

セルフデザインによる人工干潟の 地形形成過程に関する二次元水理実験

2-D PHYSICAL MODEL TEST ON MORPHOLOGICAL CHANGE OF THE ARTIFICIAL TIDAL FLAT IN THE SELF-DESIGN PROCESS

湯浅城之¹・片倉徳男²・高山百合子²・上野成三³
Shiroyuki YUASA, Norio KATAKURA, Yuriko TAKAYAMA and Seizo UENO

¹正会員 (財) 三重県産業支援センター (〒517-0501 三重県志摩市阿児町鶴方3098-9)

²正会員 大成建設(株) 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

³正会員 工博 大成建設(株) 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

The construction of a tidal flat in shallow sea area is a difficult work, because the construction barge is hard to enter to the area where dry and wet condition repeatedly changes dependently on tides. Although the design condition of the tidal flat shape was managed to be constructed by careful works, the deformations by wave actions and the consolidations of the topography have been reported. According to this situation, new concept to form tidal flat in 'self-design' process, in which the shape of a tidal flat is allowed to deform by natural process due to waves, is introduced. In this study, the property of tidal flat deformation was studied by 2D wave flume model test. As for the flat shape of the initial topography, a berm was formed at the tip of tidal flat, moved to the shore, resulting in the formation of a tidal flat topography. This result shows that tidal flat can be formed by the self-design process under natural wave actions.

Key Words : *Sediment transport, berm, movable bed model, bottom grain size distribution*

1. はじめに

我々の日常生活や社会活動において排出される負荷量の増加や沿岸域の開発に伴い、閉鎖性の強い内湾では富栄養化などが起こり、深刻な問題となっている。特に都市部周辺に存在していた干潟は、その立地条件に加え、遠浅という地形形状や波浪状況が比較的穏やかであることなどから、戦後 50 年間で約 4 割の面積が消失した。その一方で、沿岸環境の再生・創造等を目的とした人工干潟の造成が各地で行われるようになり、1978 年以降に約 3,500ha の干潟が造成・計画されている¹⁾。近年では干潟に関する多くの研究や調査が行われ、干潟が有する生物生息機能や水質浄化機能等が認識されるようになり、干潟に生息する底生生物にとって、地盤高や底質が生活環境の重要な因子であることも明らかになってきた²⁾⁻⁵⁾。しかし、潮汐によって冠水・乾出を繰り返す潮間帯において、広大で緩勾配な形状を造成することは、施工上、容易なことではない。特に、秋季から冬季にかけての太平洋沿岸域では、大潮の夜間でないと潮位が下がらず、陸側からの作業時間は限られたものとなる。また、設計通りに造成

された人工干潟においても、波による侵食や圧密沈下等の影響を受け、造成当初の地形形状や底質粒度を維持できないという事例も報告されている。

こうしたことから、完成された干潟地形を設計・施工するのではなく、波等の自然変形の成り行きに任せたセルフデザインによって干潟を形成させていくという考えも出てきている¹⁾。そこで本研究では、施工が容易な形状を初期地形とした水理実験を実施し、波浪によって干潟地形が形成されていく過程について確認した。

2. 実験装置および方法

(1) 実験方法

造波機を備えた大型二次元水槽(長さ 25m, 幅 0.5m, 高さ 1m)に縮尺 1/10 となる干潟模型を作製し(図-1)、表-1 に示す条件において、不規則波を作用させたときの地形形状および底質粒度の変化特性について調べた。

実験は、初期地形の異なる 2 ケース(Case1, Case2)について実施した。

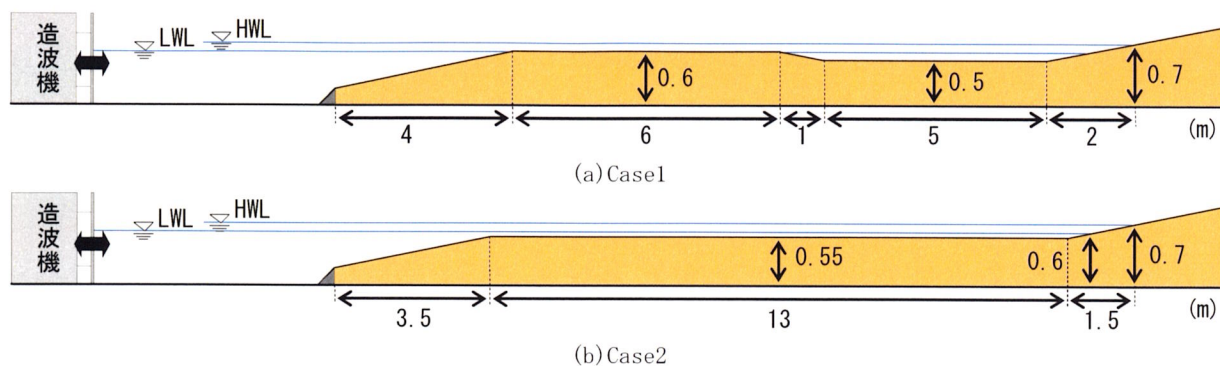


図-1 干潟模型

表-1 実験条件

実 験 縮 尺		1/10
干潟模型	法面勾配	1/10
作用波	有義波高	20 cm
	有義周期	1.5 s
潮 汐	周 期	4.0 h
	振 幅	5 cm
潮 位	LWL	0 cm
	HWL	10 cm
測 定	時 間	0, 8, 32, 64, 96, 128, 160, 192
	潮汐周期	0, 2, 8, 16, 24, 32, 40, 48

(2) 干潟模型

干潟模型の初期形状を図-1 に示す。実験は、形状の異なる移動床の 2 ケース (Case1, Case2) について実施した。干潟模型の底質材料には、粒径が約 0.02~1mm の幅広い粒度分布を持つ混合した日光珪砂（中央粒径：約 0.25mm，シルト粘土含有率：約 17%，均等係数：約 7）を用いた。

Case1 は、来襲波の影響が大きい沖側にマウンド（盛土）を設けた形状で、天端の高さを LWL，岸側のフラット部の水深を LWL より 10cm 低くなるように設定した。これは、沖側に造成したマウンドの土砂が岸沖漂砂によって岸方向に移動し、干潟地形が形成されることを想定して設計した。干潟の影響が大きい陸側からの作業量が軽減すれば、施工全体が容易になると考えられる。

Case2 は、LWL より 5cm 低くて長いテラスがある形状とした。このフラット部の水深は、Case1 の沖側マウンドと岸側フラットの間であり、両ケースの土量は、ほぼ等しくなっている。このような形状にしたのは、フラット部の水深を LWL よりもやや低くすることによって、岸方向に移動する砂量が多く

なり、干潟地形が形成しやすくなると考えたためである。

なお、沖側法面の勾配は、両ケースとも 1/10 とした。

(3) 作用波

これまでに、著者らは、常時波浪と高波浪による波浪履歴を考慮した上で、干潟地形を対象とした二次元水理実験を実施してきた。その結果、波浪履歴によって、常時波浪作用時には堆積・細粒化し、高波浪作用時には侵食・粗粒化する特性があることが明らかとなった⁶⁾。

しかし、高波浪作用時の地形変化量に対して、常時波浪作用時の変化量は非常に小さくなっている。そのため、本実験では、地形が大きく変形する高波浪 ($H_{1/3}=20\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$) のみを設定して行った。なお、想定した高波浪の有義波高は、比較的静穏な海域における現地観測から、実スケールで 2m の波とした。

(4) 潮位変動

緩勾配な形状である干潟では、潮位変動によって汀線の位置とともに、砕波帯の位置や干潟上での波高も大きく変化している。著書らは、潮位を固定したケースと変動したケースによる水理実験を実施し、潮位変動によって侵食・堆積の変化が緩やかになることも明らかにしている⁶⁾。これは、許らの実験⁷⁾とも同様な結果となっている。この様に、干潟の地形変化には、潮位変動が重要な役割を果たしていることから、本実験においても潮位変動を与えることとした。

潮位変動は、 M_2 分潮を対象とし、2 台のポンプを用いて水槽内の水を給水・排水することにより水位を変化させた。ポンプは、水位センサの制御により、LWL もしくは HWL になると自動的に給水・排水が切り替わるように作動させた。

(5) 計測

計測は、不規則波作用前（初期計測）と不規則波開始 8, 32, 64, 96, 128, 160 および 192 時間後

にいったん造波を止め、地形計測（岸沖方向 10cm 間隔）と底質採取（岸沖方向 1m 間隔、表層 5mm）を行った。この測定時間は、実験縮尺における潮汐周期に換算すると 2, 8, 16, 24, 32, 40 および 48 周期後に該当する。

採取した底質試料は、レーザ回折式粒度分布測定装置を用いて粒度分布を計測し、中央粒径(d_{50})、シルト粘土含有率（粒径 0.075mm 以下）および均等係数(d_{60}/d_{10})を算出した。

なお、Case1 においては、8 時間後の地形計測を行った時点で終了し、底質採取および粒度分析は、Case2 のみ実施した。

(6) 相似性

地形変化に関する移動床模型実験を実施する際には、底質の相似則に留意する必要がある。本実験においては、外力（波）に関してはフルード則に基づいて設定しているが、底質材料に関しては、これを満たしていない。しかし、著者らは同じ底質で異なる縮尺の実験^{6),8)}も行っており、その結果は Sunamura・Horikawa⁹⁾の堆積・侵食パラメータが示す侵食・堆積の傾向と同様の結果であった。よって、本実験の相似性は、ほぼ満足していると判断した。

3. 実験結果および考察

(1) 地形形状

a) Case1

Case1 における地形変化状況を図-2 に示す。

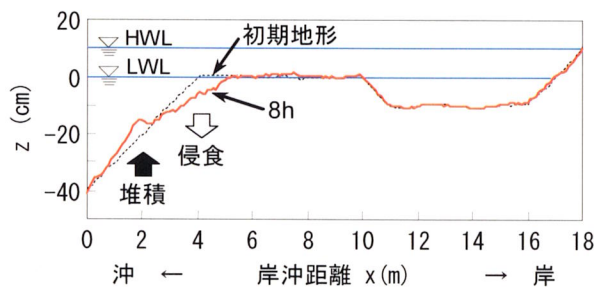


図-2 地形変化状況 (Case1)

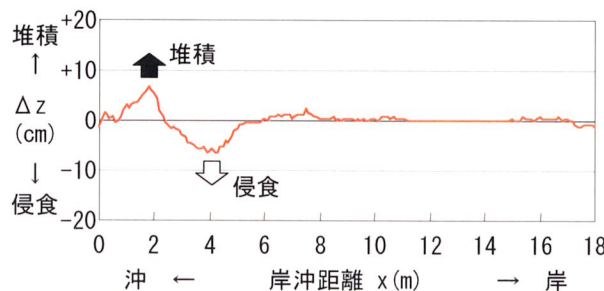


図-3 地形変化量 (Case1)

Case1 の初期地形は、天端の高さが LWL となるマウンドが干潟の先端にあることから、碎波の影響を直接受けて法肩付近 ($x=3\sim5$ m) で大きく侵食し、沖側の法面 ($x=1\sim3$ m) に堆積してバーを形成した。法肩付近での碎波の影響や、マウンド部における水深が最大でも高潮時の 10cm であることから、侵食域から岸方向 ($x=5\sim18$ m) にかけて到達する作用波の波高は減少しており、この区間においては、地形変化がほとんど見られなかった。

造波後における地形変化量（造波後地形と初期地形の差）を図-3 に示す。侵食量・堆積量は、両者とも最大で約 7cm に達していた。侵食した砂のうち、大部分が沖方向に輸送され、岸方向に輸送された量は僅かであった。

以上から、本ケースの形状では、干潟先端部でのみ地形変化が生じ、干潟地形を形成することは出来ないことが判明した。

b) Case2

Case2 における地形形状の経時変化を図-4 に示す。造波開始8時間後に法肩付近 ($x=3\sim4$ m) で見られた侵食範囲は、32時間後ではさらに大きくなり、また、その岸側 ($x=7\sim8.5$ m) に堆積してバームを形成した。

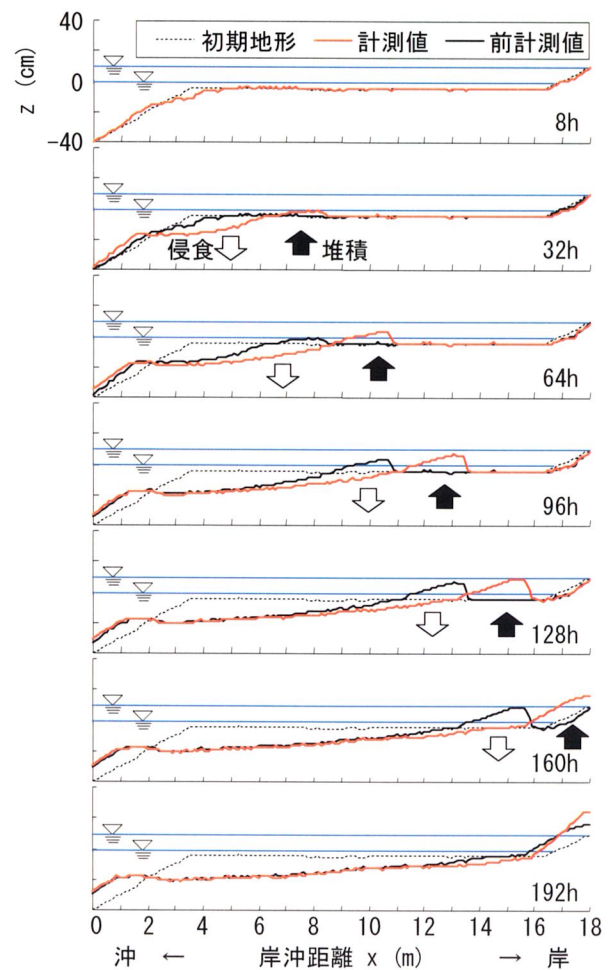


図-4 地形形状の経時変化 (Case2)

その後、高波浪の作用を継続すると、バームの位置 $x(m)$ は、表-2に示すように造波開始160時間後にかけて32時間（潮汐周期で8周期）ごとに約2.5mのほぼ等速度で岸方向に大きく成長させながら後退し、160時間後には岸端に達した。干潟先端の法肩付近 ($x=3\sim4m$) では、造波開始直後から碎波の影響を受け、侵食量は最大となっており、地盤高は、初期地形の-5cmから約-20cmへと約-15cmの変化が見られた。96時間後以降は、概ね安定した状態となったが、このときの地盤高 ($z=-20cm$) は、式(1)から求められる佐藤・田中¹⁰⁾の完全移動限界水深と等しい結果になっている。この限界水深より深い所では、地形変化が明瞭に現れないことから、これ以上、侵食が進行することはないと考えられる。

$$Y_l = 0.417 \left(\frac{H_0}{L_0} \right) \left(\frac{L_0}{d} \right)^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 Y_l : h_l/L_0 の関数、 h_l : 移動限界水深(m)、 H_0 : 沖波波高(m)、 L_0 : 沖波波長(m)、 d : 砂粒子の粒径(mm)である。

地形変化量の経時変化を図-5に示す。ここでは、造波開始後から32時間ごとの変化量 (Δz) を表した。干潟先端付近 ($x=2\sim5m$) では、96時間後にはほぼ平衡状態となっており、テラス部 ($x=5\sim12m$) においても、バームが岸に達した160時間後には、変化はほとんど見られなかった。初期地形では水平だったテラス部は、約1/100となる緩勾配を形成してほぼ安定した形状 ($x=1\sim16m$) となった。

以上より、完成された干潟地形を設計・施工しなくても、セルフデザインによる自然変形によって、水平な地形から緩勾配な干潟地形を形成出来ることが明らかとなった。

表-2 バーム頂点移動状況

時間	32	64	96	128	160
頂点座標 $x(m)$	8.1	10.5	13.1	15.3	18.0
頂点高さ $z(cm)$	-1.1	3.6	6.6	8.7	16.0

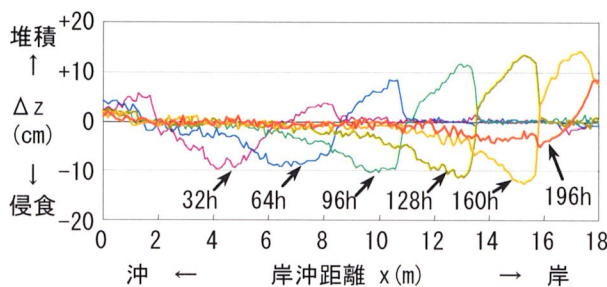


図-5 地形変化量 (Case2)

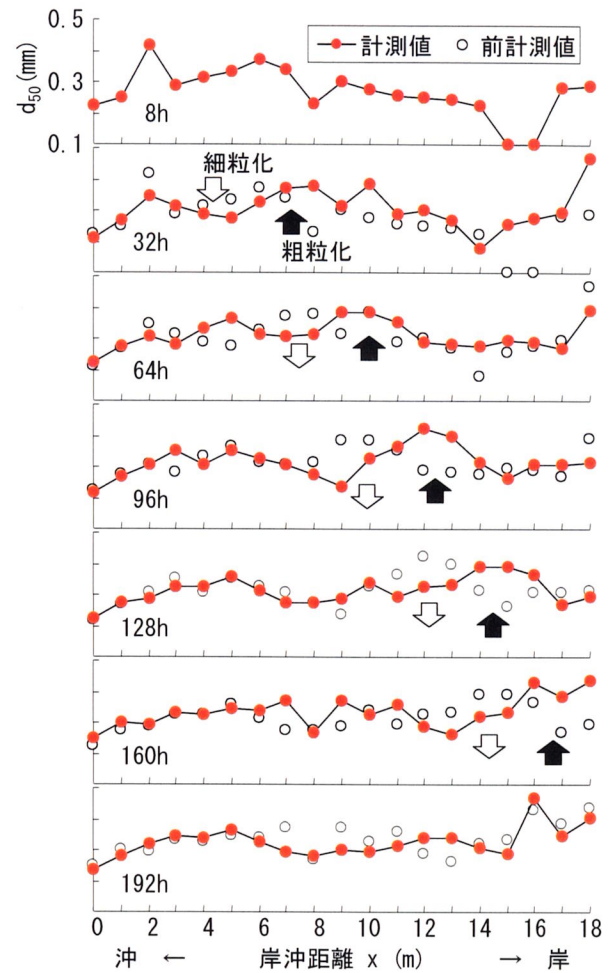


図-6 底質中央粒径の経時変化 (Case2)

(2) 底質粒度

図-6 に Case2 における底質中央粒径の経時変化状況を示す。造波開始 32 時間後では、 $x=7\sim8m$ 付近で粗粒化し、その沖側 ($x=4\sim6m$) で細粒化する傾向が見られた。この粗粒化した地点はバームが形成された位置 (図-4 参照) に該当しており、バームの後退に連動して、粗粒化・細粒化した範囲も岸側に移動した。バームの沖側では細粒化しているが、これは細粒分が堆積したからではなく、粗粒化したバームの底質が侵食されて移動し、元地盤が露出したためである。

図-7 に底質 ((a)シルト粘土含有率、(b)均等係数) の経時変化を示す。両者は、ほぼ同様の变化傾向を示しており、細粒分が多くなるとシルト粘土含有率・均等係数は大きくなり、逆に細粒分が少なくなるとシルト粘土含有率・均等係数が小さくなっている。また、両者の変化状況は、中央粒径と同様に地形変化と関連しており、バームの位置に連動して粗粒化・細粒化する範囲も移動していることが確認できた。

なお、8 時間後の $x=15\sim16m$ 地点では、両者は逆の変化傾向を示している。これは、細粒分が多く含まれ、 d_{60} の値が小さいため均等係数も小さくなっ

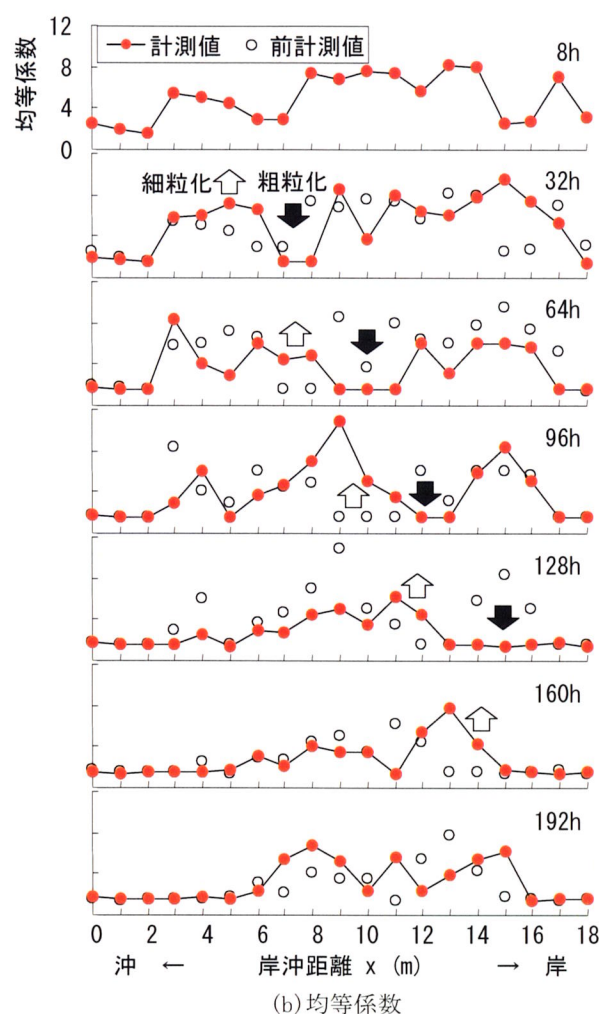
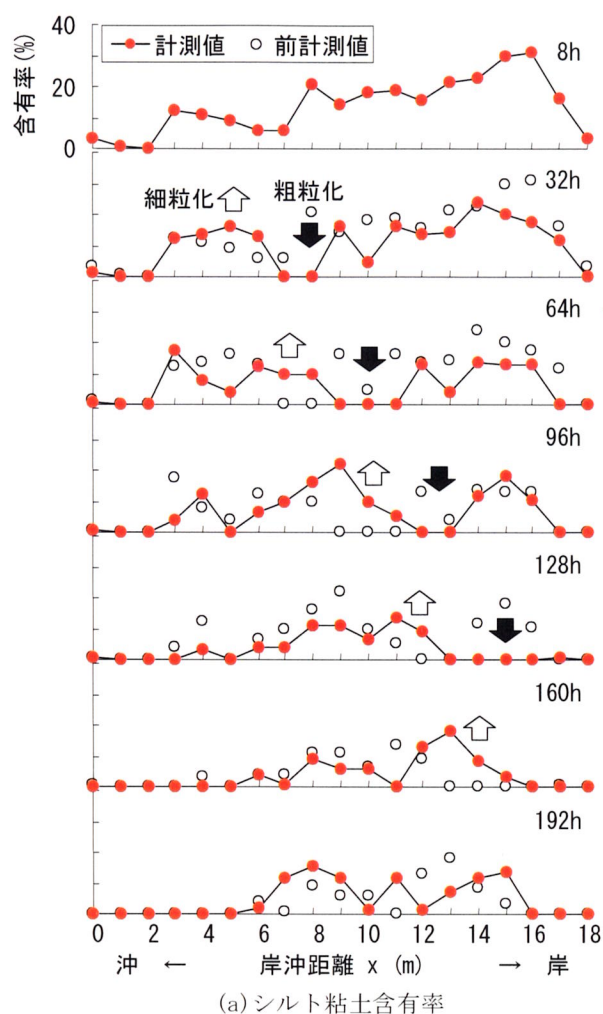


図-7 底質の経時変化 (Case2)

ていることに起因する。この地点では長いテラス部によって波高が減少し、細粒分が多くが輸送されたことが原因と考えられる。

本実験では、荒天時を想定した高波浪のみを作用させたため、全体的には細粒分が流出し、粗粒化する傾向にあった。高波浪だけでなく、常時波浪との波浪履歴を考慮した実験では、常時波浪時に細粒化する特性があることから⁶⁾、現場海域では、これほどまでに粗粒化することはないと考えられる。

また、干潟に生息する底生生物にとって、細粒分は重要な環境因子のひとつであることから³⁾、細粒分を保持できる人工干潟の底質安定化対策が必要とされる。その一例として、コアマモ場の持つ地形・底質安定化機能が有効であると期待される。干潟上に存在するコアマモ場は、葉部によって海底への作用流速を低減させ、地形と底質粒度を安定させる効果を持っている¹¹⁾。さらに、砂泥内に張り巡らされた地下茎や根によって地形が安定する¹²⁾ことも明らかになっており、干潟の安定化に寄与している。今後は、細粒分保持機能を有した人工干潟施工技術の開発も必要とされる。

4. 結論

本研究から得られた主要な結論を以下にまとめる。

- (1) Case1 では、法肩部分での碎波とともに大きな侵食が起こったが、天端上の水深が浅く、侵食された底質のほとんどが沖方向に輸送されてバーを形成した。岸側部では大きな地形変化がなく、干潟地形を形成できなかった。
- (2) Case2 では、法肩周辺で形成されたバームが徐々に岸方向に移動し、最終的には一様勾配の地形となって平衡状態になることが確認された。このことから、緩勾配な初期地形を造成しなくても自然変形によって干潟地形を形成できることが明らかになった。
- (3) 底質粒度は、バーム形成域で粗粒化しており、バームの移動と連動して粗粒化した範囲も岸方向に移動した。
- (4) 本実験では高波浪のみを作用させたため、底質の細粒分が流出して全体的に粗粒化した。干潟に生息する底生生物には、適度な細粒分が

必要であることから、底質変化を抑制する施工技術の開発も必要であることが課題として挙げられる。

謝辞：本研究は、三重県地域結集型共同研究事業の一部で実施された。また、実験にあたり、大成サービス（株）から多大な協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 海の自然再生ワーキンググループ：海の自然再生ハンドブックその計画・技術・実践―第2巻 干潟編，138p，ぎょうせい，2003.
- 2) 上野成三・高山百合子・湯浅城之：人工干潟の設計資料として整理した三番瀬干潟における底生生物の出現特性：海岸工学論文集，第51巻，pp.1006-1010，2004.
- 3) 国分秀樹・奥村宏征・上野成三・高山百合子・湯浅城之：英虞湾における浚渫ヘドロを用いた干潟造成実験から得られた干潟底質の最適条件，海岸工学論文集，第51巻，pp.1191-1195，2004.
- 4) 国分秀樹・奥村宏征・上野成三・高山百合子・湯浅城之：英虞湾における浚渫ヘドロを用いた大規模造成干潟の底質と底生生物の特性について，海岸工学論文集，第52巻，pp.1196-1200，2005.
- 5) 曹慶鎮・丁仁永・西嶋渉・滝本和人・岡田光正：人工干潟の創出及び復元における斜面勾配の影響，土木学会論文集，No.727/VII-26，pp.23-30，2003.
- 6) 湯浅城之・上野成三：干潟地形を対象とした地形と底質粒度に関する二次元水理実験，海岸工学論文集，第52巻，pp.436-440，2005.
- 7) 許東秀・牛木賢司・高木祐介・岩田好一郎：人工干潟の地形変化に関する研究，海岸工学論文集，第50巻，pp.1221-1225，2003.
- 8) 湯浅城之・上野成三・高山百合子・織田幸伸：干潟地形を対象とした地形と底質粒度に関する平面水理実験，海岸工学論文集，第53巻，pp.481-485，2006.
- 9) Sunamura, T. and K. Horikawa: Two-dimensional beach transformation due to waves, *Proc. 14th Coastal Eng. Conf.*, ASCE, pp.920-938, 1974.
- 10) 佐藤昭二・田中則男：水平床における波による砂移動について，第9回海岸工学講演会講演集，pp.95-100，1962.
- 11) 湯浅城之・上野成三・高山百合子・織田幸伸：コアマモ場の干潟地形安定化効果に関する二次元水理実験，海岸工学論文集，第53巻，pp.496-500，2006.
- 12) 海の自然再生ワーキンググループ：海の自然再生ハンドブックその計画・技術・実践―第3巻 藻場編，110p，ぎょうせい，2003.