泡瀬地区の等深線と東側砂州の測量範囲

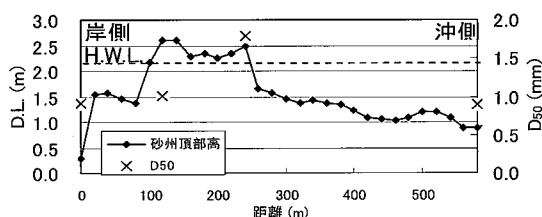


図-7 東側砂州の縦断地形と底質粒径

た荒天時の波浪観測では、砂州東西の波向が砂州の中央に向うことが確認されている。このように、海岸線に直角に浅瀬地形が張り出して波が収斂する場所に砂州が形成されていることになる。

砂州頂部に沿って沖側端部、中間、岸側端部で 50 cm 程度のコアを採取して、底質の粒度を調べた。

図-7 は東側砂州の縦断地形と砂州の表層 20 cm の平均粒径を示したものである。砂州は距離 100 m から 250 m の区間で H.W.L. ($D.L.+2.11$ m) より高く、通常は没水しない地形となっている。底質粒径は 250 m 付近の H.W.L. より高い地盤で最大となり、 $d_{50}=1.8$ mm となっている。その他の地点では 0.8 ~ 1.0 mm 程度となっている。さらに、底質の組成成分分析結果より、砂の重量比率はサンゴが 64 %、貝類・有孔虫が 11 %で、その他の鉱物類が 25 %であった。砂州の砂は約 75 %が海域で生産されたものであることが分かった。現地砂のサンゴや貝類の表面がゴツゴツし、砂粒に空隙があることが肉眼で確認された。そこで、現地砂とそれに対応した粒径の砂について沈降試験を実施した。現地砂の沈降速度は、それに対応した粒径の砂に比べて 0.6 ~ 0.8 倍程

度であることが判明した。

以上のデータ解析から、砂州の形成過程と維持機構に対して以下の仮説が設定される。

- ① 浅瀬地形の中央部に波が収斂する。
- ② 海域で生産された底質が時化時に、波・流れにより輸送され、浅瀬の中央部に堆積し、砂州が形成される。
- ③ 砂州が形成されると、砂州頂部に波がより収斂し易くなるため、砂州が維持されている。

5. 数値シミュレーションによる検討

以上の仮説の妥当性を数値シミュレーションにより検証する。

まず、浅瀬地形の中央に波が収斂する現象について、砂州が形成されていない浅瀬地形に対して波浪変形計算を行うことで検証する。深浅測量結果から砂州は地盤高が C.D.L. 0 m 以上の領域であると考えられたため、この砂州を取り除いた地形を作り、浅瀬地形とする。波浪変形計算は、中城湾のリーフ外縁で波が碎波変形することを考慮するため、中城湾を含む約 30 km 四方の領域を対象とする。計算格子は 100 m の正方格子とし、泡瀬地区の 10 km 四方については 20 m 格子に接続して計算する。波浪条件は津堅島で観測された波浪データ (NOWPHAS) を基に、Hallermeier (1978) により提案された移動限界水深を推定するための波高である Effective Wave Height ($H_{1/3}=5.2$ m, $T_{1/3}=9.2$ s) を用いる。なお、潮位による影響を考慮して、H.W.L. と M.W.L. の 2 潮位に対して検討する。図-8 は浅瀬地形に対する M.W.L. に対する波向分布を示したものである。

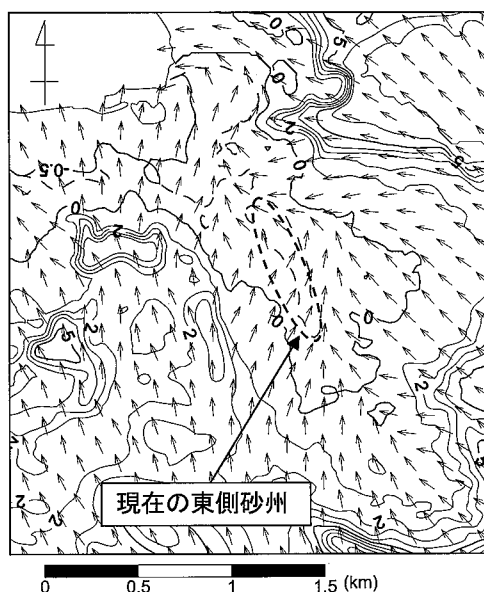


図-8 波の収斂 (仮説①) の検証

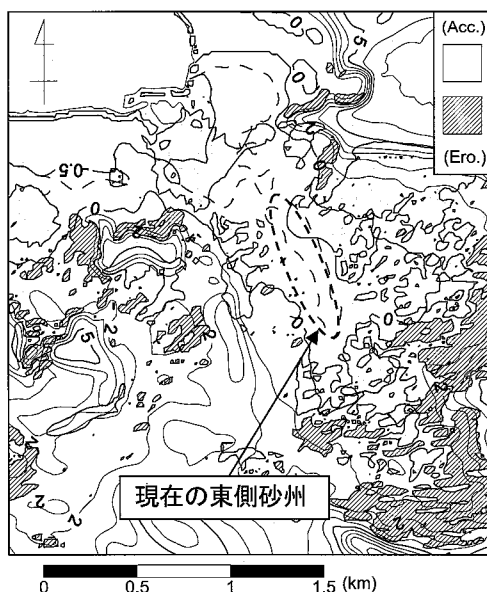


図-9 砂州形成過程 (仮説②) の検証

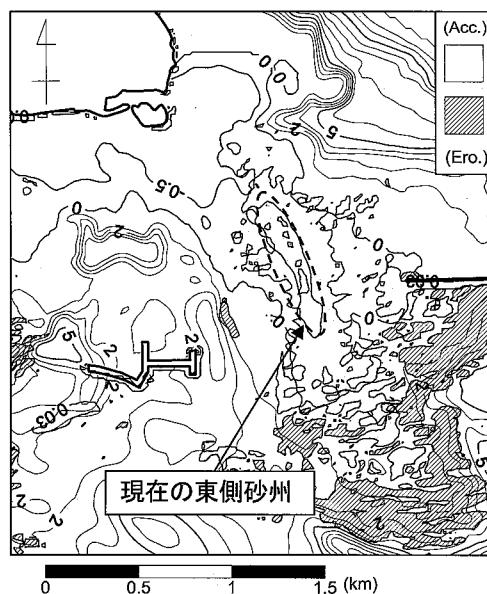


図-10 砂州維持機構 (仮説③) の検証

波向は浅瀬地形外縁部で浅瀬地形中央部に向けて急激に変化することが分かる。以上のことから、仮説①について検証された。なお、H.W.L. 時の波向分布は砂州の先端付近で浅瀬地形のほぼ中央に屈折し、それより岸側で砂州と平行な波向となる。

次に、仮説②を検討するために、上記の波浪条件、および潮位条件に対して、渡辺ら (1984) の波および流れ

による漂砂量式を用いて地形変化のシミュレーションを実施した。図-9に示すように浅瀬地形に対するシミュレーションでは、堆積域が岸に近い場所と C.D.L.0 m の線に沿って生じる。M.W.L. では堆積域が砂州の先端より沖の領域を中心に堆積することが確認され、潮位により堆積域が変化するものの砂州が形成されている領域に堆積域が形成されることが確認された。

さらに、図-10に示す H.W.L. より頂部が 20 cm 低い砂州が形成されたと仮定したシミュレーション結果では、砂州がない場合に比べて、砂が砂州周辺に堆積する傾向が明確となる。このことから、砂州が形成され始めると、砂が砂州周辺に堆積し易くなることが再現され、仮説③が検証された。

以上のように、数値シミュレーションで砂州の形成過程、維持機構が検証できたものの、図-5に示す 2004 年 10 月のじょう乱時の地形変化の特徴の一つである砂州沖側での侵食については検証されていない。長期的には砂州沖端部が 150 m 程度の変動を伴うもののほぼ同じ位置にあると判断されることから、じょう乱時に侵食された砂州沖端部の回復過程、砂の供給源を調べるのが課題であると考えられる。

6. おわりに

砂州の底質、周辺地形、砂州周辺外力から多面的に砂州形成要因を検討した。(1)形成メカニズム：干潟(浅場)地形により波が屈折変形し、収斂する付近に砂が運ばれて砂州が形成された。(2)維持機構：高波浪時には砂州頂部が侵食を受けるものの、通常時に砂州頂部付近に漂砂が堆積し砂州頂部高が高くなるセルフメンテナンス機構を有する。(3)干潟地形(原地形)を初期地形とした計算で形成過程を、また、現況地形を初期地形とした計算により維持過程を、それぞれ検証することができた。

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漂砂研究室長、入江九州大学名誉教授、津嘉山琉球大学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

- 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回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.
- Hallermeier, R.J. (1978): Uses for a calculated limit depth to beach erosion, Proc. 16th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 1493-1512.