

裾礁型サンゴ礁海浜における汀線碎波波高の 規定要因に関する予察的実験

森山 裕太*・青木 久**

キーワード：裾礁型サンゴ礁，汀線碎波，室内実験，野外観測，規定要因

I はじめに

熱帯・亜熱帯の低緯度地域の海岸にはサンゴ礁が発達している。世界のサンゴ礁は、陸地に対する位置や平面形により、陸地をふちどるように発達する裾礁、陸地との間に水深の深い礁湖（ラグーン）をもつ堡礁、陸地がなく環状に発達する環礁の3タイプに大別される。

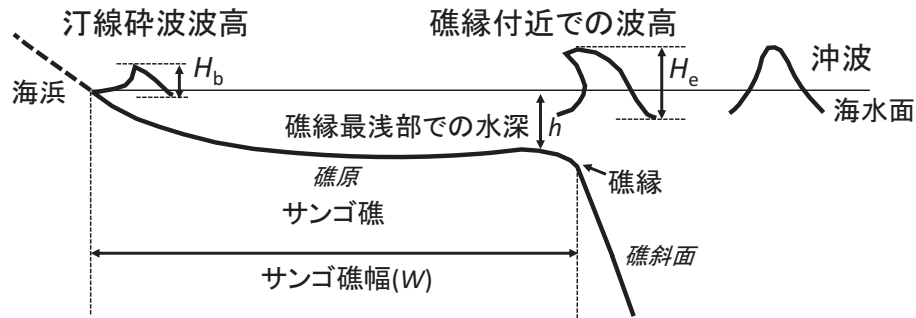
日本のサンゴ礁は、世界のサンゴ礁分布の北限域にあたり、そのほとんどが裾礁である。裾礁という地形は、汀線（波打ち際）から沖に向かって広がる、礁原とよばれる浅い平坦面と、その海側にある礁斜面とよばれる急斜面に区分される（第1図）。このように裾礁型サンゴ礁（以下、単にサンゴ礁とする）は、連続性の良いサンゴ礁の浅瀬が陸地を取り囲むように発達することから、沖からの波に対して陸地をまもる潜堤（堤防）としての役割をもつことが指摘されてきた（例えば、沖縄第四紀調査団・沖縄地学会，1975；津嘉山ほか，1989，1995；サンゴ礁地域研究グループ，1990；Gourlay, 1994；津嘉山，2001）。

しかしながら、サンゴ礁上の波浪特性に関する研究については、サンゴ礁内外の波の変形やサンゴ礁内の波高減衰現象に主眼をおいたもの（例えば、河野ほか，1978；寺尾ほか，1981；江

頭ほか，1985；谷本ほか，1989；津嘉山ほか，1989，1995；Gourlay, 1994；仲座ほか，1994；大中ほか，2000；津嘉山，2001；Kench and Brander, 2006; Kench *et al.*, 2009; Mandlier and Kench, 2012; Mandlier, 2013）が数多く、汀線に到達する波の特性に注目した研究はほとんどなかった。

海浜の地形を変化させる最も重要な外力は波浪である。前面にサンゴ礁が発達する海浜において、外洋から入射してくる波は、この礁地形の影響を受けて汀線に到達する。すなわち、沖から侵入してくる波は、急に水深が浅くなるサンゴ礁の外縁で強制的に碎波させられて、サンゴ礁上を海浜に向かって段波となって進行し、汀線付近で最終的に碎波して海浜に遡上する。波はサンゴ礁上を進行する途中で摩擦や乱れ等によって多くのエネルギーを失い、波高が小さくなる。このような天然の潜堤の役目を果たすサンゴ礁の大きさや水深の大小は、汀線付近での最終碎波（汀線碎波）の波高を規定し、サンゴ礁海浜の地形変化に大きな影響を与えると考えられる（第1図）。しかしながら、サンゴ礁海浜の地形特性に関する従来の研究は、海浜堆積物の特性や前浜勾配などに視点が置かれた研究が多く（例えば、秋山，1979；山内ほか，1989；平山・廣瀬，2003，青木・前門，2006），サンゴ

* 埼玉県立川越高校（学部66期） ** 東京学芸大学教育学部



第1図 サンゴ礁海浜の模式図

礁海浜の地形プロセスを汀線碎波との関連で議論された研究はほとんど行われていない。

例えば、沖縄島に発達するサンゴ礁の水平幅（汀線から礁縁までの水平距離、以下「サンゴ礁幅」と呼ぶ）は海岸によって異なり、数メートルから約4 kmに及ぶ（目崎ほか, 1977）。このようなサンゴ礁の大きさの違いは、各海岸に作用する汀線碎波波高の違いをもたらす、その結果として、サンゴ礁海浜の地形形成の違いに反映されると考えられる。したがって、サンゴ礁海浜における汀線碎波特性と、その規定要因に関する定量的研究は、海岸地形学的にきわめて重要な研究課題である。

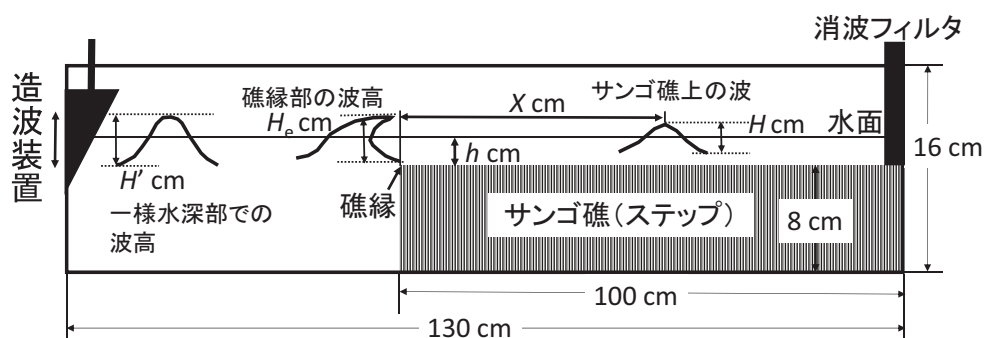
筆者の一人である青木は、これまでにサンゴ礁海浜の地形特性や地形変化プロセスの解明を目指し、その第一歩として汀線碎波特性とサンゴ礁地形との定量的関係を明らかにするための野外調査（青木・智原, 2009；武石ほか, 2014；青木, 2015；青木ほか, 2015）を沖縄島で実施してきた。これらの研究により、汀線碎波波高（ H_b ）には、サンゴ礁幅（ W ）、サンゴ礁の水深（ h ）、礁縁付近での波の波高（ H_e ）の3要因が深く関与することが実証された。しかしながら、沖縄島の観測データからつくられた経験式が汎用性をもつのかどうか、そして、波の周期（ T ）が規定要因になるのかどうかについての検討はできていない。

そこで本研究では、教育実験用の小型造波水路を用い、裾礁型サンゴ礁海浜における汀線碎波波高に関する規定要因を明らかにし、モデル化が可能かどうかについて予察的検討を加えることを目的とする。まず造波水路内にサンゴ礁を模した海岸を設定し、沖波の波高・波の周期・サンゴ礁の水深の異なる初期条件の下で、サンゴ礁上を進行する波の波高を観測することにより、波高減衰の規定要因を明らかにする。次に野外調査により波浪データを収集し、実験結果との関係性から、汀線碎波波高を規定する要因について考察する。

Ⅱ 室内実験

1. 実験装置・条件・方法

実験装置の模式図を第2図に示す。実験にはプランジャー型造波機が設置された幅4 cm、長さ130 cm、高さ16 cmの小型造波水路（3B Scientific社製）を用いた。水路の他端に、幅4 cm、長さ100 cm、高さ8 cmのアルミ製の角パイプ・チャンネルを用いて、サンゴ礁を模した平坦面をもつステップ状の地形を設置した。初期条件は、水深（ h ）を0, 0.5 cm, 1.0 cm, 1.5 cm, 2.0 cmの5種類、波の周期（ T ）を0.7 sec, 0.85 sec, 1.0 sec, 1.2 sec, 1.5 secの5種類とし、一様水深部の波高（ H' ）を1.0～2.3 cmの間で



第2図 実験装置の模式図

適宜変化させて、合計37ケースの実験を行った（第1表）。各ケースにおいて、サンゴ礁（ステップ）上を進行する波やその波高について、水路の側壁に対して直角方向から観察・測定を行った。波高は、礁縁部を基準（0）とし、礁縁部から波の進行方向に距離（ X ）離れた地点での波高（ H ）を5～10 cm間隔で折尺を用いて計測した。

2. 実験結果

実験のほとんどのケースで、サンゴ礁上を進行する波は波高が徐々に小さくなる様子が観察された。第3図は、縦軸に H (cm)、横軸に X

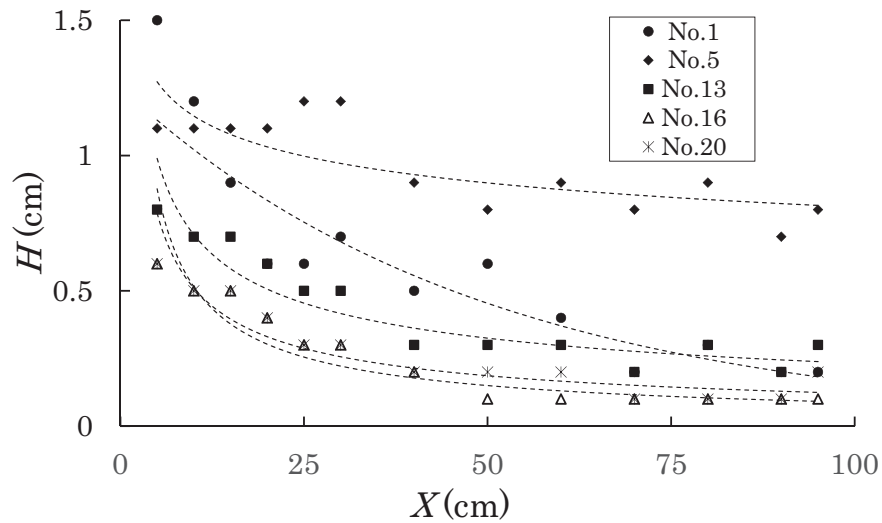
(cm) をとり、 h と T が異なる実験ケース（Case 1, 5, 13, 16, 20）のデータをプロットした結果である。ケース間で波高の減衰量や波高減衰率（傾向線の傾き）は異なるものの、 X が大きくなるほど、 H が小さくなるという共通した傾向がみられ、この事実は観察結果と整合する。とくに、波高（ H ）は $0 \leq X \leq 25$ cmの範囲において、急激に小さくなるケースが数多くみられた（例えばCase 1, 13, 16, 20）。

次に X , h , T , H_e といった各変数が、サンゴ礁上の波の波高変化（ H/H_e ）にどのような影響を与えているのかについて実験結果を述べる。 H/H_e は、0から1までの値（ $0 \leq H/H_e \leq 1$ ）を

第1表 実験条件

Case No.	波の周期 T (sec)	水深 h (cm)	一様水深部での 波高 H' (cm)
1	0.7	2.0	2.0
2	0.85	2.0	1.8
3	1.0	2.0	1.7
4	1.2	2.0	1.7
5	1.5	2.0	1.7
6	0.7	1.5	2.0
7	0.85	1.5	2.3
8	1.0	1.5	1.7
9	1.2	1.5	1.5
10	1.5	1.5	1.1
11	0.7	1.0	2.0
12	0.85	1.0	1.6
13	1.0	1.0	1.8
14	1.2	1.0	1.4
15	1.5	1.0	1.1
16	0.7	0.5	2.0
17	0.85	0.5	1.6
18	1.0	0.5	1.4
19	1.2	0.5	1.3
20	1.5	0.5	1.0

Case No.	波の周期 T (sec)	水深 h (cm)	一様水深部での 波高 H' (cm)
21	0.7	0	2.0
22	0.85	0	1.6
23	1.0	0	1.5
24	1.2	0	1.2
25	1.5	0	1.0
26	0.7	1.0	1.3
27	0.7	1.0	1.1
28	1.0	1.0	1.3
29	1.0	1.0	0.9
30	1.2	1.0	1.2
31	1.2	1.0	0.9
32	0.7	0.5	1.2
33	0.7	0.5	1.0
34	1.0	0.5	1.2
35	1.0	0.5	0.9
36	1.2	0.5	1.1
37	1.2	0.5	0.8

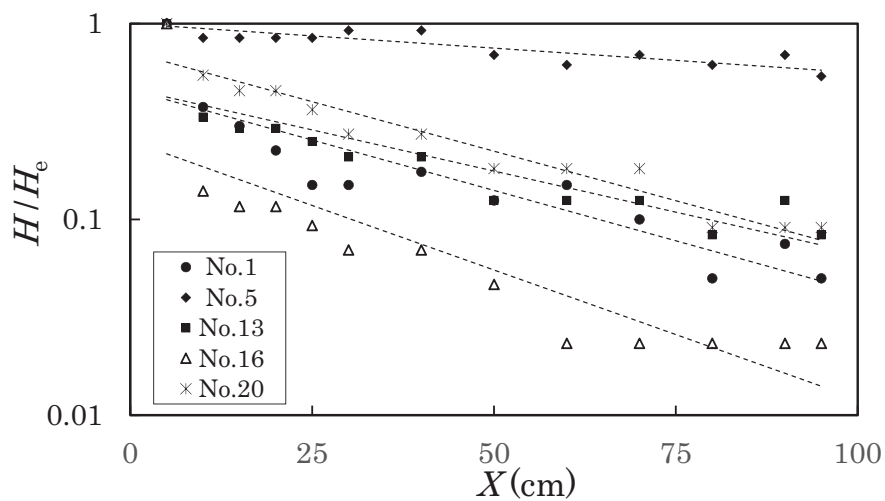


第3図 サンゴ礁上を進行する波の波高変化

とり，波が礁縁部からサンゴ礁上を進行し，距離 X 進んだときの波高伝達率を示す．値が小さいほど，大きな波高減衰が起こったことを示すパラメータになる．

波高減衰に与える礁縁部からの距離の影響について，Case 1, 5, 13, 16, 20のデータについて，横軸に礁縁部からの距離 X (cm)，縦軸に波高伝達率 (H/H_e) をとり，プロットした結

果が第4図である．いずれのケースでも， H/H_e は1以下の値をとり， X が大きくなるにつれて， H/H_e が小さくなるという右下がりの傾向を示すことがわかる．これ以外のほとんどの実験ケースでも，波が進行するにつれて H/H_e が小さくなるという同様の結果が得られた．以上のことから，サンゴ礁上では礁縁部からの距離が大きくなるほど，波の高さが小さくなるという波高減



第4図 サンゴ礁幅 X (cm)と H/H_e との関係

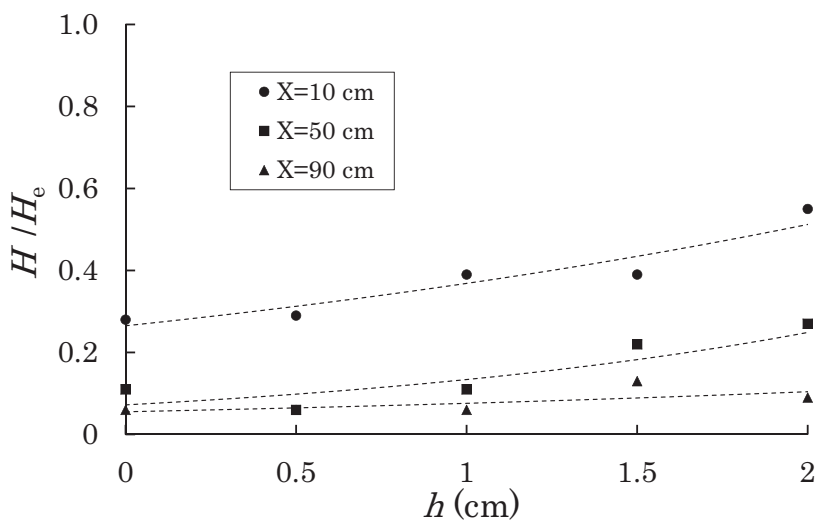
衰現象が起こっていることがわかる。

波高減衰に与える水深の影響について、波の周期 $T=0.7$ sec, 波高 $H'=2.0$ cmと一定で、 $h=0, 0.5$ cm, 1.0 cm, 1.5 cm, 2.0 cmと異なる5ケース (Case 1, 6, 11, 16, 21) について、横軸に水深 h (cm), 縦軸に波高伝達率 (H/H_e) をとり、礁縁部からの距離が異なる3地点のデータ ($X=10, 50, 90$ cm) をプロットした結果が第5図である。 $X=10, 50, 90$ cmのデータをみると、いずれの地点でも水深 (h) が深いほど、 H/H_e が大きくなるという右上がりの傾向を示すことがわかる。このことから、水深が浅いサンゴ礁ほど大きな波高減衰が起こるといえる。また、礁縁部からの距離 (X) が大きくなるにつれて、傾向線の傾きが小さくなり、とくに $X=90$ cmでは、その傾きはきわめて小さい。このことは、 H/H_e に与える水深 (h) の影響が礁縁部付近で大きく、サンゴ礁上を波が進行するにつれて、小さくなることを示唆している。

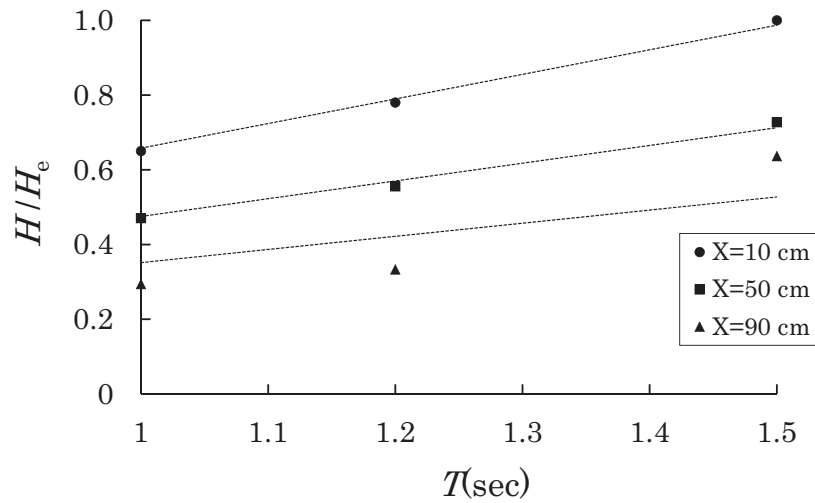
波高減衰に与える波の周期の影響について、水深 $h=2$ cm, 波高 $H'=1.7$ cmと一定で、波の周期 $T=1.0, 1.2, 1.5$ secと異なる3ケース (Case

3, 4, 5) について、横軸に波の周期 T (sec), 縦軸に波高伝達率 (H/H_e) をとり、礁縁部からの距離が異なる3地点のデータ ($X=10, 50, 90$ cm) をプロットした結果が第6図である。地点ごとにみると、波の周期 (T) が大きくなるにつれて、 H/H_e が大きくなる傾向がみられる。このことは、周期の長い波ほど、波高減衰がしにくくなることを示している。また、各地点における傾向線の傾きに、大きな違いがみられないことから、 H/H_e に及ぼす波の周期 (T) の影響は礁縁部からの距離 (X) の長短によって大きく変化しないといえる。

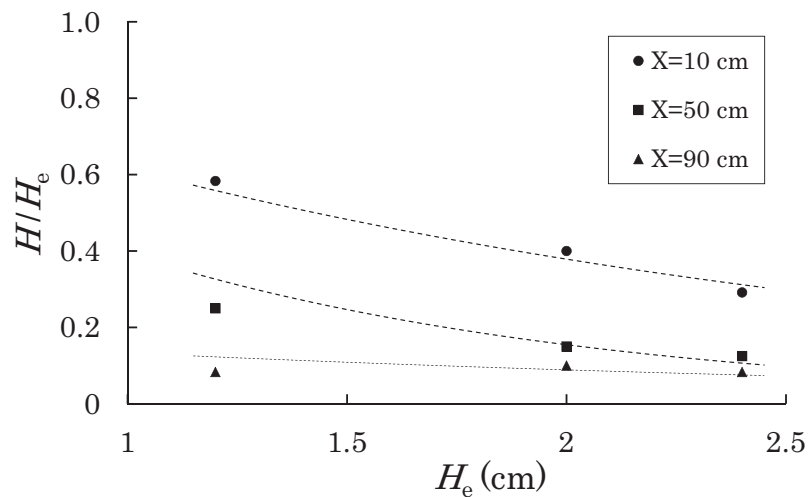
波高減衰に与える礁縁部での波高の影響について、水深 $h=1.0$ cm, 波の周期 $T=1.0$ secと一定で、礁縁部での波高 $H_e=1.2, 2.0, 2.4$ cmと異なる3ケース (Case 13, 28, 29) について、横軸に H_e (cm), 縦軸に波高伝達率 (H/H_e) をとり、礁縁部からの距離 (X) が異なる3地点のデータ ($X=10, 50, 90$ cm) をプロットした結果が第7図である。 $X=10, 50$ cmのデータをみると、礁縁部での波高 (H_e) が大きくなるにつれて、 H/H_e が小さくなるという右下がりの傾向を示すことがわかる。したがって、礁縁部での



第5図 水深 h (cm)と H/H_e との関係 ($T=0.7$ sec, $H'=2.0$ cmのケース)



第6図 波の周期 T (sec)と H/H_e との関係 ($h=2.0$ cm, $H'=1.7$ cmのケース)



第7図 礁縁部での波高 H_e (cm)と H/H_e との関係 ($h=1.0$ cm, $T=1.0$ secのケース)

波高 (H_e) が大きい波ほど、大きな波高減衰が起こるといえる。また、礁縁部からの距離 (X) が大きくなるにつれて、傾向線の傾きが小さくなり、 $X=90$ cmでは、 H/H_e はほぼ一定値をとることがわかる。このことは、 H/H_e に与える入射波波高の影響が礁縁部で大きく、サンゴ礁上を波が進行するにつれてきわめて小さくなることを示唆している。

3. 実験式の作成

本実験の結果より、波高伝達率 (H/H_e) は h と T に比例し、 X と H_e に反比例することが明らかとなった。以下、これらの関係を次元解析によって整理する。 H/H_e は次のような変数で表すことができる。

$$H/H_e = f(1/X, h, T, 1/H_e, g) \quad (1)$$

ここに g は重力加速度である。物理量の数は X , h , T , H_e , g の5個であり, 基本単位の数 は長さ [L], 時間 [T] の2つである。したがって無次元数の数は π 定理によって $5-2=3$ 個であり, H/H_e は次のように表すことが可能である。

$$H/H_e = k (1/X^a) h^b T^c (1/H_e^d) g^e \quad (2)$$

ここで式 (2) は

$$H/H_e = k X^{-a} h^b T^c H_e^{-d} g^e \quad (3)$$

と変形される。ここに k は無次元係数である。左辺の H/H_e は無次元量であることから, 基本単位にも次のような関係が成立しなくてはならない。

$$0 = [L]^{-a} [L]^b [T]^c [L]^{-d} [LT^{-2}]^e \quad (4)$$

両辺の次元が一致しなければならないから, 基本単位の関係式のべき数も左右で一致しなければならない。したがって, 各変数に関して,

$$[L] \text{ に関して: } 0 = -a + b - d + e \quad (5)$$

$$[T] \text{ に関して: } 0 = c - 2e \quad (6)$$

が成り立つ。式 (5), (6) より $c=2e$, $d=-a+b+e$ で表されることから,

$$H/H_e = k (1/X^a) h^b (1/H_e^{-a+b+e}) g^{2e} \quad (7)$$

$$H/H_e = k (1/X^a) h^b H_e^a (1/H_e)^b (1/H_e)^e (gT^2)^e \quad (8)$$

$$H/H_e = k (H_e^a/X^a) (h^b/H_e^b) \{(gT^2)^e/H_e^e\} \quad (9)$$

以上から, H/H_e は, 3つの無次元量 H_e/X , h/H_e , gT^2/H_e を用いて, 次のように表すことができる。

$$H/H_e = k (H_e/X)^a (h/H_e)^b (gT^2/H_e)^e \quad (10)$$

式 (10) の最適な係数 k および指数 a , b , e を決定するために, 重回帰分析を用いる。重回帰分析を行うためには, 右辺の変数を和の形に変形する必要がある。そこで, 両辺に自然対数をと, 式 (10) を変形すると,

$$\ln (H/H_e) = \ln k + a \ln (H_e/X) + b \ln (h/H_e) + e \ln (gT^2/H_e) \quad (11)$$

となり, $\ln (H/H_e)$ が $\ln (H_e/X)$, $\ln (h/H_e)$ と $\ln (gT^2/H_e)$ の線形結合によって表される。重回帰分析によって, k , a , b , e を求めると, $k=0.17$, $a=0.58$, $b=0.79$, $e=0.40$ となった (決定係数は $R^2=0.84$)。ただし, 解析には $h=0$ の条件で行った実験データは用いていない。実験室における H/H_e は次式のように表される。

$$H/H_e = 0.17 (H_e/X)^{0.58} \cdot (h/H_e)^{0.79} \cdot (H_e/gT^2)^{-0.40} \quad (12)$$

式 (12) は実験室におけるサンゴ礁上の波高伝達率に関する関係式となる。

Ⅲ 野外観測

1. 研究対象地域

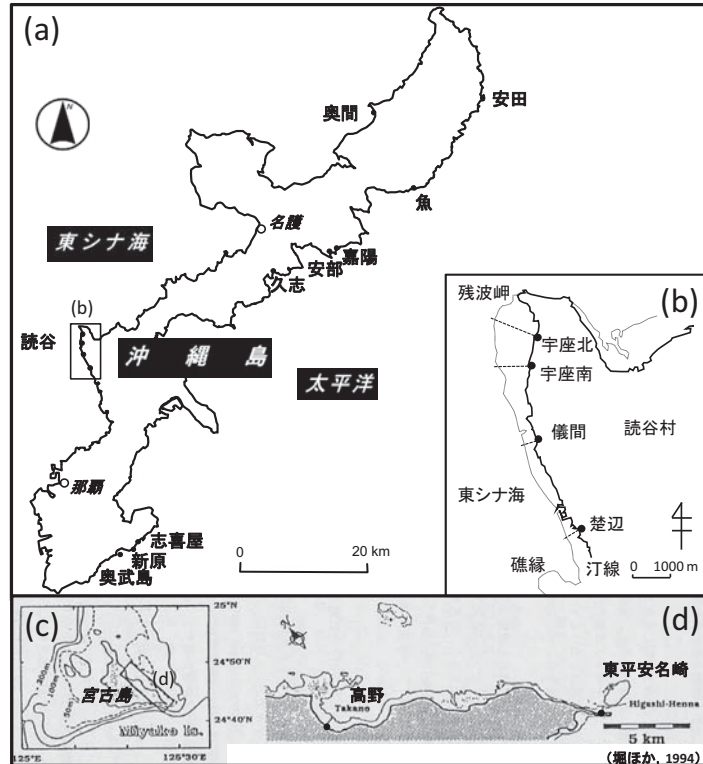
波浪特性やサンゴ礁特性の異なる汀線碎波波高 (H_b) のデータを収集するため, 2011年3月25日から2018年4月21日にかけて, 沖縄島と宮古島で野外調査を実施した。沖縄島では太平洋に面した東海岸で8地点 (安田・魚・嘉陽・安

部・久志・志喜屋・新原・奥武島), 東シナ海に面した西海岸で5地点(奥間・宇座北・宇座南・儀間・楚辺), 宮古島では2地点(高野・東平安名崎)の, 計15海浜で波浪観測を行った(第8図)。沖縄島・宮古島を含む南西諸島に襲来する波浪環境について述べると, 東シナ海に面した海岸は, 冬季の季節風による波が支配的である。波は12～2月に高く, 5～7月に低くなる傾向があり, 変化の傾向としては日本海沿岸と類似する。一方, 太平洋に面した海岸では, 台風による高波の影響により, 波は8月と10～11月に高い。1～6月にかけては, 北よりの季節風の影響をほとんど受けないので, 約半年の間, 波が低い状態が続く(磯崎, 2006)。また, 各調査地点のサンゴ礁幅(W)については, 2万5000分の1地形分類図を用いて, 汀線か

ら礁縁までの水平距離を図上で計測し, その地点のサンゴ礁幅(W)とした。また平均海面時の水深については, 武石ほか(2014), 青木ほか(2015)に記載されている値と, 目崎ほか(1977), 堀ほか(1994)に掲載されているサンゴ礁断面図から読み取った値を使用した。

2. 調査方法

波浪観測は各海浜に設けた測線上で行った。礁縁付近での波高(H_e), 汀線碎波波高(H_b), 波の周期(T)を計測した。礁縁付近での波高(H_e)の計測は, 観察者の眼が波頂と水平線を結ぶ線上にあるようにするとき, 眼の位置と汀線での引き波の位置との鉛直距離が波の波高に等しいことを利用した簡易計測法(Bascom, 1964)によって実施された。眼の位置と汀線での引き波の位置との鉛直距離は標尺(スタッフ)と



第8図 研究対象地域

フィールドスコープを用いて求めた。汀線碎波波高 (H_b) の計測は、汀線碎波している位置に標尺を立て、波高の値を読み取った。計測はそれぞれ複数回行い、そのうち最も大きな波高を採用した。波の周期 (T) は、ストップウォッチを用いて、汀線付近で20回碎波した経過時間を計測し、その値を20で除すことにより求めた。礁縁付近での水深 (h) は、潮位表を用いて調査日時の潮位から求めた。

3. 調査結果

調査結果を第2表にまとめた。得られたデー

タは調査地点、調査日時によって異なり、水深 (h) は0.10 ~ 1.80 m、波の周期 (T) は1.6 ~ 8.2 secであった。礁縁付近での波高 (H_e) と汀線碎波波高 (H_b) は、それぞれ0.6 ~ 6.3 m、0.01 ~ 0.65 mであった。

2017年12月18日に実施した読谷海岸における観測結果を述べる。12月18日午前の満潮時と午後の干潮時のデータについて、汀線碎波の波高 (H_b) と礁縁部付近での波の波高 (H_e) の比、 H_b/H_e を縦軸にとり、サンゴ礁幅 (W) を横軸にとってデータをプロットした結果を第9図に示す。 $H_e=2.8 \sim 3.3$ mの波が入射した満潮時（水

第2表 野外観測結果

No.	調査地点名	計測日	サンゴ礁幅 W (m)	水深 h (m)	波の周期 T (sec)	礁縁での波高 H_e (m)	汀線碎波波高 H_b (m)	H_b/H_e
1	宮古島	高野	2016/11/29	440	0.62	2.3	1.5	0.15
2			2016/11/29	440	1.46	3.5	1.9	0.45
3	東平安名崎		2016/11/29	320	0.23	6.1	1.8	0.06
4			2016/11/29	320	1.03	5.2	2.0	0.35
5	沖縄島 (東海岸)	安田	2017/7/22	395	1.06	5.8	1.5	0.15
6		魚	2011/8/27	188	0.28	8.1	3.5	0.10
7			2017/7/22	188	1.41	7.0	1.4	0.25
8		嘉陽	2011/8/28	751	0.26	6.6	4.5	0.05
9			2011/8/28	751	0.50	6.7	4.0	0.10
10		安部	2017/7/22	763	1.80	7.7	1.3	0.10
11		久志	2017/7/22	2431	1.68	6.8	0.7	0.10
12		志喜屋	2011/3/26	2700	1.20	2.7	1.0	0.03
13			2011/8/27	2700	1.36	7.6	6.3	0.28
14		新原	2011/3/26	1210	1.15	2.3	1.1	0.10
15	沖縄島 (東海岸)		2011/8/27	1210	1.50	7.5	5.3	0.40
16			2017/12/17	1210	0.55	1.6	3.5	0.05
17			2017/12/17	1210	1.05	1.7	4.0	0.10
18		奥武島	2011/8/27	800	0.50	7.7	5.1	0.15
19		奥間	2018/4/21	1275	1.39	4.8	0.7	0.10
20		宇座北	2011/3/25	1246	1.10	1.8	1.9	0.05
21			2017/12/17	1246	1.73	2.4	4.6	0.35
22			2017/12/18	1246	1.69	2.9	3.3	0.17
23			2017/12/18	1246	0.72	1.6	2.5	0.03
24			2018/4/20	1210	1.26	6.3	0.8	0.03
25			2018/4/21	1210	0.60	3.0	0.6	0.01
26		宇座南	2011/3/25	960	0.88	4.0	1.8	0.10
27			2017/12/18	960	1.40	4.0	3.1	0.24
28			2017/12/18	960	0.41	1.8	2.0	0.04
29			2018/4/20	960	0.96	5.7	0.8	0.04
30		儀間	2011/3/25	284	0.77	4.5	1.7	0.25
31			2017/12/17	284	1.23	4.2	4.0	0.65
32			2017/12/18	284	1.12	4.3	2.9	0.55
33			2017/12/18	284	0.10	3.0	1.6	0.15
34			2018/4/20	284	0.82	8.2	0.8	0.15
35			2018/4/21	284	0.10	6.0	0.6	0.04
36	楚辺		2011/3/25	431	1.05	5.0	1.5	0.20
37			2017/12/18	431	1.24	3.5	2.8	0.45
38			2017/12/18	431	0.26	2.4	1.8	0.06
39			2018/4/20	431	1.16	7.6	0.8	0.07

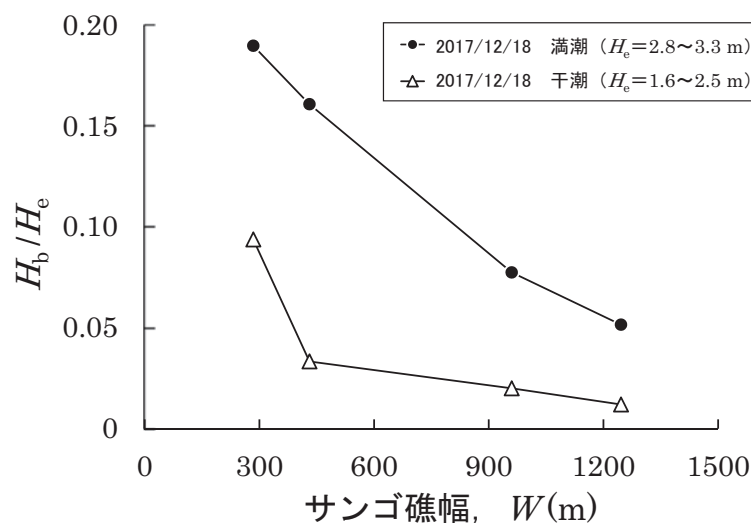
深の深い条件）についてみてみると，サンゴ礁幅（ W ）が大きい海岸ほど H_b/H_e が小さくなる傾向がみられる．また， $H_e=1.6 \sim 2.5$ mの波が入射した干潮時（水深の浅い条件）をみると， H_b/H_e は満潮時の値よりも小さく，そしてサンゴ礁幅（ W ）が大きい海岸ほど H_b/H_e が小さくなるという満潮時と同様の傾向がみられる．したがって，現地海岸における H_b/H_e はサンゴ礁幅（ W ）が大きくなると小さくなり，水深（ h ）が浅いほど小さくなる傾向を示すことがわかる．

IV 考察

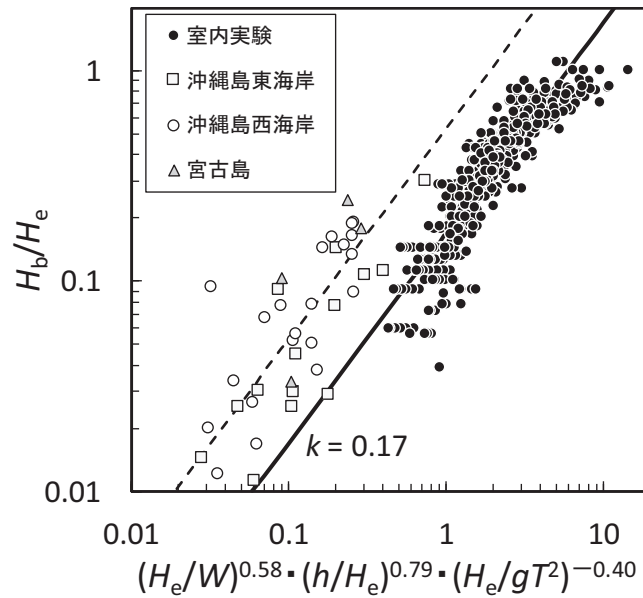
サンゴ礁幅（ W ）は礁縁部からの水平距離（ X ）を示すことから，本野外観測の結果は，礁縁部からの距離が大きくなるほど，また，水深（ h ）が浅くなるほど波高伝達率が小さくなる（すなわち，波高減衰が大きい）という実験室の傾向（第4図）と一致する．このことは現地と実験室では類似の波高減衰現象が起こっており，本実験が現地で起こる波高減衰に関する支配的な要素を取り込んで実施されたことを示唆している．そこで実験室と現地データとの対応

関係について考察する．現地データと実験結果を比較するために，実験における変数 X をサンゴ礁幅（ W ）とし，また現地観測において汀線碎波波高（ H_b ）は汀線碎波する直前の波の波高（ H ）とほとんど変わらなかったことから，実験の変数 H を H_b として扱うことにする．

第10図は，横軸に計算値 $(H_e/W)^{0.58} \cdot (H/H_e)^{0.79} \cdot (H_e/gT^2)^{-0.40}$ を，縦軸に H_b/H_e の実測値をとり，実験データと野外観測データを両対数グラフ上にプロットした結果である．野外データを沖縄島東海岸と西海岸，宮古島の3つの海浜に分けてプロットした．野外データにはばらつきがみられるものの，全体として（実験式による計算値を示す）実線と平行にプロットされ， H_b/H_e と $(H_e/W)^{0.58} \cdot (h/H_e)^{0.79} \cdot (H_e/gT^2)^{-0.40}$ が比例関係をもつことがわかる．このことは，実験で得られた説明変数 $(H_e/W)^{0.58} \cdot (h/H_e)^{0.79} \cdot (H_e/gT^2)^{-0.40}$ によって，野外の H_b/H_e が説明されていることを意味する．以上のことから，現地海岸における汀線碎波波高（ H_b ）は，サンゴ礁幅（ W ）と水深（ h ）というサンゴ礁の地形特性と，礁縁付近での波の波高（ H_e ）と波の周期（ T ）という波の特性を示す4つの要因に規定さ



第9図 野外におけるサンゴ礁幅（ W ）と H_b/H_e との関係



第10図 H_b/H_e の実測値と実験式による計算値との関係

れるといえる。また、汀線碎波波高(H_b)と各変数との関係から、(1) 礁縁付近での波高(H_e)、すなわち入射波エネルギーが大きいほど汀線碎波波高は大きくなる、(2) 水深(h)が浅く、サンゴ礁幅(W)が大きいサンゴ礁海岸ほど、汀線碎波波高は小さくなる、(3) H_e/gT^2 、すなわち、波形勾配が小さい波ほど汀線碎波波高は大きくなり、風波性の波よりもうねり性の波のほうが、汀線碎波波高が大きくなることを読み解ける。したがって、汀線碎波波高は、波のエネルギーと波形勾配およびサンゴ礁地形との関係によって決定されるといえる。

なお、現地データをみると大きなばらつきがある。このばらつきの原因としては、サンゴ礁地形(サンゴ礁表面の起伏、礁斜面の勾配)の場所的差異や波の不規則性など現地の複雑性が挙げられる。また本研究で使用した実験水路の長さは130 cmときわめて小規模であり、計測データの信頼性に与える反射波の影響なども捨てきれない。より高精度の地形測量、および反射波の影響を取り除いた水路実験により、本研

究で提示された手順でモデル化(定式化)が可能であると考ええる。これについては今後の課題としたい。

V おわりに

本研究では、裾礁型サンゴ礁海岸における汀線碎波波高の規定要因を明らかにすることを目的として、小型造波水路を用いた室内実験と野外調査を実施した。まず室内実験によって、波高伝達率(H/H_e)に与える波浪特性とサンゴ礁特性の影響について、以下のことが明らかになった。

- (1) 礁縁部からの距離(X)が大きいほど、 H/H_e は小さくなり、波高減衰は大きい。
- (2) 水深(h)が浅いほど、 H/H_e は小さくなり、波高減衰は大きい。
- (3) 波の周期(T)が小さいほど、 H/H_e は小さくなり、波高減衰は大きい。
- (4) 礁縁部での波高(H_e)が大きいほど、 H/H_e は小さくなり、波高減衰は大きい。

これらの結果から、次元解析の手法によって得られた無次元量を用いて定式化を行った結果、 H/H_e は、式（12）で与えられることがわかった。この実験式を用いて野外観測データとの関係性を考察した結果、実験で得られた説明変数 $(H_e/W)^{0.58} \cdot (h/H_e)^{0.79} \cdot (H_e/gT^2)^{-0.40}$ によって野外の H_b/H_e を概ね説明できることがわかった。このことは、野外における汀線碎波波高 (H_b) の規定要因が、サンゴ礁幅 (W)、サンゴ礁の水深 (h)、礁縁付近での波高 (H_e)、波の周期 (T) であることを示唆している。

謝辞

本研究は筆者の一人の森山が行った卒業論文を加筆・修正したものである。本稿の骨子は、2017年度日本地理学会春季大会（東京学芸大学）で発表した。本研究を進めるにあたり、財団法人国土地理協会からの学術研究助成（2016年度）を受けた。また、野外調査の一部には科学研究費（基盤研究C：22500990）を使用した。ここに記して厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 青木 久 (2015)：沖縄島のサンゴ礁海浜における暴浪時の遡上波限界高度。学芸地理, **70**, pp. 17-26.
- 青木 久・武石 裕・前門 晃 (2015)：沖縄島におけるサンゴ礁海浜の汀線碎波波高に関する推定式。沖縄地理, **15**, pp. 1-10.
- 青木 久・智原健太 (2009)：裾礁型リーフ海浜における汀線碎波波高－沖縄島読谷海岸における観測結果。地形, **30-3**, pp. 219-226.
- 青木 久・前門 晃 (2006)：サンゴ礁海浜の前浜勾配に関する定量的予測。沖縄地理, **7**, pp. 79-84.
- 秋山吉則 (1979)：漂砂の指標としての「星砂」の碎屑過程－与論島北東部現成サンゴ礁を例として－。地理科学, **31**, pp. 33-40.
- 磯崎一郎 (2006)：『波浪学のABC』成山堂書店。
- 江頭和彦・福田 功・岸良安治・西村達郎 (1985)：リーフによる波浪変形の現地観測。第32回海洋工学講演会論文集, pp. 90-94.
- 大中 晋・宇多高明・大貫輝男・遠藤秀文・芹沢真澄・三波俊郎 (2000)：バリ島 Nusa Dua 海岸におけるリーフギャップ周辺の波・流れの観測。第47回海岸工学論文集, pp. 1311-1315.
- 沖縄第四紀調査団・沖縄地学会 (1975)：『沖縄の自然－その生いたちを訪ねて』平凡社。
- 河野二夫・永松一甫・喜屋武 忠 (1978)：リーフ上の波の変形に関する現地調査。第25回海洋工学講演会論文集, pp. 146-150.
- サンゴ礁地域研究グループ編 (1990)：『熱い自然－サンゴ礁の環境誌』古今書院。
- 武石 裕・青木 久・前門 晃・廣瀬 孝 (2014)：サンゴ礁の波高減衰に関する野外観測－沖縄島南部新原海岸の裾礁の事例－。沖縄地理, **14**, pp. 19-24.
- 津嘉山正光 (2001)：沖縄諸島のサンゴ礁海岸と波浪の特性。しまたてい, **18**, pp. 43-46.
- 津嘉山正光・河野二夫・仲座栄三・大城真一・福田孝晴 (1995)：リーフ上の波の変形に関する研究。海岸工学論文集, **42**, pp. 176-180.
- 津嘉山正光・仲座栄三・我喜屋邦浩 (1989)：リーフ上の波の変形に関する研究。海岸工学論文集, **36**, pp. 70-74.
- 谷本修志・宇多高明・桜本 弘 (1989)：バリ島のリーフ周りの波、流れ、地形変化の観測。海岸工学論文集, **36**, pp. 60-64.
- 寺尾 健・長谷川 正・奥村研一・山本政光

- (1981)：リーフにおける波浪変形について. 海岸工学講演会論文集, **28**, pp. 133-137.
- 仲座栄三・津嘉山正光・田中 聡 (1994)：リーフ海岸における波・サーフビートに関する研究. 海岸工学論文集, **41**, pp. 86-90.
- 平山静香・廣瀬 孝 (2003)：瀬底島サンゴ礁海岸における砂質堆積物の移動. 沖縄地理, **6**, pp. 53-71.
- 堀 信行・菅 浩伸・市川清士 (1994)：宮古島のサンゴ礁礁原における地形帯の形成と場の条件. 日本地理学会予稿集, **45**, pp. 78-79.
- 目崎茂和・渡久地 健・中村倫子 (1977)：沖縄島のサンゴ礁地形. 琉球列島の地質学研究, **2**, pp. 91-106.
- 山内秀夫・長谷川 均・長澤良太 (1989)：石垣島吉原のサンゴ礁海岸における砂質物分布について. 沖縄地理, **2**, pp. 1-12.
- Bascom, W. (1964): Waves and beaches. Garden City, New York: Anchor Books Doubleday & Company.
- Gourlay, R. M.(1994): Wave transformation on a coral reef. Coastal Engineering, **23**, pp. 17-42.
- Kench, P.S. and Brander, R.W. (2006): Wave processes on coral reef flats: implications for reef geomorphology using Australian case studies. Journal of Coastal Research, **22**, pp. 209-223.
- Kench, P.S., Brander, R.W., Parnell, K. E., O'Callaghan, J. M. (2009): Seasonal variations in wave characteristics around a coral reef island, South Maalhosmadulu atoll, Maldives. Marine Geology, **262**, pp. 116-129.
- Mandlier, P. G. (2013): Field observations of wave refraction and propagation pathways on coral reef platforms. Earth Surface Processes and Landforms, **38**, pp. 913-925.
- Mandlier, P. G. and Kench, P. S. (2012): Analytical modeling of wave refraction and convergence on coral reef platforms: implications for island formation and stability. Geomorphology, **159-160**, pp. 84-92.

A Preliminary Laboratory Experiment on Shore Break Height on Beaches with Fringing Reef

MORIYAMA Yuta* and AOKI Hisashi**

Keywords : Fringing reef, shore break, laboratory experiment, field measurement, controlling factors

*Kawagoe High School

**Department of Geography, Tokyo Gakugei University