

サンゴ礫海浜の遡上帯における 透水特性と堆積特性

藤川 大樹¹・田島 芳満²・竹森 涼¹・
岩塚 雄大³・琴浦 毅³・茅根 創⁴

¹東京大学大学院修士課程 工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail:fujikawa@coastal.t.u-tokyo.ac.jp

²正会員 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³正会員 五洋建設株式会社 技術研究所(〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

⁴東京大学大学院教授 理学系研究科地球惑星科学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

サンゴ礫海浜では、粒径が大きく比重が軽いというサンゴ礫の特性から、通常のシリカ底質の海岸とは違った水理特性や海浜変形特性が見られる。本研究では、西表島沖合に位置する、サンゴ礫で形成されたバラス島を調査対象地とし、現地調査及び数値計算に基づき、サンゴ礫海浜の遡上帯における透水特性と堆積特性を明らかにすることを目的とした。表層堆積礫の粒径の分布を分析することにより、高潮位、高波浪時に比較的粒径の大きいサンゴ礫が標高の高い位置まで積み上げられている事が推察された。また、礫層内に設置した波高計の計測結果から、礫層内に波動が浸透している事が確認された。さらに、透水層を考慮した数値計算より、サンゴ礫層における透水係数は通常の砂浜におけるそれに対して大幅に大きいことが明らかとなった。

Key Words : coral beach, permeability, swash zone, morphology change

1. はじめに

サンゴ州島はサンゴ礁上にサンゴ礫が堆積して形成される標高数mの島である。サンゴ砂礫による砂浜や州島の形成過程を解明し、州島の形成を促進・制御する技術を確立できれば、サンゴの発達した熱帯・亜熱帯の島々における沿岸域の保全・保護、さらには新たな国土の創出に大きく貢献すると考えられる。本研究では、バラス島を調査対象地とし、現地調査及び数値計算に基づき、特にサンゴ礫海浜の遡上帯における透水特性とそれに伴うサンゴ礫の移動および堆積特性を明らかにすることを目的とする。

2. 現地調査概要

(1) 調査対象地

調査対象地は沖縄県八重山地方の西表島北方の沖合に位置するバラス島を対象とした。バラス島は長軸約200 m、短軸10~20 mの大きさの島であり、数 cm~数十 cmの粒径のサンゴ礫が堆積して形成された島である(図-1)。現地で得た証言や航空写真によれば、バラス島は海象条件に応じて激しく位置を変えながらも、50年以上の長期

間にわたって存在している¹⁾。

(2) 調査方法

本研究では、2014年11月20日から11月22日の期間において現地調査を実施した。以下に調査内容および方法を整理する。

a) 地形測量

オートレベルを用いてバラス島長軸方向に1本、短軸方向に9本の測線について水準測量を行った。また、それぞれの測線上における表層堆積礫をGPSデジタルカメラで撮影し、表層サンゴ礫の粒径分布を調べた。

b) サンゴ礫層内の水位変動計測

図-2に示した測線②に沿って3台の水圧式波高計を設置し、それぞれ0.5秒間隔で時々刻々の水圧を計測した。波高計の設置位置は砕波点付近の海底面上(図-3 W3)、および満潮および干潮時の汀線付近の礫層内(図-3 W1, W2)とした。波高計W1およびW2はそれぞれの地点で地下水面が見えるまで穴を掘って地下水面下に設置し、設置後に埋め戻した。穴の深さはそれぞれ32 cmおよび36 cmである。両波高計ともに満潮時には礫表層まで完全に水没し、満潮時におけるそれぞれの波高計で計測した水位は、互いに一致することを確認した。

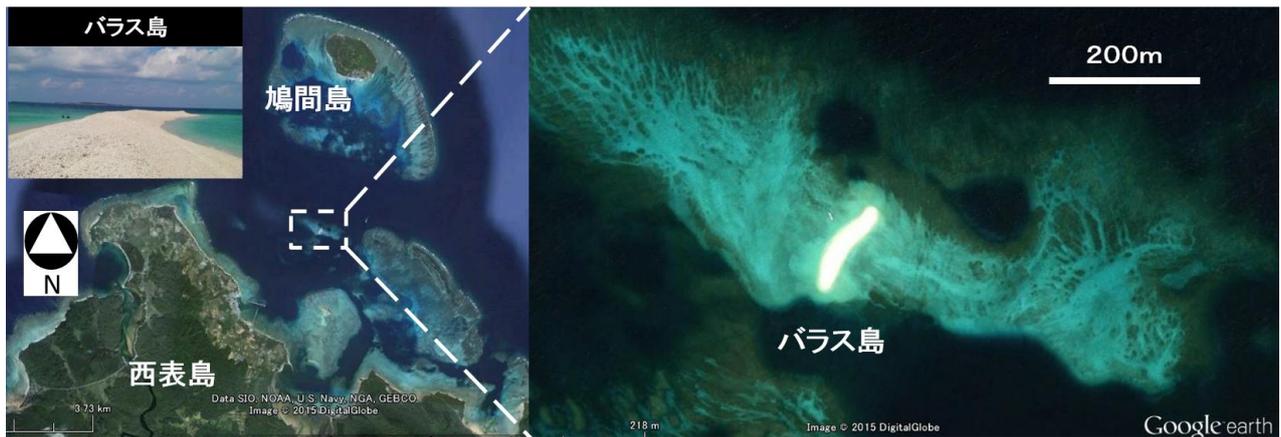


図-1 バラス島の位置



図-2 現地調査概要

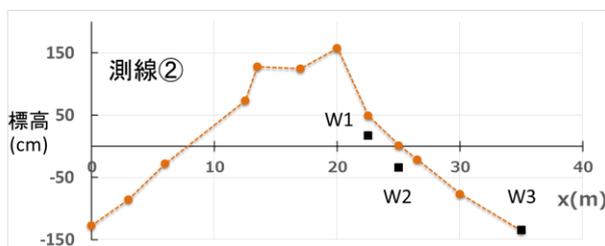


図-3 測線②における断面地形および波高計の設置位置

c) 定点観測カメラによる遡上帯の監視

定点観測カメラをバラス島頂部に設置し、時々刻々変形する遡上帯の様子を3秒間隔で撮影した(図-2写真).

3. 現地調査結果

(1) 表層堆積礫の分布

代表的な測線とその測線上のサンゴ礫の分布を図-4に示した. 図-4より, 標高の高い島中央部に比較的粒径の大きいサンゴ礫が堆積している様子が確認できる. これより, 潮位や波高が高い台風などの高波浪時に波によって粒径十数 cm~数十 cmの大きなサンゴ礫が標高約 2~3 mの高さまで積み上げられていると推測される. これに対し, 平常時の潮位における汀線近傍では粒径数

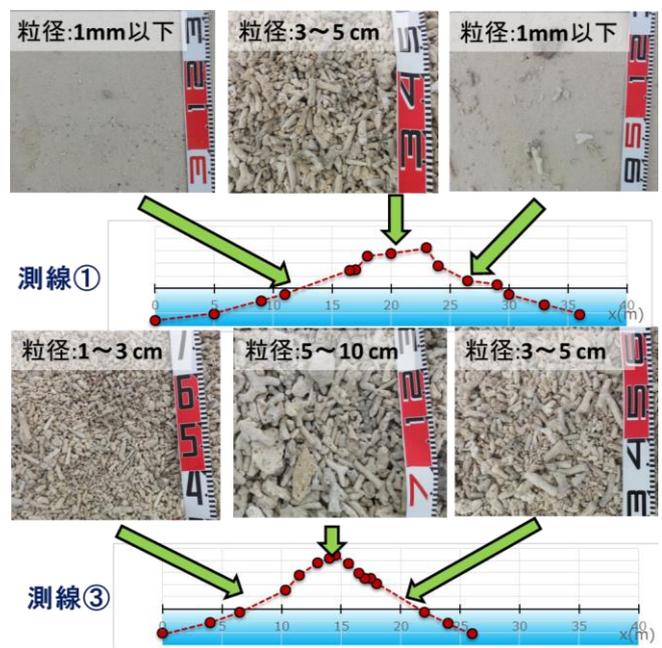


図-4 各測線上のサンゴ礫の分布

cmオーダーの相対的に小さいサンゴ礫が卓越的に分布しており, 波浪条件によって運ばれ堆積する礫の粒径に違いがあることが推察された.

また, 異なる測線における同じ潮位における汀線付近でのサンゴ礫の粒径を比べると, 来襲波浪が比較的大きかったバラス島南側で地形勾配が急である測線上には, 来襲波浪が比較的穏やかで地形勾配も緩やかであった測線に比べて, 粒径の大きいサンゴ礫が堆積していることも分かった.

(2) サンゴ礫層内の水位変動計測

3つの波高計で計測された水圧変動から10分毎の平均水位, 二乗平均波高 H_{ms} 及びW1, W2波高計で計測された平均水位と沖合のW3波高計で計測された平均水位の差を求めて図-5に示した. 図-5より, 潮位が上昇するにつれて, W2, W3でも水位変動が計測され, 水位変動

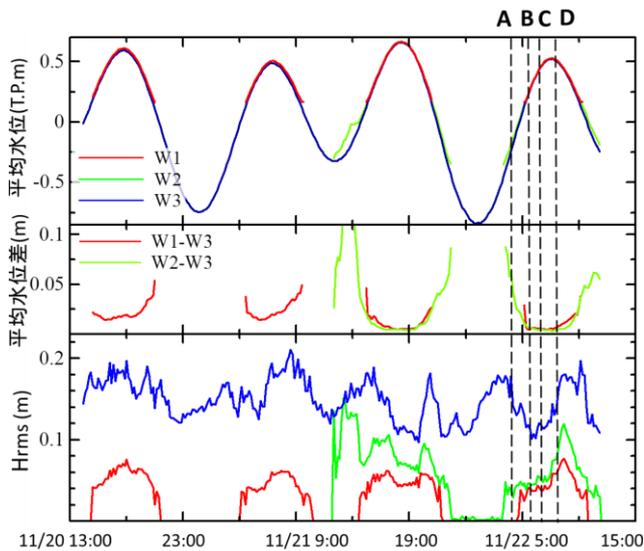


図-5 平均水位 (上段), 平均水位差 (中段) と Hrms (下段)

成分の二乗平均波高 H_{rms} も潮位の上昇とともに増大していることが分かる. また満潮時における平均水位は3つの波高計でほぼ一致しているのに対し, 低潮時には礫層内に設置した波高計W1およびW2における水位が, 海底面に設置した波高計W3において計測した平均水位よりも数cm程度高くなった. これは礫浜に伝播する波の砕波に伴う wave setup に加え, 礫層内へ波が浸透することによる礫層内での水位上昇が影響していると推察される.

波高計W1~W3で計測された水位変動から, 図-5のA, B, C, Dの時刻におけるパワースペクトル分布を図-6に示した. 潮位が低く, W1, W2波高計が水に浸かっている時刻Aでは, どの周期の成分の波も観測されていない. W2で水位変動が計測され始めた直後である時刻Bでは, 周波数0.1 Hz以下のパワースペクトルはW3とW2では比較的近い値を示しているのに対し, 周波数0.1 Hz以上では, W2のパワースペクトルはW3のそれに比べて大きく低減していることが分かる. すなわち, 長周期成分の波はサンゴ礫層内に伝播しているものの, 短周期成分の波は礫層内で大幅に減衰していることが分かる.

次に潮位が上がり, 波高計設置高さに比べて水面が完全に高くなった時刻C, Dでは, W1~W3のパワースペクトルに差が小さくなり, 埋設した波高計でも上部の礫層が完全に水没すると比較的周期の短い波浪成分の圧力も礫層内まで伝わっていることが分かった.

次に, 礫層内の波高計W1, W2における波高とW3における波高の比W1/W3, W2/W3を波高伝達率と定義し, 相対水位と波高伝達率の関係を図-7に示した. W3で計測された水位を波高計設置高さを基準とした水位に変換したものを相対水位とした. 図より相対水位が高くなるほど, 波高伝達率が大きくなっていることが分かる. 波高計は礫層内に埋設しているので, 潮位が上昇して相対

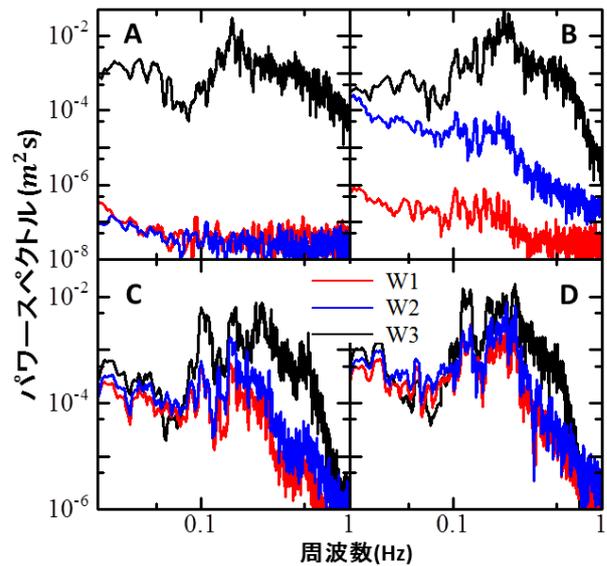


図-6 各時刻に観測されたパワースペクトル

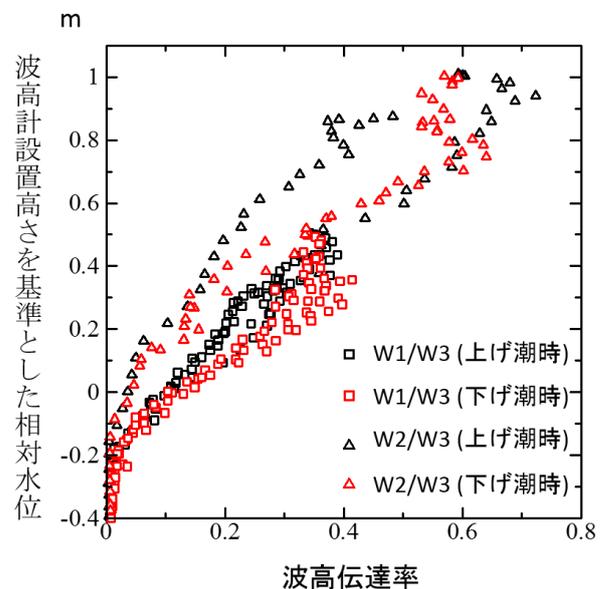


図-7 相対水位と波高伝達率の関係図

水位が0より大きくなっても, しばらくは波高計上部の礫層はまだ水没していない. その様な状態であっても0.1以上の波高伝達率が計測されており, 礫層内に相応の波エネルギーが伝播していることが分かる. 相対水位が0より小さくても, -20 cm程度までは有意な波高伝達率が認められるのは, 上述した層内での水位上昇による影響であると考えられる. 一方, 相対水位が50 cmを超えて埋設した波高計の上部の礫層も全て水没した後においても, 相対水位とともに波高伝達率が上昇している. これは海底面上に設置した波高計W1の位置から伝播する波が, 砕波することにより減衰するためであると考えられる.

また図-7では相対水位と波高伝達率の関係を上げ潮時と下げ潮時で異なる色で表示し区別しているが, 同じ



写真-1 定点観測カメラで撮影した画像

相対水位に対して、下げ潮時の波高伝達率は上げ潮時のそれよりも相対的に大きい。これについては、後述する定点観測カメラ画像による分析結果と合わせて考察する。

(3) 定点観測

定点観測カメラによって撮影された連続画像(写真-1)より、サンゴ礫が波によって潮位よりも高い位置に打ち上げられている様子が確認された。そこで、撮影した連続画像から互いに時間間隔3秒で前後する任意の二枚の画像を比較し、陸上部でかつ各画素の輝度値の差が大きい領域をサンゴ礫の打ち上げ領域として判定し、次に測線②に沿った礫浜平面を基準に座標変換を施し、打ち上げ領域の岸沖方向距離を求めることによって、時々刻々のサンゴ礫打ち上げ幅を定量的に抽出した。

画像から抽出した時々刻々のサンゴ礫打ち上げ幅と、波高計で計測された潮位、有義波高および有義波周期を比較したものを図-8に示した。図-8より、11月21日9~10時、22日10~11時と21日14~16時を比べると、平均水位、有義波高、有義波周期に大きな違いは見られないが、21日9~10時及び22日10~11時においてサンゴ礫打ち上げ幅が大きくなっていることがわかる。サンゴ礫打ち上げ幅が大きくなっている時間帯は、共に下げ潮の時間帯であるため、同じ波浪条件であっても下げ潮の方がサンゴ礫打ち上げ幅が大きくなることが確認された。これは、定量的なデータは得られていないものの、現地での観察や連続静止画像からも確認されたように上げ潮時の遡上帯の礫浜の勾配が下げ潮時の時よりも急勾配となっていたためであると考えられる。また、前述した図-7で比較した波高伝達率において、上げ潮の方が下げ潮時よりも波高伝達率が大きいのは、遡上帯の礫浜勾配が急であるため、時々刻々変化する汀線から埋設した波高計までの水平距離が上げ潮の方が小さく、結果として浸透した波浪成分の減衰率が小さくなるためであると推

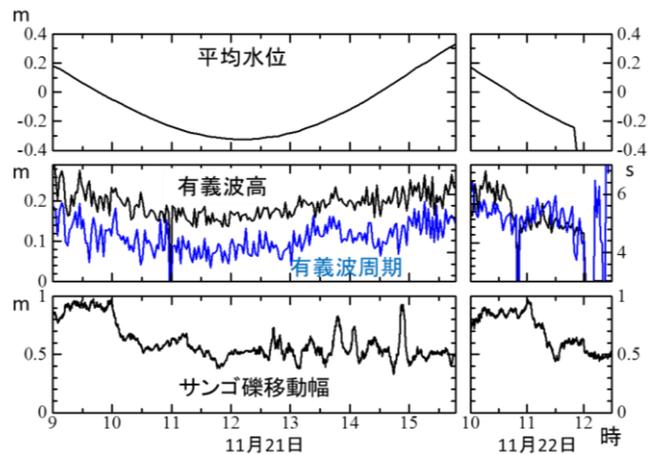


図-8 時々刻々の平均水位・有義波高・有義波周期とサンゴ礫

察され、サンゴ礫の打ち上げ幅の違いと符合する。

以上より、遡上帯の地形とサンゴ礫打ち上げ幅、さらにそれに伴う礫層内への波エネルギーの伝達率は相互に影響を及ぼしている事が推察される。

4. 数値計算に基づく透水特性の推定

以上の観測結果より、サンゴ礫層内に波動が浸透して伝わっていることが分かった。ここでは、ダルシー則に基づく地下水変動場の再現計算を実施し、実測値との比較を通じて透水特性に対する分析を加える。このモデルにおいて、透水係数を様々に変化させたときの計算結果と、サンゴ礫層内に設置した波高計の観測結果を比較し、観測結果を最も良く再現する透水係数を求めることとした。

(1) 数値モデルの概要

砂州砂礫層内における地下水面の変動、および、砕波帯、河道内における水面変動との応答は、鈴木ら²⁾と同様の透水層モデルに倣ってモデル化した。ただし、本研究では、来襲波の砕波減衰も考慮する必要があったため、計算領域を海底面を境に二層に分割し、それぞれの層に対して長波近似した運動方程式を適用した。砕波に伴う減衰項は海底面上の上層部で導入し、海底面下の礫層内(透水層内)では流速が非常に小さいことを想定して運動方程式中の非線形項は無視した。また、透水層内の抵抗則にはDarcy 則を用いた。本研究で用いた連続式および運動方程式を以下に示す。

$$\varepsilon \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P_1}{\partial x} + \frac{\partial P_2}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} + g(\eta - z_l) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P_1^2}{\eta - z_l} \right) = v_B \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} + gn(z_l - z_b) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{ng}{k} P_2 = 0 \quad (3)$$

ここで η は水位、 ε は水面における空隙率を考慮する係数で水面が礫層上なら $\varepsilon=1$ 、礫層内なら $\varepsilon=n$ 、 n は礫層内の空隙率、 P_1 および P_2 はそれぞれ上層部(海底面上)および下層部(礫層内)における線流量、 g は重力加速度、 z_l は礫層表面(海底面)の標高、 v_B は拡散型の碎波減衰項における拡散係数³⁾、 z_b は仮想の不透水面高さ、 k はDarcy 則に基づく透水係数である。水面が常に地表面下に位置する条件では、 $P_1=0$ となり式(1)および(3)に基づき礫層内の水位変動が計算される。ここでは礫表面層を通過して浸透する流れによる運動エネルギーによる影響は無視し、上層・下層における運動方程式は互いに独立して算定され、連続式を介して連成される。

(2) 計算条件

波高計を設置した断面の地形は測量結果に基づき図-3に示した地形を計算に使用した。地形測量地点の間は線形補完し、25 cm間隔で標高を求めた。境界での波の反射を極力抑えるために岸方向の計算領域を実際よりも長くとり、全体で岸沖方向に22.5 mの範囲を計算領域とした。堆積層内の空隙率 n は一様に0.4として与え、不透水面の高さ z_b はリーフの海底面と同じ高さ(標高-1.35 m)とした。透水係数については様々な値を与え、計算結果を比較した。

境界条件としてはW3波高計によって計測した波形を使用し、W3波高計が設置された場所を入射境界とした。

(3) 透水係数の検証

上記の条件に基づき地下水面の変動計算を実施した。

透水係数を徐々に変化させていき、実測値と計算値をパワースペクトル及び波高伝達率を用いて比較、検証した。図-5の時刻Cにおいて、透水係数を変化させた場合の計算値のパワースペクトル及び実測値を図-9に示した。またW1波高計とW3波高計における平均水位の差は、実測値が0.5 cmであるのに対して、 $k=0.01$ m/sでは2.01 cm、 $k=0.05$ m/sでは0.96 cm、 $k=0.1$ m/sでは0.63 cm、 $k=0.3$ m/sでは0.47 cmとなった。以上より、時刻Cでは実際の水位変動をよく表現するのは $k=0.1-0.3$ m/sであることが分かった。

また、数値計算で透水係数を変化させた場合の各水位における波高伝達率を、実測値と共に図-10に示した。

図-9、図-10より、実測値のパワースペクトル及び波高

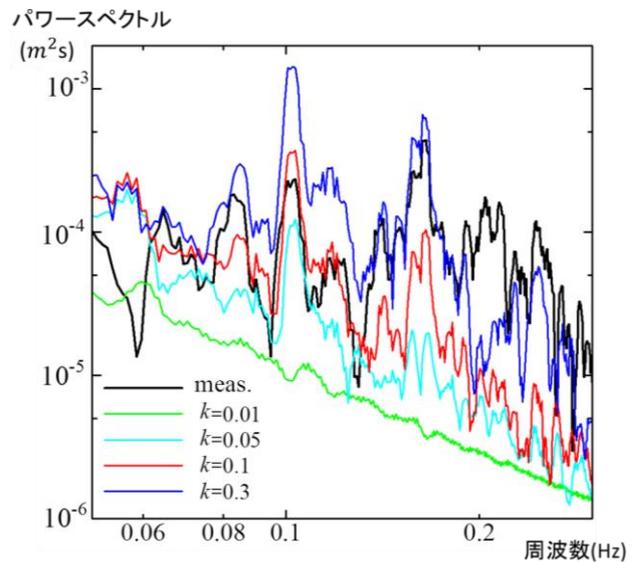


図-9 時刻CにW1で計測された水位変動のパワースペクトル比較

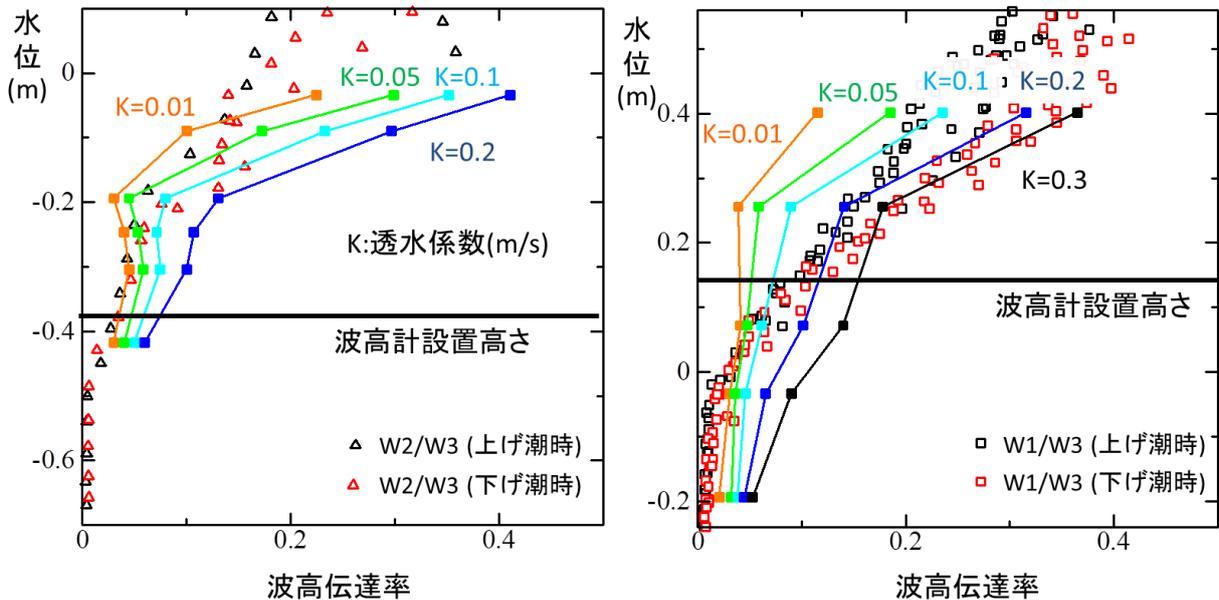


図-10 実測値及び計算値の水位に対する波高伝達率

伝達率を最もよく再現する透水係数はW1 波高計では0.01~0.2 m/s, W2 波高計では0.05~0.3 m/sとなった。これは鈴木ら²⁾が算出した天竜川河口砂州における透水係数0.001~0.02 m/sを大きく上回っており, サンゴ礫海浜のほうが砂礫海浜に比べ透水しやすいことが確認された。また, W2 波高計よりも標高の高い場所に設置したW1 波高計の方が実測値に合致する透水係数が大きくなっていることや, W1, W2ともに水位が高くなるほど透水係数が大きくなっていることが図-10 から見て取れる。これは, 現地観測で得た地形や, 3章で述べた, 標高が高い場所ほどサンゴ礫の粒径が大きくなっていることとも符合している。このことから, 遡上帯地形や粒度組成が透水特性に影響を及ぼしていることが認められた。

4. 結論

西表島北方沖合に浮かぶバラス島を対象に, 現地調査及び数値計算を行った。主要な結論を以下に示す。

- (1) 代表的な測線とその測線上のサンゴ礫の分布(図-4)より, 標高の高い島中央部に比較的粒径の大きいサンゴ礫が堆積している様子が確認された。これより, 潮位や波高が高い台風などの高波浪時に波によってサンゴ礫が標高約2~3 mの高さまで積み上げられていると推測される。
- (2) 定点観測カメラによる連続画像より, サンゴ礫が波によって潮位よりも高い位置に打ち上げられている様子が確認された。サンゴ礫の打ち上げ幅と, 潮位, 来襲波の有義波高および周期の比較(図-8)から, 同じ波浪条件であっても下げ潮時の方が打ち上げ幅が大きくなることが確認された。
- (3) 礫層内への波高伝達率と潮位との関係(図-7)から, 同じ潮位では下げ潮時の方が上げ潮時よりも波高伝達率が相対的に大きくなることが確認された。観測画像から,

潮位上昇時はサンゴが積み上げられることによって, 遡上帯が急勾配になることが確認されており地形の影響が波高伝達率や打ち上げ幅に影響を与えていることが推察される。

(4) 図-9, 10より実測値のパワースペクトル及び波高伝達率を最もよく再現する透水係数はW1波高計では0.01~0.2 m/s, W2波高計では0.05~0.3 m/sとなり, 透水係数が0.001~0.02 m/s程度と推定された天竜川河口砂州における既往の研究事例を大きく上回った。また推定した透水係数が標高の高いW1でW2よりも大きくなったことは, 現地観測で得た地形やサンゴ礫粒径の違いによる影響とも符合しており, 遡上帯地形や粒度組成の透水特性への寄与が認められた。

謝辞: 本研究は, 国土交通省河川砂防技術研究開発で採択され, 国土技術政策総合研究所から委託された「サンゴ礁海岸保全モデルの開発」により得られた委託研究成果の一部である。また東京大学海洋アライアンスイニシヤティブ(日本財団)の支援を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 鈴木拓也, 茅根創, 岩塚雄大, 片山裕之, 関本恒浩, 磯部雅彦:サンゴ礁州島の地形変化メカニズムに関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 第 69 巻, pp. 838-843, 2013.
- 2) 鈴木一省, 田島芳満, 高川智博:天竜川河口砂州の透水特性と堆積構造, 海洋開発論文集, 第 26 巻, 1239-1244, 2010.
- 3) 田島芳満, 佐藤慎司, 鈴木淳也, 下園武範, 磯部雅彦: 潜堤周辺の碎波・乱流特性を考慮した海浜流場予測モデルに関する一考察, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.106-110, 2006.

(2015.3.18 受付)

SEEPAGE CHARACTERISTICS AND ACCUMULATION PROCESSES AROUND THE SWASH ZONE OF CORAL BEACH

Hiroki FUJIKAWA, Yoshimitsu TAJIMA, Ryo TAKEMORI, Yudai IWATSUKA,
Takeshi KOTOURA and Hajime KAYANNE

The coral beach shows unique characteristics of beach deformation because the beach is formed by coral gravels whose density and grain sizes are lighter and larger than silica sand grains on a general sandy beach. This study aims to investigate the characteristics of seepage and resulting accumulation process of coral grains on the coral beach through field observations and simple numerical analysis. This study first conducted a field survey at the ballast island which is located at the northside of Iriomoteshima island. Field survey revealed that coral gravels with relatively larger grain sizes were dominantly deposited on top of the ballast island while relatively smaller gravels were dominant around the swash zone at the daily water level. It was also found that certain amount of wave energy was transmitted to the seepage layer of coral bed and combination of measured water level change inside the seepage layer and numerical model revealed that swash zone of the coral beach has much higher permeability than that of general sandy beaches.