前傾化した波の作用下における サンゴ礫移動特性の実験的研究

瀬戸 祥太¹・田島 芳満²

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 文京区本郷七丁目3-1)

E-mail: seto2@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 文京区本郷七丁目3-1)

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

サンゴ州島の形成メカニズムの解明は、サンゴ礁の発達した島々の保全・防護に重要である。本研究では、沿岸域において前傾化した波の作用下におけるサンゴ礫の移動特性を把握することを目的とし、サンゴ礫を使用した断面2次元水槽での水理実験を実施した。実験で得られたデータの分析により、礫の移動には底面付近における流速や加速度の非対称な波形が大きな影響を及ぼしていること、礫が動き出した直後は底面からの抵抗の影響を受けるものの、その後は流況の影響が支配的になること、遡上帯では浸透の影響で礫の岸方向の移動がより卓越すること、砕波前後で礫の挙動は全く異なること、また礫の移動量の特性は水面変動の時間変化の歪度と相関があることなどが確認された。

Key Words : coral gravels, transport, swash zone, surf zone, breaking, forward-leaning wave

1. はじめに

サンゴ州島は折れたサンゴがサンゴ礫となり、波・流れによって運搬され、堆積することで形成される標高数メートルの島である。これらのサンゴ州島には地球温暖化に伴う海面上昇により水没の危機に瀕しているものもあり、これらの維持・保全は喫緊の課題のひとつであると言える。このような課題を解決するためには、サンゴの生成によるサンゴ礫の供給促進に加え、供給されたサンゴ礫を有効に活用して州島の形成、安定化を図る技術の構築が有効であり、それにはサンゴ礫の移動メカニズムや州島形成過程の把握が必要不可欠となる。

サンゴ州島の例として、日本では西表島の沖合の孤立リーフ上に存在するバラス島などが挙げられる。バラス島は波や流れの影響により常に島の形を変えながら50年以上に渡って州島として孤立リーフ上に存在している。著者らはこのバラス島の形成過程について、現地観測¹⁾や室内実験²⁾、また数値解析³⁾に基づき研究を行ってきた。その結果、(1)サンゴ州島形成においては、海流よりも波の影響が支配的であること、(2)波によるサンゴ礫の移動には、流速および加速度の非対称な波形が大きく影響を及ぼしていること、(3)波打ち際の堆積には州島の高い透水特性が影響していること、(4)州島の形成には、波の作用に加え潮位変動による影響が強いこ

となどが明らかになっている。

そこで本研究では、サンゴ礫の移動が活発な砕波帯付近から遡上帯に着目し、特に前傾化した波の下において生じるサンゴ礫の岸沖方向の移動特性を、実際のサンゴ礫を用いた断面2次元水槽での水理実験に基づいて把握することを目的とする。

2. 実験概要

粒径約1cmのサンゴ礫 (図-1(b))を用いて、図-1(a)のようなサンゴ礫による一様勾配斜面を形成し、静水状態からピストン式の造波装置によって規則波を5波造波した。ここで通常の砂粒子に比べて粒径が大きく見かけの比重が小さいサンゴ礫の挙動は、斜面上を伝播する前傾化した非対称波形による影響を大きく受けることが指摘されていることから⁴⁾、本研究では波の非線形性による非対称な造波信号を流れ関数法⁵⁾を用いて作成して入射させた。また実験では水を青く着色し、3台のビデオカメラを用いて水槽側面からフレームレート60fpsで動画撮影を行った。またその際、PIVを用いて時々刻々の流速分布を計測するために、水中に比重1のトレーサー粒子 (Diaion HP-20)を投入した。本研究では沖波波高を10cm、周期は3.0sに固定し、勾配を1/5と1/10の2パターンに変化させて行った。

図-1 (a) 実験水槽断面図, (b) 実験に用いたサンゴ礫および(c)座標変換後の画像の例

3. 画像解析に基づく礫移動特性の分析

実験で得られた撮影画像を解析し、波と礫の挙動に関する様々な情報を可能な限り定量的に抽出し、波の作用下における礫移動の特性の分析を行った。図-1(c)に水槽側面のガラス面上の平面座標を基準にゆがみ補正と座標変換を施した画像の例を示し、以下に画像解析方法を整理する。

(1) 礫移動特性と水位および流速の抽出

まず、座標変換を施した時々刻々の静止画像群に対してそのRGB値から $Z=B-R-G$ の平面分布を求め、この Z 値のエッジ検出を行うことで各画像の水位を抽出した。次に連続する静止画像から抽出した水位データを結合し、任意の岸沖方向地点における水位変動の時間波形を得た。

次に、次式で与えられた画素値によるモノクロ画像を作成し、導入したトレーサ粒子を明瞭化した(図-2 左下)。

$$Z_2 = B / (R + G + B) \quad (1)$$

次に得られたモノクロ画像群にPIVを適用し、断面二次元方向の流速成分の時空間分布を抽出した。PIVに用いた検査領域の大きさは図-2 左下に例示した縦20画素、横20画素の矩形領域とし、上20画素、下20画素、右50画素、左30画素を探索領域とした。流速成分は水平・鉛直に5cm間隔の正方格子点上でそれぞれ求めた。また、得られた流速に対して、各点における流速成分の時間波形にFFTによるローパスフィルタ(50Hz以上の高周波成分を除去)を適用してスムージングを行い、得られた流速成分の時間波形を時間微分して加速度成分を算定した。

さらに、連続する画像間において底面付近で急激に輝度値が変化する画素群を移動している礫粒子上の画素であると仮定し、その画素を白、それ以外の画素を黒とした二値画像を作成した(図-2 右下)。これらの二値画像群

図-2 座標変換後の原画像(左上)とその画素値を変換したモノクロ画像(左下)、原画像(右上)と移動礫を抽出した二値画像(右下)

に対してPIVを適用し、礫の移動速度成分の時空間分布を抽出した。PIVに用いた検査領域は図-2 右下に示した縦40画素、横40画素の矩形領域とし、探索領域と格子については流速推定時のPIVと同じ範囲とした。

この様にして画像から抽出した定量データの例として、図-3 に水位変動、流速、加速度の時間波形および、その下で移動している礫の移動速度の棒グラフを示す。図に示したデータは、1/10勾配斜面に作用させた規則波の第3波に対して、水深17cmの地点で抽出した結果である。速度成分は岸向きを正とし、流速・加速度に関しては底面から十分離れた地点における流速の鉛直平均を用い、礫速度については、層状に移動している礫上の画素群の移動速度から、層の中央部における移動速度を抽出して図示した。図に見られるように、波形は前傾化しており、 $t=8s$ 付近で加速度が非常に大きくなっている。このとき礫は流速が負の状態にも関わらず岸方向に動き出しており、これは水面と底面における波の位相差の影響に加え、加速度による慣性力が礫移動に大きく作用したことが影

響していると考えられる。

(2) 砕波帯における分析

同様に1/10勾配の実験条件において波の下における礫の空間的な移動特性を把握するため、砕波帯近傍(水深22cm~12cm)において画像から抽出した水位変動、流速および加速度の時空間分布をカラーマップで作成し、その上に移動している代表的な礫の時々刻々の位置をプロットした(図-4左)。図の横軸は岸沖方向距離であり縦軸は下向きを正とする時間経過を表す。連続して並んだ白丸のプロットは同一の礫の軌跡であり、右斜め下方向への軌跡は、礫が時間と共に岸向きに移動し、鉛直下向

図-3 画像抽出した水位変動、水平流速成分、礫移動速度および水平流速成分加速度の時間波形

きからの角度が大きいほど移動速度が大きいことを意味している。

また勾配1/5の礫床に同じ波を入射させた実験条件において同様の図を作成し、図-4 右に並べて示した。ここで、両者の比較のため、図-4 右の横軸の出力範囲は図-4 左と同様に水深22cmからとした。ただし、同じ水平1mの区間における結果を出力したため、横軸右端の水深は1/10の勾配の条件よりも10cm浅い2cmとなっている。図に見られる様に水深12cm近傍や2cm近傍では砕波に伴う乱れ等により、抽出した流速や加速度成分にもノイズが見られる。図の横軸の長さ(1m)は二つの勾配の条件で等しくしているため、礫の軌跡から読み取れる水平方向への礫の移動速度や移動距離は、両勾配における結果をそのまま比較できる。

また、これらの図に示した代表的な移動礫の位置は目視で確認しながら抽出したが、サンゴ礫は、図-5に示した様に大きさや形にばらつきがあり、すべての礫が異なった動きをする様子が観察できた。例えば、図-5(a)のような整った円柱状の礫は動き出しやすく、図-5(b)のような非対称な形をしたものは動き出しにくいことが確認さ

図-5 代表的なサンゴ礫の例と特殊な移動例

図-4 (a):画像抽出した水位変動, (b):水平流速成分, (c):加速度の時空間分布および代表的な移動礫の軌跡
(左: 1/10 勾配の実験, 右: 1/5 勾配の実験)

れた。これは円柱型の礫は斜面を転がる際の抵抗が少ないことに起因すると考えられる。図-5(c)は勾配1/10に作用させた第3波の引き波時における水深16cm地点における底面付近のスナップショットである。静止した礫群の中で唯一、図-5(a)のような円柱型の礫のみが沖方向へ動き出す様子が捉えられている。このように、サンゴ礫は形の対称性により異なる動きをするが、非対称な形のものが多いとあるため、今回は代表的な礫として、図-5(b)のような非対称な形の礫の軌跡を図に示した。

まず、図-4 左に示した1/10勾配における礫移動と水位変動、流速、加速度との関係について考察する。図に示した水位変動と水平流速はほぼ同様に变化しており、造波開始から最初の5波のみを対象としているため、進行波として考察してよいことが分かる。また、図-4左(b)の第2波、第3波の来襲時には、水平流速が沖向き(負)から岸向き(正)に転じる時点で、礫が動き始めていることが読み取れ、図-3で見られた現象と符合する。さらに、第1波に比べて、第2、第3波では、ピーク時の岸向き流速にはそれほど大きな違いはないものの、礫の移動開始時間や移動量が明らかに大きい。加速度に着目すると第2、第3波では第1波の2倍程度の加速度が測定されており、ここで見られた礫移動には先行波の運動に伴い増大した加速度の影響が大きく寄与していることが示唆された。また第2波作用時における3つの礫の軌跡に着目すると、図の中央部の礫のみが大きく岸向きに移動し、岸側にあった礫を追い越していることが分かる。礫の移動を開始直後と、活発に移動している状態とでは、底面摩擦等による抵抗則にも違いが生じていることも示唆される。

次に、1/10勾配と1/5勾配を比較する。上述した1/10勾配斜面上で見られた礫移動特性の多くは、1/5勾配斜面上でも見られた。ここでは両者の違いに焦点を当てて考察を加える。まず1/10勾配斜面上では沖向きに移動する礫がほとんど見られなかったのに対し、1/5勾配斜面上では、斜め左下に軌跡をとる沖向移動の後に、右斜め下方向に軌跡を変える移動が顕著に見られた。急勾配斜面による沖向移動の促進効果による影響がひとつの要因として考えられる。その一方で、岸向き方向の礫移動の軌跡に着目すると、1/5勾配斜面上の礫の方が、速く長く岸向きに移動しているものが多く、これは急斜面が礫に及ぼす沖向移動の促進効果とは反する傾向である。

この要因として、図より判別することは困難であるが、1/5勾配斜面の方が、岸向きの水深の低減に対して波速が低減しにくいと、波峰の下で動き始めた礫が1/10勾配よりも追従しやすいこと、沖向きから岸向きへと移動を続ける礫であるため、完全に停止してから動き始める礫に比べると底面摩擦抵抗を受けにくい傾向があること、急勾配斜面による波の前傾化の促進に伴う岸向き移動外力の増大など、様々な要因が考えられる。これらの要因

については、岸沖方向の礫の移動量の比較と合わせてさらに考察を加える。

(3) 遡上帯における分析

次に、勾配1/5については遡上帯でも同様の分析を行った(図-6)。ただし、遡上帯ではPIVによる流速の推定が困難だったため、水位変動と移動礫の軌跡を比較している。図のカラーマップで青の単色で塗りつぶされた領域は、水面が礫層内に浸透していた領域を表わしており、この領域の岸側境界が、遡上端の位置の時間変化を表わしている。また特徴的な移動が観察できた第3波下における礫に着目し、図-6(b)には第3波の時間帯を拡大し、それぞれの礫に番号を付して表示した。まず全体として、図-4右の砕波帯内における移動特性に比べると、極端に沖向き移動量が低減していることが分かる。特に遡上端付近で波の遡上と共に岸向きに移動した礫1~4は、岸向きに大きく移動し、その後遡上帯内にとどまった。これは、礫層内への波の浸透に伴い引き波による沖向きの戻り流れ流速が大きく低減したことが原因のひとつであると考えられる。またこれらの礫の中で遡上開始時に最も沖側に位置していた礫1は、他の礫を追い越してもっとも岸側まで移動している。図に示した時間 t_1 におけるスナップ写真を図-6(c)に示す。図に見られる様に、礫1は礫2や3の上を飛び越えるように移動しており、図-4の比較で考察した様に、動いている礫は動きはじめての礫に比べて底面摩擦抵抗の影響を受けにくい状態になる場合も多々あることが示唆される。

一方、引き波時には礫の移動速度は小さく、岸向移動に見られたような礫の追い越し現象はあまり見られなかった。図-5(b)に見られる礫6と7の追い越しに着目し、図に示した時間 t_2 におけるスナップショットを図-5(d)に示した。図に見られる様に、礫6と7では長径方向の傾きが異なり、結果として礫底面との接地面積に違いがある。このような違いがある場合には、比較的ゆっくりと掃流移動している礫においても、礫の状態によって移動速度に違いが生じる場合が見られた。

(4) 礫の移動量の分析

以上より、礫の移動形態は1/5勾配と1/10勾配で異なり、より急勾配な1/5勾配斜面上では、沖向きの移動が促進される一方で、岸向きの移動速度や移動距離においても1/10勾配斜面上の礫よりも大きくなる傾向が見られた。

ここでは、個々の礫の移動形態ではなく、それぞれの地点における岸向き、沖向きの礫の移動量を抽出し、水位変動特性との関係を考察する。

まず、本節の3.(1)において移動している礫のみを抽出した画像群に対して、岸沖方向の代表的な地点を選定し、その地点を岸向き、沖向きに通過した礫の個数をカウン

図-6 遡上帯における画像抽出した水位変動の時空間分布および代表的な移動礫の軌跡(a & b: 1/5 勾配斜面), (c)および(d): (b)に示した時間 t_1 および t_2 におけるスナップショット。

トした。礫の移動量をカウントする地点は、沖側は礫の移動限界水深付近を選び、そこから岸に向かって20cm間隔の地点を選定した。1/10勾配の条件の方が、多くの地点で礫の移動量をカウントしている。

図-7にカウントした礫の移動量の岸沖方向分布に加え、画像抽出した水面波形の時空間分布から推定した波高 H や、 H 、水深 h および重力加速度 g を用いて次式で算定した相当振動流速高 U をあわせて図示した。

$$U = H \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (2)$$

さらに、波の前傾化に伴う礫移動特性への影響を考察するため、次式で示した skewness を算定し、その岸沖方向分布も合わせて図示した。

$$S_{k,\xi} = \frac{\langle (\xi - \xi_{avg})^3 \rangle}{\langle (\xi - \xi_{avg})^2 \rangle^{3/2}} \quad (3)$$

ここで ξ は時々刻々の水位変動 η あるいはその時間微分 η_t とし、 ξ_{avg} はそれぞれの時間波形の平均値である。ここで算定した水位変動および水位の時間微分値の skewness は碎波点近傍において大きく値が変化するため、図には碎波点を破線で、波峰の水塊が打ち込んだ地点を実線で表示した。図の赤線および赤い棒グラフは斜面勾配 1/5 の実験条件に対する結果を、青線および青い棒グラフは 1/10 の実験条件に対する結果を表わしている。また、一波あたりの礫の移動量は、岸向きと沖向きに分類し、それぞれ正および負の値でグラフに示している。また横軸は、1/5 勾配と 1/10 勾配による結果を比較できるよ

図-7 水理量および礫移動量の岸沖方向分布(a: 波高 H , b: 相当振動流速高 U , c & d: 一波あたりの礫移動個数, e: 水位変動 η の skewness, f: 水位の時間微分 η_t の skewness) 赤は 1/5 勾配, 青は 1/10 勾配の条件における計測値。

うに、水平方向距離ではなく水深とした。例えば砕波点と水塊の打ち込む位置を示した実線と破線の間隔は、1/10勾配の青線の方が1/5勾配の赤線よりも短い、これは水深の違いによるものであり、水平方向の距離は両者では大きく変わらない。また、礫の移動個数についても1/10勾配の方がデータが多いのは、同じ水平方向間隔(20cm)で礫の個数を数えたためである。

図に見られる様に、全域において1/5勾配上の礫の移動量は1/10勾配上のそれよりも、岸向および沖向きの両方向で大きい。その一方で、両実験ケースで入射波の緒元は同じであることから、画像から抽出した波高 H やその相当振動流速波形の波高 U については、それほど大きな違いは見られなかったものの、1/10勾配斜面上における値の方がやや大きく、観察した礫の移動量の大小関係は説明できない。また、進行波の下では軌道流速のskewnessと整合する水位変動 η のskewnessに着目すると、こちらも砕波帯外では勾配による違いは比較的小さく、砕波帯内では1/10勾配斜面上の方が大きくなり、礫の移動量の大小関係とは反する結果となった。その一方で、加速度非対称に相当すると考えられる η_t のskewnessに着目すると、特に礫の移動量の大小関係に有意な違いがみられる水深14cm以浅において顕著に1/5勾配における値の方が大きくなっており、岸向きの礫移動量の大小関係と符合する傾向を示した。ただし、1/5勾配では沖向きの移動量も1/10勾配の条件よりも増大しており、考察してきた移動中および移動開始直後の礫による底面摩擦抵抗の違いなど、その他の要因も勘案した更なる分析、モデル化が重要になると考えられる。

4. 結論

前傾化した非対称波形下におけるサンゴ礫の移動特性を把握するため、室内実験とその画像解析を通じてその詳細な移動特性の分析を試みた。同じ諸元の波を入射させた条件においても、海底勾配の違いにより礫の移動特性は大きく異なり、特に前傾波形の違いによる影響を受けたと推察される挙動が観察された。また、水理特性だ

けでなく、礫の形状や、接地面積、移動形態の違いによる影響も見られた。今後の課題として、これらの特性を考慮した礫の移動量算定モデルの構築および、そのモデルの境界条件等として必要となることが想定される、流速や加速度の非対称性、戻り流れによる影響などを適切に算定可能な波動モデルの構築が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Kayanne, H., Aoki, K., Suzuki, T., et al., : Eco-geomorphic processes that maintain a small coral reef island: Ballast Island in the Ryukyu Islands, Japan, *Geomorphology*, 271, pp.84-93, 2016.
- 2) 岩塚雄大, 琴浦毅, 片山裕之, 竹森涼, 田島芳満, 茅根創: バラス島の形成・維持メカニズムに関する現地調査, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 71(2), I_455-I_460, doi:10.2208/jscejoe.71.I_455, 2015.
- 3) 藤川大樹, 田島芳満, 竹森涼, 岩塚雄大, 琴浦毅, 茅根創: サンゴ礫海浜の遡上帯における透水特性と堆積特性, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.71, No.2, pp.I_55-I_60, doi:10.2208/kaigan.71.I_55, 2015.
- 4) 藤川大樹, 田島芳満: 潮汐を考慮したサンゴ州島形成課程の再現実験, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.72, No.2, pp.I_553-I_558, doi:10.2208/kaigan.72.I_553, 2016.
- 5) 前田勇司, 琴浦毅, 佐貫宏, 田島芳満, 茅根創: サンゴ礁州島形成のための対策工に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.72, No.2, pp.I_823-I_828, doi: 10.2208/ kaigan. 72.I_823, 2016.
- 6) 竹森涼, 田島芳満, 藤川大樹, 茅根創: 孤立リーフ上におけるサンゴ砂礫集積メカニズムの分析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.71, No.2, pp.I_721-I_726, doi:10.2208/kaigan.71.I_721, 2015.
- 7) 田島芳満, 藤川大樹: 礫斜面上を伝播・遡上する波による掃流移動モデルの構築, 土木学会論文集 B2(海岸工学), vol.72, No.2, pp.I_571-I_576, doi: 10.2208/kaigan.72.I_571, 2016.
- 8) Dean, R.G., : Stream function representation of non-linear ocean waves, *Journal of Geophysical Research*, vol.70(18), pp.4561-4572, 1965.

(2017.3.15 受付)

LABORATORY STUDY ON BEHAVIOR OF CORAL GRAVELS UNDER FORWARD LEANING WAVES

Shota SETO and Yoshimitsu TAJIMA

This study focuses on behavior of coral gravels under forward leaning waves around the surf and swash zones. We first carried out laboratory experiments in which waves and moving gravels were captured through the analysis of video images recorded from the side of the flume. It was found through comparisons of these time-varying quantities of water surface fluctuations and velocities of moving gravels and surrounding currents that the acceleration of near-bottom fluid and associated bed slopes appear to have significant influence on movement of coral gravels.