現地調査と室内実験による ビーチロック形成メカニズムの検討

山木 克則¹・茅根 創²・大葉 英雄³・洪 永勲⁴
山本 将史⁴・田中 昌宏⁵・林 文慶⁶・上野 嘉之⁵

¹ 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 葉山水域環境実験場 (〒240-0111 神奈川県三浦郡葉山町一色 2400)

E-mail: yamaki@kajima.com

² 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

E-mail: kayane@eps.s.u-tokyo.ac.jp

³ 静岡大学創造科学技術大学院 (〒422-8529 静岡市駿河区大谷 836)

⁴ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

⁵ フェロー 鹿島建設(株) 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

⁶ 正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 葉山水域環境実験場 (〒240-0111 神奈川県三浦郡葉山町一色 2400)

⁵ 鹿島建設(株) 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

本研究では、形成過程と考えられる新しい年代のビーチロックを対象に、生態工学的視点による現地調査、その結果を基にサンゴ砂礫の固化実験を行い、ビーチロック形成メカニズムの検討をした。調査を行った石垣島吉原海岸のビーチロックは、現代の人工物が固着されているなど比較的新しい形成年代であり、現在も形成途中と考えられた。ビーチロックの表層面には緑藻、シアノバクテリア(藍藻)などが着生し、膠結部のSEM-EDXによる観察ではCa, Siの細粒分を含むセメント様物質が確認された。室内実験では、潮汐に連動した有機物反応による酸性化とアルカリ化の周期的な変動が計測され、Caの溶脱と結晶化に深く関係するなど、ビーチロック形成に係る新しいメカニズムを明らかにした。

Key Words : beach rock, coral reef, foraminifera, algae, cyanobacteria, fine particle, Ishigaki Island, Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDX)

1. はじめに

熱帯～亜熱帯域のサンゴ礁海岸では、潮間帯のサンゴ片や有孔虫殻などを含む堆積物がCaCO₃により膠結したビーチロックが見られる¹⁾。わが国のビーチロックは、北限は能登半島²⁾とされるが、大部分は沖縄県や小笠原諸島などの亜熱帯地域で見られる¹⁾³⁾。

我々は、サンゴ礁海岸の浸食対策を目的に、州島及びビーチロックの形成メカニズムとその形成促進技術について現地調査と室内実験により検討している。

本技術は、南太平洋のツバル、キリバス、インド洋のモルディブといった海面上昇による水没が危惧されている環礁州島の保全策としても有効であり、早期の対策が望まれている。

ビーチロックの形成メカニズムは、膠結物質が高Mgカルサイトやアラゴナイトなどの炭酸塩であることが明らかにされている⁴⁾が、その供給源については地下水、

海水、微生物による生産など諸説ある⁵⁾。但し、ビーチロックの形成メカニズムについては、周辺環境と形成要因の関係を含めた研究事例は極めて少ない。この原因として、既往の研究では対象としたビーチロックの年代が数百～数千年オーダーのものが多く、地質学的な研究が中心であり、環境や生物学的観点による研究は殆んど行われてこなかった。一方で短期的な固化現象として、ウレアーゼ活性を有するバクテリアが尿素を分解する過程でCaCO₃を析出する原理が示されている⁶⁾。しかし、これら特定機能を持つ微生物や固化作用に必要な試薬を自然界へ持ち込むことは、自然生態系に何らかの影響を及ぼす懸念があり、積極的な活用は望ましくない。

本研究では、自然界で起きているビーチロックの固化現象について生態工学的視点による現地調査を行い、有機物反応による固化メカニズムについて推測した。さらに、室内実験では、有機物反応によるサンゴ砂礫の固化実験を行い、メカニズムの検証を行った。

2. 現地ビーチロック調査

(1) 吉原海岸のビーチロック

a) 周辺環境

調査は図-1に示す石垣島吉原海岸のビーチロックで実施した。吉原海岸は、石垣島の北側、川平湾口から東に約1 kmに位置するサンゴ礁海岸である。吉原海岸中ほどにあるビーチロック群は、浜と平行に長さ74m、幅は最大で約15mある(図-2)。

ビーチロック前面の礁池は沖合方向に約300m発達し、礁嶺は湾曲状に変化しており、最大約130mの幅がある。礁池ではミドリイシ属(*Acrpora*.sp)が優占するサンゴ群集と海草類が共存する多様な生物環境が形成されている。礁嶺近くでは、芝生状藻類や無節石灰藻の群落が形成されており、タイヨウノスナ(*Calcarina gaudichaudii*), ホシズナ(*Baculogypsina sphaerulata*), ゼニイシ属(*Marginopora*)などの有孔虫類の生息場となっている。

b) 人工物埋固着の発見

2015年6月、調査計画時における事前踏査において、ビーチロック上に人工物の固着を発見した(図-3)。この人工物は、ゴムや導線、鉄から成る電気設備の資材と考えられ、年代は数十年以内と想定された。人工物はビーチロック上面に、有孔虫殻、サンゴ片、貝殻片と共に固着していた。なお、放射性炭素年代測定(^{14}C)による分析結果では、本ビーチロックの年代は“Modern”(pMCが100以上であり、 ^{14}C の量が標準現代炭素と同等以上で1950年以降)であることが報告されている³⁾。

(2) 調査項目と方法

a) ビーチロックの生物環境と測量調査

生物環境から見たビーチロック群の特徴を調べるために、ビーチロックに付着する生物群集の観察、同定を行った。また、平均海面を基準とするビーチロックの高度を測量し、試料の採取地点等を決定した。

b) ビーチロックの物性と微細構造

図-4に示す地盤高および生物環境が異なるA~Cの3エリアの3地点(Core-1, 2, 3)において、長さ150 mm、直径30 mmのコアビットを装着した電動ドリルにより、深さ-3、-6、-12 cmから膠結試料を採取した。現地では、ビーチロック表面および各深度の硬度を軟岩ペネトロ計(丸東製作所)により、1カ所につき各5点ずつ計測を行い平均値を求めた。

採取試料は研究所に持ち帰り、薄片を作製し金蒸着を施し走査型電子顕微鏡(SEM)による微細構造の解析、画像による空隙率の分析、エネルギー分散型X線分析装置(EDX)による主要元素の分布マッピングを実施した。ビーチロックに固着していた人工物についてもその固着部分を採取し、微細構造の分析を行った。

図-1 調査地点

図-2 吉原海岸のビーチロック

図-3 ビーチロックに固着した人工物

図-4 吉原海岸におけるビーチロック断面図と観測地点
高度は平均海面 (MSL) を基準とする

c) ビーチロック周辺間隙水の化学分析

大潮時の2015年7月29日12時より翌30日12時の間、図-4に示したビーチロックA、Bの中間部の窪みの堆積砂中の-30 cm、ビーチロック東端から10m離れたビーチロックが無い砂中-30 cmの間隙水、沖合約50mの表層水を3時間おきに採水した。間隙水はシリンジ採水器（ミズツール、大起理化学工業）を用いた。採水後、水試料を孔径0.45 μm のシリンジフィルターで濾過し、塩化第二水銀を加えて固定した。現地では、塩分、水温、pH（9625-10D、堀場製作所）、 Ca^{2+} 濃度（6583-10C、同社）を計測、実験室にてTOC（TOC-VCPH、島津製作所）、 Ca^{2+} 濃度（ICPE-9000、同社）、アルカリ度（ATT-05、紀本電子工業）、全炭酸を計算により求めた。尚、 Ca^{2+} はICP発光分析の値を優先し、15:00、21:00、3:00、9:00の値は現場計測値から補正したものをを用いた。

(3) 結果と考察

a) ビーチロックの生物環境と測量調査

調査側線におけるビーチロックは、平均海面より-23 cmから+113 cmの間に形成されており、勾配と付着生物相により、A～Cの3エリアに分けた（図-4）。

（エリアA）1:10の緩やかな傾斜勾配面にアオサ属（*Ulva* sp.）を主体とする緑藻類が優占する。

（エリアB）1:15の傾斜勾配面にシアノバクテリアのクダモ（*Lyngbya confervoides*）が厚み3～5mmのマット状に生育する。

（エリアC）1:1.5の一部に水平面があるなどらかな場でビーチロック表面は黒色を呈する。

なお、ビーチロック東側50m付近には涸れ川があり、ビーチロック付近では地下水が湧き出していた。

b) ビーチロックの物性と微細構造

コア調査によるビーチロックの強度特性を図-5、空隙率の特性を図-6に示す。強度は、ビーチロックの内部が表層に比較して低い傾向が見られた。3地点とも表層部は7～10MPa、深さ6cm以深では1.5～3MPaであった。空隙率の特性では、3地点で20～50%と幅が広く、共通した傾向は見られなかった。各地点の表層部におけるSEM画像を図-7に示す。それぞれの構成物に違いが見られ、Core-1では数mmのサンゴ片や貝殻片、Core-2ではサンゴの微細破片がシアノバクテリアに着生しマット状に固化していた。Core-3では有孔虫殻同士がセメント物質により膠結した状態が観察された。図-8にSEM-EDX像を示す。ビーチロックを構成する材料は、サンゴ片、有孔虫殻、貝殻片以外にSi粒、Mg粒を含むことが判明した。花崗岩山地のある石垣島では石英粒が岩石片として含まれることが知られ⁷⁾、Si成分は、陸域の石英粒が膠結された可能性がある。画像からはSi粒の表面に溶脱したCaが結晶化していることが判る。マグネシウムは、

図-5 ビーチロックの強度

図-6 ビーチロックの空隙率

(a) Core-1 表層部

(b) Core-2 表層部

(c) Core-3 表層部

図-7 ビーチロック SEM 画像の例

ビーチロック中の穿孔性藻類, 若しくはシアノバクテリアの組織に沈着した海水由来成分と考えられる. これら藻類やシアノバクテリアは, 死滅後も難分解性の繊維部分がCa, Siなどの細粒を吸着, 再結晶化時の担体として機能している可能性を示した.

ビーチロック上に埋没していた人工物のSEM-EDX像を図-9に示す. この部分は, 電設資材のゴム部分がビーチロックに埋没していた部分である. ゴム部分には厚さ約200 μm のカルシウムの針状結晶, Si粒に30~50 μm の厚さでCaの付着物が観察された. 電設資材は数十年以内のものと考えられることから比較的早い時間スケールで結晶化が進んだと考えられる.

c) ビーチロック周辺の間隙水の化学分析

図-10に計測期間における潮汐とビーチロックおよび周辺部の水の分析結果を示す. ビーチロック近傍の間隙水中の塩分変動は, 干潮時には20‰以下, 満潮時に海水と同等の塩分になり, Ca^{2+} 濃度との連動が見られた. これは, 干潮時は海水成分が淡水によって希釈, 満潮時に海水が浸透していると考えられた. TOC濃度は, 表層水の1~2mg/lに対し, 海岸砂中及びビーチロック近傍では干出時に上昇する傾向が見られ, 特に海岸砂中では最大7mg/lに増加した. これは, ビーチロックに着生する藻類やシアノバクテリア, 打ち上げ海藻, 海草類などによる影響が考えられた. その際, ビーチロック間隙水の全炭酸の上昇は有機物の分解によるもの, アルカリ度の上昇は CO_2 濃度上昇に伴う炭酸カルシウムの溶脱によるものと推測された.

今回の調査により, 有機物の分解反応が固化メカニズムに関与する可能性が示された.

3. ビーチロック形成実験

(1) 方法

表-1に示すように, ビーチロック形成実験は, サンゴ砂, サンゴ砂細粒分, 褐藻のワカメ粉末, 有孔虫の配合を変えて, 6条件を作った. サンゴ砂は中央粒径2.54mmのものを扱い, Case 4~5については同サンゴ砂をピンミルにより75 μm に粉碎した材料を混入した. 細粒分は,

(a) 有孔虫殻とサンゴ, シリカ粒の膠結

(b) セメント様物質の微細構造((a)赤枠拡大)

(c) SiとCa細粒を主体とした藻類による膠結

図-8 ビーチロック膠結部SEM-EDX像

図-9 人工物のSEM-EDX像

現地のビーチロックのセメント様物質中にて観察された. Case 2及びCase 5では, 有機物として褐藻類のワカメを粉碎したものを混入した. 更にCase 3及び6では, 乾燥させた有孔虫(鳩間島産)を混入した. 調合した材料を不織布性のポット(直径100mm×高さ80mm)に収め,

図-10 ビーチロック近傍の潮汐(a)と間隙水の分析結果(b~f)

実験水槽内に配置した。実験水槽は、サイズ 45×60×30cm のオーバーフロー式であり、タイマーと小型ポンプにより潮汐を再現した。海水は、神奈川県葉山町地先の相模湾より汲み上げた海水を用い、干出と冠水の周期を 12 時間とし、干出時は熱射源としてメタルハライドランプ (100V, 400W) を点灯した。図-11 に実験システムの概要を示す。実験では、Case 4 及び Case 5 の試験体について砂中の中間部に IS-FET 型電極を挿入し pH の連続計測 (H260GNP, HACH 社) を実施した。30 日間試験を行った後の試験体を乾燥後に水槽より取り出し、山中式土壤高度計を用い、貫入量(mm)から強度(MPa)に換算した。計測は、表面と内部について 5 点行い、平均値及び標準誤差を計算した。固化をした試料を中心に、走査型電子顕微鏡による微細構造および構成元素の解析を実施した。

褐藻類のワカメ、海草のアマモ、有孔虫を有機物源として、有機酸生成を観察した。海水 50cc に各々を乾燥させミルで粉碎したものを 1g ずつ入れ、攪拌して 30℃ の暗所で静置した。7 日、21 日、49 日目に 1 μ m のフィルタでろ過した試験水中の有機酸濃度を GC で定量した。

(2) 結果と考察

図-12 に 30 日経過後の強度特性を示す。Case 1～3 は固化しなかった。Case 5 と 6 では表面で 3.5～4MPa の固化が認められた。Case 4 では表面では約 2MPa の固化が見られたが内部は固化が認められなかった。この結果より、サンゴ砂の細粒分と有機物源としての褐藻類、有孔虫類が早期の固化に強く係っていることが判明した。

図-13 に Case 4 及び Case 5 の内部 pH 変動を示す。これは有機物の有無による化学的な変化の違いを現しており、冠水時には有機物の分解が進み CO₂ の発生や有機酸の生成に伴う pH 低下、干出時には脱 CO₂ 若しくは有機酸の分解による pH 上昇につながると考えられた。海水の酸性化はカルシウムの溶脱、アルカリ化は結晶化に進むことが考えられ、これがビーチロック形成のメカニズムの一つと考えられた。

図-14 に褐藻、海草、有孔虫から生成された有機酸の種類と濃度を示す。褐藻と海草では 7 日で 100～1000mg/l の酢酸が検出され、21 日目以降では数種の有機酸生成が確認出来た。有孔虫からは 49 日目より有機酸生成が検出された。海藻よりも有孔虫からの有機酸溶出が遅いことは、有孔虫の有機物含有量が、海藻類に比較して少ないこと (乾燥重量 10～12%) に起因すると考えられた。

4. ビーチロック形成メカニズム

今回の現地調査と室内試験結果より、ビーチロックの形成メカニズムには多様な生物環境と共に、SiやCaの無機細粒分の存在が重要なことが明らかとなった。特に、

表-1 実験ケース一覧

	サンゴ砂※1	サンゴ砂 細粒分※2	褐藻類 ワカメ	有孔虫
含有量		19% v/v	5% w/w	50% v/v
Case 1	○			
Case 2	○		○	
Case 3	○			○
Case 4	○	○		
Case 5	○	○	○	
Case 6	○	○		○

※1 D₅₀=2.54mm ※2 75 μ m>

図-11 固化実験システム

図-12 試験体の強度特性

図-13 有機物有無による pH 変動の違い

図-14 生成された有機酸の種類と濃度

有機酸によるCaの溶脱と、その後の有機酸を含む多様な有機物の分解が、 CaCO_3 の再結晶化による無機細粒分の固化をもたらしていると考えられた。このメカニズムは、例えば以下の反応 (1)~(5)で説明することができる。

【Ca溶脱過程：酸性化】

有機酸の生成（解糖系→酢酸を例として）

酸によるCa溶脱

【Ca析出過程：アルカリ化】

酢酸の生分解

炭酸カルシウムの析出

5. まとめ

今回、現地調査と室内におけるビーチロック固化実験を通じ、ビーチロック形成メカニズムに関する新たな知見を得ることができた。本研究結果から考えられるビーチロック形成メカニズムを以下にまとめる。

(1) 現地調査

1. 石垣島吉原海岸におけるビーチロック

石垣島吉原海岸におけるビーチロックでは、人工物の固着を含め、潮間帯で形成されているビーチロックの実態を把握した。サンゴ片、貝殻片、有孔虫殻など海洋生物由来物質、花崗岩由来のSi、それらの細粒分がビーチロックの構成材料となっていた。

2. ビーチロック形成における生物環境の重要性

ビーチロック表層面では緑藻、シアノバクテリアなどが着生し、SEM観察ではこれら藻類の周辺ではCaの細粒分を含む緻密なセメント様物質の存在が確認された。さらには、有機物の分解反応が固化メカニズムに関与する可能性が示された。このことから、藻類などの生物環境がビーチロック形成に関わっていることが分かった。

(2) 室内固化実験

1. 有機物反応による固化メカニズム

室内固化試験から、有機物分解による有機酸の生成による酸性化、有機酸分解によるアルカリ化などがCaの溶脱、結晶化につながることを示唆された。

2. 細粒分の添加による効果

現地ビーチロックの分析により明らかとなったCa細粒分を添加することにより、強度の増加が確認された。

謝辞：本研究を進めるにあたり有益な助言を戴いた鹿島建設(株)環境本部 北島洋二氏に謝意を表する。

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」で得られた研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 武永健一郎：ビーチロックの成因について，地理学評論，38，pp. 12-29，1965.
- 2) 東洋一ほか：北陸地域にみられるビーチロックについて，第4紀研究，20，pp. 271-280，1982.
- 3) 小元久仁夫：八重山諸島から採取したビーチロック試料の校正年代と安定炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$)：季刊地理学，65，pp. 207-221，2014.
- 4) Bricker, O.P. :Introduction: beachrock and intertidal cement. In: Bricker, O.P. (Ed.), Carbonate Cements. Johns Hopkins Press, Baltimore, 1-13, 1971.
- 5) Voudoukas, M.I.: Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts, Earth-Science Reviews, 85, 23-46, 2007.
- 6) 畠俊郎ほか：ウレアーゼ活性を有する微生物による沿岸域を対象とした微生物固化の適用性評価，地盤工学ジャーナル，6，pp.305-315，2011.
- 7) 山内秀夫：サンゴ礁海岸の砂浜，熱い自然—サンゴ礁の環境誌，古今書院，東京，pp. 101-117, 1990.

(2016.2.4 受付)

STUDIES ON THE BEACH ROCK FORMATION MECHANISM BY FIELD SURVEYS AND LABORATORY EXPERIMENT

Katsunori YAMAKI, Hajime KAYANNE, Hideo OHBA, Nobuhiro KO,
Shoji YAMAMOTO, Masahiro TANAKA, Boon Keng LIM and Yoshiyuki UENO

To clarify formation mechanism of the beach rock, a recently forming beach rock was observed by viewpoints of ecology and civil engineering in the field, and solidification test of the coral grit was conducted in the laboratory. At the field survey of Yoshiwara shore in Ishigaki Island, a modern artifact in the beach rock was observed. This phenomenon was considered that this beach rock is relatively new formation and it continued in the formation process. Adhesion of green algae and cyanobacterium was observed on the beach rock surface. Cement materials including Ca, Mg and Si were detected by SEM-EDX observation.

In the indoor experiment, periodic change of the organic matter acidization and alkalization which linked ebb and flow was determined. As a new finding, eluviation and crystallization of Ca were deeply related to the beach rock formation.