

# ビーチロックの形成年代を決定した膠結物質 について

5

小元久仁夫

(元日本大学大学院理工学研究科・文理学部)

## 目次

10	摘要	1
	I はじめに	2
	II 研究目的および分析方法	3
	1 研究目的	3
	2 研究対象地域	4
15	3 試料とその採取法	4
	4 試料調製法と分析機器	5
	III 分析結果	6
	1 元素分析結果	6
	2 $^{14}\text{C}$ 年代測定結果	7
20	3 $\delta^{13}\text{C}$ の測定結果	8
	IV 考察	9
	1 膠結物質の構成物質	9
	2 膠結物と膠結物質	10
	3 膠結物質の年代測定試料としての意義	11
25	4 非炭酸塩の膠結物質	12
	5 ビーチロックの形成速度	13
	6 ビーチロックの形成年代	14
	7 ビーチロックの形成年代の対比	16
	V 結論	17
30	謝辞	18
	注	19
	文献	19
	英文要旨	25
	英文要旨に対応する日本語要旨	26
35	図表の説明文	27-28

息

お城跡し

す。

ビーチロックの形成年代は貝化石やサンゴ化石の<sup>14</sup>C年代によって決定されてきた。しかしその<sup>14</sup>C年代は生物の死滅年代を示し、ビーチロックの形成年代は潮間帯の堆積物がセメント（膠結）された年代であると考えた場合乖離している。セメントはおもに海水起源の微細なCaCO<sub>3</sub>の結晶のため<sup>14</sup>C年代測定試料として採取は困難である。これに代わる試料として、ビーチロックの中礫や大礫の下部に固結していた石灰質な物質（膠結物質と呼称）を西南日本の12海岸から採取した。28試料をICP-MSにより元素分析を行った結果、佐世保を除く11地点のCa濃度は25.2%~55.1%を示し、<sup>14</sup>C年代測定が可能であった。またビーチロックは5240±65 yr BP~Modern（現世）まで14期にわたり形成された。膠結物質は貝化石やサンゴ化石の<sup>14</sup>C年代よりもビーチロックの形成年代に近い年代を示すと考察される試料である。

すると  
考えられる。

物質

を

把え

意味不明？

**キーワード** : ビーチロック, 膠結物質, 加速器質量分析計, 元素分析, 西南日本

説明

本文を読むとわかるのでは？

要、両年代を比較!

↑  
= かなり重要!

アインレイビ  
温暖期の生成物  
とあるらしい、という  
ことですね。

## I はじめに

ビーチロックの多くは熱帯や亜熱帯の砂浜海岸に分布し、日本では南西諸島の多くの島々でみられる(小元, 2005)。しかし南西諸島よりはるか北方の能登半島(小笠原ほか, 2005; 吉富ほか, 2004; 鈴木ほか, 2018 など)や房総半島(武永, 1965; 菅沼, 1979)においてもビーチロックが報告されている。日本の温帯性ビーチロックの分布と特徴については田中(2018)が報告している。

ビーチロックは潮間帯の堆積物が膠結されて形成され、海側に緩く傾くマイクロケスタ状の地形を呈する。このためその標高や年代は海水準変動や地殻変動を示す指標となる。近年地球温暖化により海水準が上昇しており、今後波浪による侵食により砂浜の消失が懸念される。ビーチロックの多くは砂浜海岸にみられ、その堅固な物性は護岸的役割をはたす可能性が海岸工学の面から近年注目されている(壇上・川崎, 2013)。

ビーチロックの成因については多くの研究者が取り組んできた。Russel (1962), Stoddart and Cann (1965), Scoffin and Stoddart (1983)らは潮間帯の堆積物がおもに海水 ~~または地下水~~ から晶出または沈殿した炭酸カルシウム ~~( $\text{CaCO}_3$ )~~ により膠結されて形成されたと述べている。その後 Vousdoukas et al. (2005) は (1)海水からの炭酸カルシウムの沈殿説, (2)淡水と海水の混合による炭酸カルシウムの沈殿説, (3)地下水の蒸発説, (4)二酸化炭素の脱気説, (5)生物の活動説などをあげた。また Turner (2005) も上記と同様 (1)高温下で海水の蒸発による過飽和になった炭酸カルシウムの析出説(高マグネシウム方解石やアラレ石の物理・化学的な沈殿), (2)淡水と海水の混合説(低マグネシウム方解石とアラレ石の沈殿), (3)海浜堆積物の間隙水中の二酸化炭素の脱気説(高マグネシウム方解石やアラレ石の物理・化学的な沈殿), (4)微生物活動副産物の微細な石灰岩粒

↑  
合がも  
↑  
あつ(152  
をい

ビーチロック  
これは?

200712  
16<183

はん504  
研究も  
1本の  
というか

子の沈殿説などを指摘している。日本では古くは米谷（1963）が炭酸石灰の沈殿，武永（1965）は  $\text{CaCO}_3$  の沈殿，堀ほか（1972, 1973）は炭酸塩のセメント作用を報告し，その後田中（1983, 1986）も同様の報告をしており，ビーチロックの形成機構に関する文献の整理を行っている（田中，2019）。

南西諸島のビーチロックの形成年代は，これまで主として貝化石やサンゴ化石など，炭酸塩試料の  $^{14}\text{C}$  年代で決定されてきた（例えば Kawana, 1981; 小元, 2005 ほか多数）。しかしその  $^{14}\text{C}$  年代は生物の死滅年代を示し「ビーチロックの形成年代は潮間帯の堆積物が膠結された年代である」と考えた場合乖離している（小元ほか，2018a, 2021）。したがって正確なビーチロックの形成年代を決定するためには，ビーチロックからセメント（ $\text{CaCO}_3$ ）を採取して  $^{14}\text{C}$  年代測定を行えばよい。しかしこの  $\text{CaCO}_3$  は電子顕微鏡下で観察される微細な aragonite needles（針状アラレ石）や calcite（方解石）<sup>1)</sup> のため（Moore, 1973），採取困難である。このため小元は上記の  $\text{CaCO}_3$  に代わる試料として，ビーチロックの大礫や中礫の下部から石灰質な固結物質（膠結物質と呼称）を採取し，ICP-MS（Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry：誘導結合プラズマ質量分析装置）により Ca 濃度を確認して試料調製を行い，AMS（加速器質量分析計）で  $^{14}\text{C}$  年代測定を行ってビーチロックの形成年代を決定してきた。

## II 研究目的および分析方法

### 1. 研究目的

本研究の目的はビーチロックの形成年代を決定したきた貝化石やサンゴ化石に代わり，膠結物質を試料としてビーチロックの形成年代を決定する方法を確立することである。本論ではこれまで行ってきた一連の研究（小元ほか，2018a, 2020, 2021, 2022a, 2023a；小元，2024；小元ほか，2025）を総括して，

自分の研究について

i) は  
大まかに  
2018  
使え  
例として  
い多数  
- 文に  
100%

ビーチロック  
の  
大礫  
中礫

と  
↑

大礫中礫  
富山県 富山県 富山県

ビーチロックの形成年代を決定してきた試料の検討、試料の採取方法、試料調整法、ICP-MSによる元素分析やAMS<sup>14</sup>C年代測定結果などについて報告する。

## 2. 研究対象地域

5 これまでの研究で試料を採取したのはいずれも非石灰岩の海岸である (図 1)。非石灰岩海岸を対象とした理由は、南西諸島の多くの島々は第四系琉球層群の石灰岩 (琉球石灰岩) で構成され、ビーチロックにはその礫や細粒物質が含まれる。このため分析結果にその影響が反映されるのを避けるためである。試料は九州および南西諸島 (以下西南日本) の礫岩質ビーチロックから採取した。

10 すなわち宮崎県延岡市島浦島南部の日井の浜 (小元ほか, 2021)、長崎県佐世保市東浜町南端 (小元ほか, 2022a)、沖縄県伊平屋島の南北 2 地点 (小元, 2024)、慶良間諸島慶留間島北部の東西 2 地点 (小元ほか, 2023a)、座間味島の南北 2 地点、阿嘉島南部および渡嘉敷島の東西および南西部の 3 地点 (小元ほか, 2025) である。

## 3. 試料とその採取方法

### (1) 試料の特徴

15 上記のビーチロックの特徴をまとめて表 1 に示す。試料採取地点の緯度および経度はビーチロックのほぼ中央を示し、標高は測定値を最寄りの検潮所の実測値により補正した。地形および地質の特徴は上記の論文で詳細に記載したため、本論では改めて記載しない。

20 膠結物質とは大礫や中礫の下部に固結している細砂~シルト質で石灰質な物質 (0.25~0.005mm) である。その色調は水分含有量や鉱物によるが、灰白色 (heu 2.5YR 8/0) ~明橙褐色 (heu 7.5YR 7/5) を呈する。大礫や中礫は岩石ハンマーやタガネを使用しないと容易に周囲の細粒物質から分離できないほど固く膠結している (小元ほか, 2025)。ビーチロックは潮間帯で形成されるため、膠結物質には海水起源の CaCO<sub>3</sub> が多く含まれ、AMS<sup>14</sup>C年代測定が可能

図 1

表 1

区別  
ひききりし  
rare

補正値

と根拠!

と推察した。

### (2) 試料の採取法

試料の採取法は小元ほか (2020, 2021, 2022a) などに記載した。すなわち試料は岩石ハンマーやタガネを使って掘り起こした中礫や大礫の下面の固結物質 (膠結物質) をタガネやステンレス製ブラシを使用して粉末を採取した。野外調査時に十分な試料を採取できなかった場合、中礫や大礫を裁断して持ち帰った。そして実験室で 5~10 cm の小片に裁断し、

ルツボに入れて付着している可能性のある Modern carbon を電気炉で焼却処分した。冷却後試料表面をステンレス製ブラシで磨耗して生じた粉末、あるいは直径 1~2 mm のステンレス製刃のついた小型の電動ドリルで試料表面を磨耗あるいは穿孔して生じた粉末を収集した。その総量は 50~200 mg である。試料の一例を図 2 に示す。図 2 には掘り起こした大礫の裏面と、大礫が埋まっていた跡がみられる。図の白色部分から試料を採取した。

### (3) 炭素含有量の確認

膠結物質が  $^{14}\text{C}$  年代測定可能な十分な炭素を含んでいるかどうかは肉眼による観察では判断できない。AMS で  $^{14}\text{C}$  年代測定を行うためには約 1 mg の炭素が必要である。このため ICP-MS により元素分析を行い、Ca 濃度を確認した。ビーチロックは潮間帯で形成されることに鑑み、また先学の報告から Ca の主要な化合物は  $\text{CaCO}_3$  であると推定した。 $\text{CaCO}_3$  の濃度から AMS  $^{14}\text{C}$  年代測定に十分な炭素濃度を有するかどうかの判定が可能である。試料調製資料にもとづけば、野外調査時に最低約 150 mg の膠結物質 (粉末) を採取すれば、AMS  $^{14}\text{C}$  年代測定、IRMS による  $\delta^{13}\text{C}$  の測定および ICP-MS による元素分析が可能である (投稿中)。

### 4. 試料調製法と分析機器

ICP-MS による元素分析では膠結物質約 50mg を計量してメノウ製の乳鉢に入れて粉碎し、その約 30 mg をテフロン製ボトルに入れて、硝酸、過塩素酸お

こ-400gの  
中礫・大  
礫?

高付水層の  
speleothem  
こ-400g  
ハナ岩  
取れ  
取れ!

図 2

こ-400g  
は、ありまわ

よびフッ化水素酸の順序で溶解し、試料に含まれる主要元素を同志社大学理工学部の ICP-MS (ICPM-8500, 島津製作所製) により測定した。

AMS<sup>14</sup>C 年代測定では膠結物質約 10~30 mg を計量して反応管に入れて排気し、100%のリン酸と反応させて CO<sub>2</sub> を発生させた。これを精製後に鉄粉触媒と水素を使用して石墨 (C) を生成した。CO<sub>2</sub> を発生させた時の圧力が基準値より低い場合は、試料を追加した。参考試料として採取した貝化石やサンゴ化石の試料調整法は小元ほか (2021) に記載した方法による。AMS による <sup>14</sup>C 年代測定には名古屋大学宇宙地球環境科学研究所の加速器質量分析計 (Tandetron 2 号機: HVEE Model-4130 AMS based on 3MV Tandetron Accelerator) を使用した。

膠結物質に含まれる炭素の起源は Stiver and Polach (1977) や Geyh and Schleicher (1990) が報告した試料の  $\delta^{13}\text{C}$  の数値から推定できる。このため本研究のはじめに宮崎県島浦島南部の日井の浜から採取した膠結物質の  $\delta^{13}\text{C}$  を名古屋大学宇宙地球環境科学研究所のデュアルインレット質量分析装置 (IRMS: Delta-V Advantage, Thermo Fisher Scientific Inc., Fenningen MAT-252) および産業技術総合研究所のデュアルインレット式質量分析計 (Delta-V Advantage, Thermo Fisher Scientific Inc.) で測定した (小元ほか, 2021)。

### Ⅲ 分析結果

#### 1. 元素分析結果

一連の研究で膠結物質について ICP-MS で行った元素分析結果 (wt%) を表 2 に示し、以下試料採取地点ごとに主要元素について記載する。

長崎県佐世保市東浜町南端の護岸堤直下から採取した膠結物質 4 試料は Ca 濃度 (wt%) が低く、最大でも 0.6%であった。このため微量の炭素でも年代測定可能な AMS でも <sup>14</sup>C 年代測定はできなかった。

# 大塚、豊、津、深、いり 酸化鉄の役割いわけ

もっとも多い元素は Al で、6.9%、次いで Fe が 4.9%、K が 1.5%、Na が 1.2% であった (小元ほか, 2022a)。

上記以外の 11 地点から採取した膠結物質 24 試料中でもっとも多い元素はすべての地点で Ca であった。すなわち宮崎県延岡市島浦島南部、日井の浜から採取した試料の Ca 濃度は 27.7% (小元ほか, 2021)、伊平屋島北部アッチャビシの 3 試料は 35.8%、また同南部テライバルの 3 試料の Ca 濃度は 31.9% であった (小元, 2024)。一方、慶良間諸島の座間味島北部、阿佐ユヒナ浜および同南部の阿真ビーチから採取した 2 試料の Ca 濃度はそれぞれ 25.2% および 29.7% であった。次に阿嘉島南部、前浜の陸側と海側のビーチロックから採取した 2 試料の Ca 濃度は 34.2% であった (小元ほか, 2025)。さらに慶留間島北部の阿嘉大橋の西部から採取した 2 試料の Ca 濃度は 31.3% を示し、同東部から採取した 2 試料の Ca 濃度は 24.7% であった (小元ほか, 2023a)。最後に渡嘉敷島東海岸のイシッピハラ北部から採取した 1 試料の Ca 濃度は 55.1% と高い濃度を示し、同島南部の阿波連ビーチから採取した試料の Ca 濃度は 34.0%、同島西部渡嘉志久ビーチ北部から採取した 1 試料の Ca 濃度は 39.6% であった (小元ほか, 2025)。全試料の第 2 位以下の元素は Mg が 0.60~3.96%、Al は 0.12~3.64% を占めた。

表 2

## 2. <sup>14</sup>C 年代測定結果

西南日本の 12 地点から採取した合計 45 試料について AMS<sup>14</sup>C 年代測定を行った結果を表 3 に示す。表 3 で cement と表示したのは膠結物質を示す。膠結物質の <sup>14</sup>C 年代と比較するため、同地点から採取した貝化石やサンゴ化石の <sup>14</sup>C 年代を加えた。試料採取地点ごとの膠結物質の <sup>14</sup>C 年代は次の通りである。

宮崎県延岡市島浦島南部の日井の浜から採取した 5 試料からは 3271±32 yr BP~2512±24 yr BP の <sup>14</sup>C 年代が得られた (小元ほか, 2021)。しかし長崎県佐世保市東浜町南端から採取した膠結物質 4 試料は上記のように炭酸カルシウム濃度が最大でも 0.6% と低

濃度のため、AMS<sup>14</sup>C年代測定は不可能であった。また膠結物質の中から採取した原地性のセミアサリ (*Claudiconcha japonica*)化石3試料(Ssb-1~3)は、  
 5 (NUTA2-27478), 102.1±0.3 pMC (NUTA2-27477), 102.5±0.3 pMC (NUTA2-27479)と  
 すべてModern<sup>2)</sup>を示した(小元ほか, 2022a)。  
 次に伊平屋島北西, アッチャビシ海岸の3試料からは3868±61 yr BP~3185±59 yr BP, 同南西部のテ  
 ライバル海岸の3試料からは4749±64 yr BP ~2216  
 10 ±62 yr BPまでの<sup>14</sup>C年代が得られた(小元, 2024)。  
 座間味島北部, ユヒナ浜の小岩山から採取した1  
 試料からは3268±62 yr BP, 近接する礫浜の二枚貝中  
 の膠結物質からは3764±62 yr BPが得られ, 二枚貝  
 化石自体は4666±64 yr BPを示した。また南部の阿  
 15 真ビーチの2試料からは1043±26 yr BPと1020±26  
 yr BPが得られた(小元ほか, 2025)。

阿嘉島南部の砂浜に発達する2列のビーチロック  
 のうち, 陸側から採取した試料からは1531±26 yr BP,  
 海側から採取した試料からは1336±26 yr BPが得ら  
 20 れた(小元ほか, 2025)。

慶留間島北部の阿嘉大橋西部から採取した試料か  
 らは1192±58 yr BPが得られ, また同東部の海側か  
 ら陸側へ5240±65 yr BP~2842±63 yr BPまでの<sup>14</sup>C  
 年代が得られた(小元ほか, 2023a)。阿嘉大橋(1998  
 25 年完成)の橋脚下には潮間帯に砂礫と共に膠結した  
 「シャックル」があった。

最後に渡嘉敷島東部のイシッピハラから採取した  
 試料からは3103±59 yr BP, その南約250 m地点の離  
 水ベンチから採取した膠結物質からは2700±64 yr  
 30 BPが得られた。一方, 渡嘉敷島西部の渡嘉志久ビー  
 チ北部の岩塊に固結した膠結物質は871±60 yr BPを  
 示した(小元ほか, 2025)。

### 3. δ<sup>13</sup>Cの測定結果

研究の初期に宮崎県島浦島南部日井の浜から採取  
 35 した試料のδ<sup>13</sup>Cを測定したところ, 2.0~2.9 ‰であ  
 った。この数値は海洋の炭酸塩や有機物のδ<sup>13</sup>Cの範

囲内 ( $\pm 4\%$ ) に入っている (小元ほか, 2021). また AMS<sup>14</sup>C年代測定 の試料調製時に膠結物質がリン酸に溶解してCO<sub>2</sub>を発生したため, その成分は炭酸塩 (CaCO<sub>3</sub>) 主体であると推定した.

5 小元 (2005, 2018) は九州以南30余島のビーチロックから採取した炭酸塩667試料の $\delta^{13}\text{C}$ をIsoPrimeで測定した. その結果,  $+6.5\sim-3.3\%$ の範囲に667試料 ( $\pm 3\sigma$ 内に99.7%)が入り, その中央値はStuiver and Polach (1977) が報告した $\delta^{13}\text{C}$ よりも+側に約1.5%  
10 偏倚していた. 試料別では, 貝化石の平均は2.51% (246試料), サンゴ化石が0.60% (221試料), 石灰砂岩が1.74% (200試料)であり, 全平均は1.68%であった. 膠結物質に近い試料は石灰砂岩である.

#### 15 IV 考察

##### 1. 膠結物質の構成物質

膠結物質は冒頭で述べたビーチロックの成因説から明らかのように海水(または地下水)起源のCaCO<sub>3</sub>  
20 に, 微化石等の海洋微生物やバクテリアと基盤岩起源の細粒堆積物で構成される. これらの物質が非石灰岩由来の大小様々な堆積物や貝化石やサンゴ化石を膠結している. 中井・中井 (2013) および伊藤ほか (2018) は, 宮古島と瀬底島の砂浜から採取した  
25 細粒堆積物について「海浜では, すべての地点で有孔虫殻が約50%を占める. 次いでサンゴ片と貝殻片が多く, 合わせて約30%を占める. ホモトレマ片(サンゴ片・貝殻片・固着性有孔虫 *Homotrema rubra* の破片)とウニ片はすべての地点で合わせて10%以下  
30 を占める.」と報告している. 採取した膠結物質にも上記の生物起源の細粒物質が含まれている. しかし砂浜海岸から採取した堆積物の量比は試料採取地点によって異なると言われている (中井・中井, 2013; 伊藤ほか, 2018). ビーチロックの下位には非石灰岩  
35 の基盤岩か, その細粒物質と海洋生物化石を含む砂礫層がみられた. またいずれの地点も背後の山地は

非石灰岩である。

岩石の一般的な成分は  $\text{SiO}_2$  が 30~70% を占め、もっとも多い (小野ほか, 1975)。しかし膠結物質に Si が含まれていた場合、ICP-MS の試料調製時に加えたフッ化水素酸により、 $\text{SiF}_4$  として飛散するため測定できない。ICP-MS で測定してもっとも多かった Ca 以外の元素は Si と推察される。

寺田・松田 (2000, 2001) は、温帯域のビーチロックは亜熱帯域とは異なりセメントは海水から晶出し、炭酸塩含有量は 46.5~68.6% であると報告した。炭酸塩は ICP-MS による分析結果から  $\text{CaCO}_3$  や  $\text{MgCO}_3$  と推測される。しかし、佐世保の試料を除き Ca 濃度が平均 33.6% に対して Mg は 1.79% であったため、炭酸塩の主体は  $\text{CaCO}_3$  と考察される。

## 2. 膠結物と膠結物質

地学事典で松井 (1966) は「水に溶けた鉱物成分が堆積物の粗粒物質の間に沈殿して各粒子を膠結する作用を膠結作用といい、この沈殿物を膠結物 (セメント) と呼ぶ」と記載している。また新版地学事典で公文 (1990) は膠結物や膠結作用について「セメントおよびセメント化作用」と記載し、後者について「間隙水などからの沈殿物が碎屑粒子のすき間を埋めることによって、岩石が硬く丈夫になる作用。続成作用の一過程で、膠結作用とも言う。その沈殿物がセメント。堆積直後に生ずる場合から、かなり後の段階で起こる場合まである。」と記載している。

本論でセメントを膠結物でなく膠結物質と呼称した理由は、松井の「水に溶けた鉱物成分」のみならず海洋性微化石や非石灰岩由来の細粒堆積物等を含んでいるためである。海水から沈殿した鉱物成分は ICP-MS による元素分析結果から、佐世保を除いた 11 地点でもっとも高濃度を示したのは Ca で、25.2~55.1% であり、 $\text{CaCO}_3$  に換算すれば 62.9~137.8% であった。座間味島北部のユヒナ浜の 62.9% を除けば、 $\text{CaCO}_3$  濃度は寺田・松田 (2001) が報告した炭酸塩濃度の 68.6% を上回る。137.8% の高濃度を示した膠結物質は基盤岩

由来の  $\text{Ca}$  や  $\text{Ca}$  を含む粘土鉱物が加わった可能性を示唆する。

### 3. 膠結物質の年代測定試料としての意義

ビーチロックの形成年代を正確に決定するためには初生堆積物間を充填したセメント ( $\text{CaCO}_3$ ) を  $^{14}\text{C}$  年代測定試料とするのが最良の方法である。しかし上記のようにその  $\text{CaCO}_3$  はきわめて微細な結晶であり、試料採取が困難である。本研究で採取した膠結物質は厳密に言えば地学事典に記載されている「膠結物」や「セメント」とは異なる。しかし高濃度の  $\text{Ca}$  (化合物は  $\text{CaCO}_3$ ) を含み、初生堆積物を膠結している。また  $\delta^{13}\text{C}$  は炭素の起源が海水であることを示す。したがって膠結物質は地学事典の「膠結物」とは厳密には言えないものの、海水起源の  $\text{CaCO}_3$  を含み、その  $^{14}\text{C}$  年代は死滅した貝化石やサンゴ化石の  $^{14}\text{C}$  年代よりはビーチロックの真の形成年代に近い年代を示すと考察する。

冒頭でビーチロックの成因説に淡水 (地下水) 説があることを述べた。このため野外調査は大潮前後の干潮時に行い、ビーチロックの下位から地下水が湧出していないかどうかを観察した。その結果、渡嘉敷島の渡嘉志久ビーチ南部の礫浜と阿波連ビーチ西部のビーチロックの下位から干潮時に地下水が湧出していることを確認した。両海岸とも背後は非石灰岩の山地が迫っており、耕作地はない。一方小河川が海に流入している地点は、島浦島南部の日井の浜と、渡嘉敷島阿波連ビーチ西部であり、生活用水が流入していたのは佐世保市の東浜町南部のビーチロックのみである。上記の環境条件から、地下水や地表水に含まれる  $\text{CaCO}_3$  が膠結物質になったとは考えがたく、地下水起源説は成立しないと考察する。

一方高濃度の  $\text{Ca}$  濃度を示した渡嘉敷島イシッピハラ北部の試料や渡嘉志久ビーチの岩塊から採取した膠結物質には非石灰岩に含まれる  $\text{Ca}$  や  $\text{Ca}$  を含む粘土鉱物が混入していた可能性が推察される。

これまでビーチロックの形成に関する考察では潮間帯の堆積物が膠結後に新たな  $\text{CaCO}_3$  は追加されな

かったこと、すなわち炭素は閉鎖系の環境にあったことを前提としてきた。この条件が成立しなければ、 $^{14}\text{C}$ 年代でビーチロックの形成年代を議論することはできない。すなわち潮間帯の堆積物が膠結後、新しい海洋微化石等は混入しなかったか、混入したとしても微量であり、 $^{14}\text{C}$ 年代の統計誤差範囲内(数10年)で死滅したと考える。

膠結物質の $^{14}\text{C}$ 年代は貝化石やサンゴ化石の死滅年代を示す $^{14}\text{C}$ 年代よりもビーチロックの真の形成年代に近い年代を示すと考察され、また化石に乏しい温帯域の礫岩質ビーチロックの形成年代を決定することが可能な意義は大きい。

#### 4. 非炭酸塩の膠結物質

佐世保市東浜町南端の礫岩質ビーチロックから採取した膠結物質のCa濃度は0.6%と低く、炭酸塩主体ではないことを示した(小元ほか, 2022a)。このため炭酸塩以外の膠結物質がどのような物質かについて文献調査を行ったので、その概要を記載する。小笠原ほか(2004)、吉富ほか(2004)、壇上・川崎(2013)、鈴木ほか(2018)らは、EPMA、SEMおよびEDXなどを使用してビーチロックのセメントの分析結果を報告した(表4)。すなわち石川県輪島市渋田町のビーチロックから採取したセメントは $\text{SiO}_2$ が50~60%を占め、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ が6~7%を占めた(壇上・川崎, 2013)。また曾々木海岸から採取したセメントは、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ が平均43.68%を占め、 $\text{SiO}_2$ が平均15.88%を占めた(小笠原ほか, 2004; 吉富ほか, 2004)。一方福井県おおい町赤礁崎から採取したセメントは、 $\text{SiO}_2$ が平均47.92%を占め、 $\text{MgO}$ は平均28.15%であった(鈴木ほか, 2018)。

表 4

沖縄県では寺田・松田(2001)が本部町備瀬崎ほか4地点から採取したセメントは低Mg方解石と高Mg方解石(Mgは10.7~16.5 mole%)からなると報告した。この結果はビーチロックの成因がTurner(2005)の海水と淡水の混合説(2)であることを示唆する。さらに壇上・川崎(2013)は名護市芥井出

から採取したセメントの  $\text{CaO}$  は 87~90%を占め、 $\text{SiO}_2$  が 5~8%であったと報告した。

上記の研究報告を要約すれば、非炭酸塩セメント（膠結物質）は、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{FeO}$  や  $\text{CaO}$  などである。このため佐世保のビーチロックは元素分析結果から、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  や  $\text{FeO}$  が膠結物質であった可能性が推量される。

## 5. ビーチロックの形成速度

ビーチロックの形成に要する年代について Wines (1959) は、「1 season, 1年以内」と述べている。また Frankel (1968) は「ビーチロックは数ヶ月から数年間で形成される」と報告している。小元ほか (2022b) は沖縄県宮古島東岸の吉野海岸において、4月から8月迄のわずか4か月間に海成段丘崖下の小流路に沿った露頭で、砂層が数層膠結している状態を確認した。そしてこの固結層は将来ビーチロックに成長する可能性が高いと推察した。上記の数値は文献上堆積物が膠結した速度としては最短時間を示す。しかしすべてのビーチロックがこのように短時間で膠結したとは断言できない。ただし膠結まで仮に数年間を要したとしても、 $^{14}\text{C}$  年代測定の統計誤差内（通常数十年以内）に十分入るため問題視する必要はない。

よってマイクロケスタ状を呈するビーチロックの同一列の堆積物から採取した膠結物質が、海洋微化石等を少量含んでいたとしても、その  $^{14}\text{C}$  年代と海水起源の  $\text{CaCO}_3$  の  $^{14}\text{C}$  年代差は統計誤差内に十分入ると推察される。マイクロケスタ状を示すビーチロックの陸側から汀線側への成長速度は、宮古島北部の大浦田原海岸における研究の場合、3~7cm/y である（小元ほか, 2017）。

これまで小元らが行ってきた一連の研究報告では、膠結物質と同年代が期待されたサンゴ片や貝殻の  $^{14}\text{C}$  年代は古い年代の場合が多い（表3）。その原因は貝殻やサンゴが死滅後に海岸に打ち上げられ、しばらく時間が経過後に膠結したためと考察される。

一方、膠結開始後に台風の暴浪や津波（小元，2014）などによってビーチロック表面の窪みや潮だまりなどの凹地に貝殻やサンゴ片が打ち上げられて膠結した場合、その $^{14}\text{C}$ 年代は膠結物質の $^{14}\text{C}$ 年代よりも新しい（小元ほか，2023 a, 2025）。

#### 6. ビーチロックの形成年代

$^{14}\text{C}$ 年代を暦年代に較正するためには  $\Delta R$  (Local Marine Reservoir Correction Value) の代入を要する。しかしながら上記いずれの調査地点の  $\Delta R$  も決定されていない。また  $\Delta R$  は較正対象の年代やビーチロックが発達している海域により異なる (Omoto *et al.*, 2010; Hirabayashi *et al.*, 2017; 小元ほか, 2018b, 2023b)。このため以下の考察は暦年代ではなく conventional  $^{14}\text{C}$  age で行う。

ビーチロックのマイクロケスタ状地形の特徴から、もっとも陸側の列が最古で、海側の列の形成年代が新しいと考察される。すなわち久米島の島尻浜（小元, 2004）、宮古島の大浦田原海岸（小元ほか, 2017）、阿嘉島の前浜（小元ほか, 2025）などのビーチロックの $^{14}\text{C}$ 年代の配列は上記の考察結果を支持する。一方、6,000~5,000 yr BP 頃の海水準上昇期に形成されたビーチロックや、沈降傾向にあった海岸で形成されたビーチロックは陸側よりも海側の列が古い形成年代を示す（例えば、小元ほか, 2023a, 2025 など）。なお波浪の侵食によりマイクロケスタ状の地形が不鮮明な場合や、礁池で水平に形成されたビーチロックの場合、もっとも古い年代をもってビーチロックの形成開始年代と推定し、もっとも新しい年代をもってビーチロックの形成終了年代と推定する。膠結物質の $^{14}\text{C}$ 年代がビーチロックの形成年代を示すと考えた場合、各地のビーチロックの形成年代は次の通りである。

まず宮崎県延岡市島浦島南部の日井の浜では、3270 yr BP 頃からビーチロックの形成がはじまり、3220 yr BP 頃、2920 yr BP 頃、2750 yr BP 頃と 2510 yr BP 頃に堆積物が膠結されてビーチロックが形成

された（小元ほか，2021）。

5 沖縄県北部の伊平屋島では，4750 yr BP 頃から南部のテライバルでビーチロックの形成がはじまり，3050 yr BP 頃と 2220 yr BP 頃に堆積物が膠結された。一方北部のアッチャビシでは 3870 yr BP 頃と 3185 yr BP 頃にビーチロックが形成された（小元，2024）。

10 慶良間諸島の座間味島では，北部の阿佐ユヒナ浜で 3760 yr BP 頃と 3270 yr BP 頃に堆積物が膠結され，南部の阿真ビーチでは 1040 yr BP から 1020 yr BP 頃にビーチロックが形成された。また阿嘉島南部では 2 列のビーチロックのうち，陸側のビーチロックは 1530 yr BP 頃に，また海側の礫岩質ビーチロックは 1340 yr BP 頃に形成された（小元ほか，2025）。

15 一方慶留間島北部では，海側から 5240 yr BP 頃<sup>3)</sup>，4660 yr BP 頃，2840 yr BP 頃および 1190 yr BP 頃にビーチロックが順次形成された。また沖合には現海面下 3 m までに 3 列の沈水ビーチロックが存在し，その形成年代は海水準が現在の海水準に到達する以前，すなわち約 5500 yr BP 以前に形成されたと推定した（小元ほか，2023a）。また 1998 年に開通した阿嘉大橋南部の橋脚下には，砂礫の中に膠結したシャ

20 ックルが発見された。この状態はごく最近でもビーチロックが形成可能な環境にあることを示している（小元ほか，2023a）。

25 最後に渡嘉敷島東岸では 3100 yr BP 頃および 2700 yr BP 頃に，西岸では 870 yr BP 頃にビーチロックが形成された（小元ほか，2025）。

30 なお佐世保市東浜町，島浦島南部の日井の浜，阿嘉島南部の前浜，慶留間島北部から採取した貝化石の  $^{14}\text{C}$  年代は Modern ( $101.6 \pm 0.3 \sim 102.5 \pm 0.3$  pMC) を示した。これは試料調製時の Modern carbon による汚染を示唆するものではなく，貝殻は最近死亡したことを示すと考察する。なお海水起源の  $\text{CaCO}_3$  が潮間帯の堆積物を膠結してミクロケスタ状のビーチ

35 ロックを形成する過程に関しては小元（2024）で詳細を報告した。

## 7. ビーチロックの形成年代の対比

これまで行った一連の研究で明らかになったビーチロックの  $^{14}\text{C}$  年代を地域別に整理して表 5 に示す。なお長崎県奈留島，脇岬，熊本県曲崎，甬島，大分県屋形島，鹿児島県種子島，屋久島などの礫岩質ビーチロックの形成年代についてはこれまで報告した（小元・伊藤，2006；小元ほか，2011；小元・伊藤，2016a, b）。しかし試料や試料調整法が本論の方法と異なり，また  $^{14}\text{C}$  測定値が  $\delta^{13}\text{C}$  により標準化されていない年代が含まれている。したがって本論で測定した試料と同一に扱うことはできないため考察の対象外とした。

表 5

西南日本で最古のビーチロックは，慶留間島北部の  $5240 \pm 65$  yr BP である。しかし，その沖合にある沈水ビーチロックは後氷期に海水準上昇中の  $6,000$  yr BP 前後に形成されたと推定され，上記の年代よりもさらに古いと推察される（小元ほか，2023a）。一方，地震性地殻変動により隆起したと推定される沖縄島中部の備瀬海岸には， $7,756 \pm 60$  yr BP (NU-1598) を示す南西諸島で最古と推定されるビーチロックが潮間帯に存在する（小元，2005，2007）。

ビーチロックの年代が相互に統計誤差の  $\pm 1\sigma$  以内に入る場合，形成年代を同時期と考えれば，伊平屋島と慶留間島では  $4749 \pm 64$  yr BP  $\sim$   $4661 \pm 63$  yr BP，伊平屋島と座間味島では  $3867 \pm 61$  yr BP  $\sim$   $3764 \pm 62$  yr BP，島浦島，伊平屋島，座間味島および渡嘉敷島では  $3271 \pm 32$  yr BP  $\sim$   $3050 \pm 60$  yr BP，島浦島と慶留間島では  $2917 \pm 24$  yr BP  $\sim$   $2842 \pm 63$  yr BP，島浦島と渡嘉敷島では  $2752 \pm 24$  yr BP  $\sim$   $2700 \pm 64$  yr BP 頃にそれぞれ同時にビーチロックが形成されたと推察される。

表 5 においてゴシック文字で示した年代は相互に近接した年代（ $\pm 1\sigma$  以内）にアルことを示し，複数地点で同時にビーチロックが形成された年代を示す。この中には数 100 km も離れた地点が存在する。このように離れた地点で同時にビーチロックが形成さ

れた要因として、高温な気候環境の存在が推定される。今後気候変動に関する研究により、ビーチロックの形成期と高温期間の存在の究明が期待される。

## 5 V 結論

これまで南西諸島のビーチロックの形成年代は、おもに貝化石やサンゴ化石の  $^{14}\text{C}$  年代によって決定されてきた。しかしその年代は海洋生物の死滅年代を示し、潮間帯の堆積物が膠結したビーチロックの形成年代とは乖離している。ビーチロックの真の形成年代は「潮間帯の堆積物が海水（または地下水）に含まれる  $\text{CaCO}_3$  の晶出や沈殿によって膠結された年代である」と考える。本研究では貝化石やサンゴ化石代に代わり、潮間帯の堆積物を膠結したと推定したセメント（膠結物質）を試料として、AMS $^{14}\text{C}$  年代測定によりビーチロックの形成年代を決定する新たな方法の確立を目指した。このため西南日本の非石灰岩の海岸に発達する合計 12 地点の海岸（図 1 および表 1）から膠結物質 28 試料を採取して ICP-MS による元素分析と、AMS $^{14}\text{C}$  年代測定を行った。その結果は次のように要約される。

1. ビーチロックを形成したセメントは、海水から晶出または沈殿した微細な  $\text{CaCO}_3$  の結晶のため年代測定試料としての採取は困難である。これに代わる試料として、ビーチロックの中礫や大礫の下部に固結していた細砂～シルト質な石灰質物質（膠結物質と呼称）を採取した。
2. 膠結物質を ICP-MS で分析した結果、Ca 濃度は長崎県佐世保市から採取した試料を除き 25.2 %～55.1 % ( $\text{CaCO}_3$  に換算して 63.0～137.8 %) であり（表 2）、AMS $^{14}\text{C}$  年代測定が可能であった。
3. 貝化石やサンゴ化石の  $^{14}\text{C}$  年代は単に死滅年代を示し、ビーチロックの真の形成年代を示していない。このため、膠結物質に含まれる  $\text{CaCO}_3$  の  $^{14}\text{C}$  年代の方がビーチロックの真の形成年代に近い年代を示す

と考察する。

4. 膠結物質の  $^{14}\text{C}$  年代から、西南日本では  $5240 \pm 65$  yr BP ~ Modern (現世) まで 14 回のビーチロックの形成時期があり、また異なる地点においてビーチ
- 5 ロックが同時に形成された年代が存在する (表 5)。しかしその地点が常に同じ組み合わせとは限らない。
5. これまで行ってきた一連の研究方法は、化石に乏しい温帯地方の礫岩質ビーチロックの形成年代を決定する方法として有効である。また元素分析は膠結
- 10 物質の元素構成を知る上で不可欠な方法であり、同時に Ca 濃度から AMS  $^{14}\text{C}$  年代測定の可否を決定できる。
6. 非炭酸塩の鉱物組成を特定するため、XRF, XRD, SEM-EDS などの手法による元素や鉱物の鑑定法の
- 15 併用が望まれる。
7. 膠結物質の  $^{14}\text{C}$  年代は、貝化石やサンゴ化石の  $^{14}\text{C}$  年代より真のビーチロックの形成年代に近い年代を示すと考察されるため、膠結物質を試料とした意義は高い。

20

本研究は 2018 (平成 30) 年から 2020 (令和 2) 年にかけて名古屋大学 AMS 共同利用研究「ビーチロック試料の正確な膠結年代決定法(研究代表者 小元久仁夫)」により行われた研究成果を総括したものである。本研究の遂行にあたり、環境省慶良間自然保護官事務所の松本 晃国立公園主席官(当時)および前山佳子自然保護官補佐、中村俊夫名古屋大学名誉教授、名古屋大学宇宙地球環境科学研究所の北川浩之教授、南 雅代教授および池田晃子主任技師、同志社大学理工学部の横尾頼子先生、日本大学文理学部の藁谷哲也教授、阿嘉島「さんごゆんたく館」の村石健一氏(当時)、伊平屋村教育委員会の嘉手納知子主任、神奈川県立生命の星・地球博物館の松島義章博士(故人)、英文要旨の校閲では HGSG Limited, Managing Director, Dr. John Hoyes CPhys にお世話になった。以上お世話になった方々と便宜をはかって

25

30

35

Discussion

いただいた諸機関に謝意を表す。なお本論の一部は日本地理学会発表要旨集 No.104 に掲載され、また本論文の骨子は 2024 年度東北地理学会春季学術大会において発表した。

5

### 注

- 1) 電子顕微鏡下では aragonite needles (針状アラレ石) および calcite (方解石) と鑑定されている。長さは 5~10  $\mu\text{m}$ , 太さは 1  $\mu\text{m}$  程度で, 粒子の表面を覆っている場合でも 5~10  $\mu\text{m}$  の厚さしかない。粒子間の空隙は方解石が充填している (Moore, 1973)。
- 2) 試料の計数率が標準試料 (NIST) の計数率の  $\pm 2\sigma$  以内に入る場合「Modern」と表記する (Stuiver and Polach, 1977)。その割合を pMC (percent Modern Carbon) で示す場合がある。

10

15

### 文 献

20

伊藤真裕子・森 愛・本郷宇軌・浅海竜司・宮入陽介・横山祐典・藤田和彦 2018. 星砂の摩耗度と放射性炭素年代にもとづく瀬底島海浜堆積物の生産年代と運搬・堆積過程. 日本サンゴ礁学会誌 20: 1-20.

25

小笠原 洋・吉富健一・次重克敏 2004. 能登半島, 曾々木海岸のビーチロック. 日本応用地質学会中国四国支部平成 16 年度研究発表会要旨 31-34.

30

小野千恵子・丹治耕吉・安藤直行・片田正人 1975. 岩石の平均的化学成分とその図示. 地質調査所月報 26: 445-453.

35

小元久仁夫 2004. 久米島, 奥武島およびハテノ浜から採取したビーチロックの  $^{14}\text{C}$  年代と安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ). 日本大学文理学部自然科学研究所「研究紀要」39: 15-31.

小元久仁夫 2005. 南西諸島から採取したビーチロックの  $^{14}\text{C}$  年代と安定同位体比 ( $\delta^{13}\text{C}$ ) —測定資料

一トデトの全数は  
読み取れず。控出し。

- とその分析一. 日本大学文理学部自然科学研究所「研究紀要」40:1-27.
- 小元久仁夫・伊藤佑始 2006. 長崎県天然記念物『脇岬のビーチロック』の  $^{14}\text{C}$  年代と地形発達. 日本地理学会発表要旨集 70: 35.
- 5 小元久仁夫 2007. 南西諸島で最古のビーチロックとその意義. 日本大学文理学部自然科学研究所「研究紀要」42: 1-14.
- 小元久仁夫・横山勝三・千田 昇 2011. 九州と周辺の島々から採取したビーチロック試料の較正年代. 季刊地理 63:112-113.
- 10 小元久仁夫 2014. 宮古列島から採取したビーチロック試料の較正年代と津波の年代. 地理誌叢 56:11-24.
- 15 小元久仁夫・伊藤佑始 2016a. 長崎半島脇岬のビーチロックの特徴と較正年代. 地学雑誌 125:409-419.
- 小元久仁夫・伊藤佑始 2016b. 長崎県脇岬のビーチロックの形成に関する 1 考察. 地理誌叢 58: 1-10.
- 小元久仁夫・小俣雅志・市川清士 2017. 宮古島北部, 大浦田原海岸のビーチロックの形成年代と形成速度. 季刊地理学 68: 302-312.
- 20 小元久仁夫 2018. 南西諸島から採取した炭酸塩試料の  $^{14}\text{C}$  年代の補正法. 地理誌叢 59(2): 17-30.
- 小元久仁夫・藁谷哲也・塩見昌司・南 雅代 2018a. ビーチロック試料の正確な膠結年代決定法の開発. 名古屋大学宇宙地球環境研究所年代測定研究 2: 7-11.
- 25 小元久仁夫・中村俊夫・松島義章 2018b. 沖縄県伊江島の海洋リザーバー効果 ( $\Delta R$ ) とその意義. 季刊地理学 70:17-26.
- 30 小元久仁夫 (2019): 南西諸島宮古島南東のマイバマ東部および吉野海岸に打ち上げられたサンゴ岩塊の  $^{14}\text{C}$  年代. 季刊地理学 71:82-88.
- 小元久仁夫・藁谷哲也・塩見昌司・大八木英夫・横尾頼子・池田晃子 2020. ビーチロック試料の正確な膠結年代の決定方法 (2). 名古屋大学宇宙地球環境

- 研究所年代測定報告 4:9-15.
- 小元久仁夫・藁谷哲也・池田晃子・横尾頼子・塩見昌司 2021. 宮崎県北部, 島浦島南部の日井の浜に発達する礫岩質ビーチロックの  $^{14}\text{C}$  年代. 季刊地理学 5 73:1-10.
- 小元久仁夫・池田晃子・横尾頼子 2022a. 長崎県佐世保市東浜町の礫岩質ビーチロックから採取した試料の  $^{14}\text{C}$  年代測定結果. 地学雑誌 131: 473-478.
- 小元久仁夫・藁谷哲也・池田晃子・大八木英夫 10 2022b. 宮古島吉野海岸の固結砂層と湧水の分析結果. 季刊地理学 74: 68-77.
- 小元久仁夫・池田晃子・横尾頼子 2023a. 沖縄島西方, 慶留間島の礫岩質ビーチロックから採取した試料の  $^{14}\text{C}$  年代. 地学雑誌 132: 247-256.
- 15 小元久仁夫・北川 浩之・平河内 毅 2023b. 北海道オホーツク海岸の  $\Delta R$  の検討. 季刊地理学 75: 78-85.
- 小元久仁夫 2023. 九州および南西諸島の礫岩質ビーチロックから採取した試料の  $^{14}\text{C}$  年代. 日本地理学会発表要旨集 No. 104: 23.
- 20 小元久仁夫 2024. 沖縄島北方, 伊平屋島礫岩質ビーチロックの膠結物質の  $^{14}\text{C}$  年代と化学組成. 季刊地理学 76: 79-90.
- 小元久仁夫・横尾頼子・池田晃子 2025. 慶良間諸島座間味島, 阿嘉島および渡嘉敷島のビーチロックから採取した膠結物質の元素濃度と  $^{14}\text{C}$  年代. 地学雑誌 134: 539-551.
- 25 公文富士夫 1990. セメント; セメント化作用. 新版地学事典(地学団体研究会-編), 平凡社, 1443 p.
- 菅沼 健 1979. 房総半島南部・館山付近のビーチロック. 東北地理. 31: 70.
- 30 鈴木茂之・東 洋一・出山康代・湯川弘一・臼井まゆみ 2018. 福井県おおい町赤礁崎で見出された非石灰質ビーチロック. *Okayama University Earth Science Reports* 25: 1-5.
- 35 武永健一郎 1965. Beach Rock の成因について. 地理学評論 38: 739-755.

- 橋 行一・坂口和則 1971. 五島列島の縄文土器を含む  
ビーチロックの年代—五島の beach rock について（そ  
の2）. 第四紀研究 10 : 54-59.
- 田中好國 1983. ビーチロックの形成に関する一考察.  
5 地理科学 38 : 91-101.
- 田中好國 1986. 日本列島におけるビーチロックの分  
布と年代. 兵庫地理 31 : 16-30.
- 田中好國 2018. 日本の温帯性ビーチロックの分布と  
特徴. 愛媛地理 25 : 37-51.
- 10 田中好國 2019. ビーチロックの形成機構に関する研  
究—その続成環境, セメント物質, 形成モデルについ  
て—. 兵庫地理 64 : 15-34.
- 壇上 堯・川崎 了 2013. 固結物質に着目したビーチ  
ロックの形成メカニズムに関する考察. *Journal of*  
15 *Mining Materials Processing Institute of Japan* 129:  
520-528.
- 寺田 縁・松田博貴 2000. 温帯域でみられるビーチ  
ロックの産状とその特徴. 日本地質学会講演要旨 第  
107年学術大会（2000 松江）, セッション IDO-147  
20 : 84.
- 寺田 縁・松田博貴 2001. 温帯域と亜熱帯域でみら  
れるビーチロックの比較とその成因. 堆積学研究  
53: 96-98.
- 中井 均・中井睦美 2013. 沖縄県宮古島の海岸砂の  
25 特徴とその起源. 都留文科大学研究紀要 77: 1-14.
- 堀 信行・堀内公子・荒木 匡・寺井 稔 1972.  
Beachrockの発達とその成因について—与論島を例  
として—. 地理予稿集 2 : 16-17.
- 堀 信行・荒木 匡・寺井 稔・堀内公子 1973. ビ  
30 ーチロックの形成機構とその地形学的意義. 地理予  
稿集 5 : 51-52.
- 松井 愈 1966. 膠結物. 地学事典（地団研地学事典  
編集員会編）, 平凡社, 350 p.
- 吉富健一・次重克敏・小笠原 洋 2004. 能登半島, 輪  
35 島市曾々木海岸のビーチロック（演旨）（ポスター  
セッション）. 日本地質学会第 111 年学術大会講演

- 要旨 : 302.
- 米谷 静二 1963. 奄美大島本島におけるビーチロックの予察的研究. 地理学評論 36 : 519-527.
- Frankel, E. 1968. Rate of formation of beachrock. *Earth and Planetary Science Letters* 4 : 439-440.
- 5 Geyh, M.A. and Schleicher, H. (1990) *Absolute Age Determination Physical and Chemical Dating Methods and Their Application*. Springer-Verlag 166.
- Hirabayashi, S., Yokoyama, Y., Suzuki, A., Miyairi, Y. and Aze, T. 2017. Short-term fluctuation in regional radiocarbon reservoir age recorded in coral skeletons from the Ryukyu Islands in the northwestern Pacific. *Journal of Quaternary Science* 32: 1-6.
- 10 Kawana, T. 1981. Radiocarbon ages of the beach rocks on Okinawa, Miyako and Ishigaki Islands, The Ryukyus, Japan. 琉球大学教育学部紀要, 第 25 集第 1 部 245-249.
- Moore, C.H.Jr. 1973. Intertidal carbonate cementation Grand Cayman, West Indies. *Journal of Sedimentary and Petrology* 43: 591-602.
- 20 Omoto, K., Takeishi, K., Nishida, S., and Fukui, J. 2010. Calibrated radiocarbon ages of Jomon sites, NE Japan and their significance. In *Proceedings of the 20th International Radiocarbon Conference (May 31-June 5, 2009) Kona, Hawaii, U.S.A.* *Radiocarbon* 52 : 534-548.
- 25 Russel, R.J. 1962. Origin of beach rock. *Zeitschrift für Geomorphologie* 6: 1-16.
- 小元久仁夫\*・横山勝三・千田 昇 2011. 九州と周辺の島々から採取したビーチロック試料の校正年代. 季刊地理学 63 : 112-113.
- 30 Scoffin, T.P. and Stoddart, D.R. 1983. 14. Beachrock and intertidal cements. in *Chemical Sediments and Geomorphology : Precipitates and Residua in the Nearsurface Environment* edited by Goudie, A.S. and Kenneth Pye, Academic Press 401-425.
- 35 Stoddart, D.R. and Cann, J.R. 1965. Nature and origin

of beachrock. *Journal of Sedimentary and Petrology* 35: 243-247.

Stuiver, M. and Polach, H.A. 1977. Discussion reporting of  $^{14}\text{C}$  data. *Radiocarbon* 19: 355-363.

5 Turner, R.J. 2005. Beachrock. in *Encyclopedia of Coastal Science* edited by Schwartz, M.L., Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. 183-186.

Vousdoukas, M., Velegarakis, A.F. and Karambas, T. 2005. Beachrock formation, phenomenology and impacts: An example from Vatera beach, Lesvos Island, Greece. *Proceedings of the 9th International Conference on Environmental Science and Technology*. Rhodes Island, Greece 1-3 September 2005. A-1611-1616.

15 Wiens, H. J. 1959. Atoll environment and morphology. *Annals of the American Association of Geographers* 49: 31-54.

## Cemented Materials Determined Formation Age of Beachrocks

OMOTO Kunio

5 (Formerly Graduate School of Science and Technology, and  
College of Humanities and Sciences, Nihon University, retired.)

The formation age of beachrock has been determined  
by  $^{14}\text{C}$  age of fossil shell or coral sample, however, the  
10 age only indicates extinction age of itself. Therefore,  
the age shows different age to the true formation age of  
each beachrock. The formation age of beachrock should  
be determined by the cement ( $\text{CaCO}_3$ ) originated mainly  
from sea water, however, it is very small aragonite  
15 needles and calcite, therefore it is impossible to collect  
for radiocarbon dating. Omoto collected fine-grained  
calcareous deposits cementing the bottom of cobbles  
and boulders, instead of the shell and coral samples. He  
collected 28 samples from the 12 non-limestone coasts  
20 of the southwestern part of Japan and elemental analysis  
and  $^{14}\text{C}$  dating were conducted with ICP-MS and AMS.  
The result of the former showed high Ca concentrations  
between 25.2 and 55.1wt% that is equivalent to 63.0~  
137.8% of  $\text{CaCO}_3$ . While the latter showed formation  
25 ages of beachrocks at 14 different periods between 5240  
yr BP and present time. The ICP-MS analysis and  
AMS $^{14}\text{C}$  dating have achieved results significant  
enough to indicate more accurate formation ages of  
beachrocks, theoretically, than the ages of fossil shell  
30 and coral samples.

**Keywords:** beachrock, cemented materials, AMS  
(Accelerator Mass Spectrometry)  $^{14}\text{C}$  dating, elemental  
analysis, southwest of Japan

35

## 英文要旨に対応する日本語要旨

ビーチロックの形成年代は貝化石やサンゴ化石の<sup>14</sup>C年代によって決定されてきた。しかしその年代は生物の死滅年代を示すのみであり、正確なビーチロックの形成年代を示していない。ビーチロックは海水起源のセメント(CaCO<sub>3</sub>)によって膠結されて形成されるため、これを試料として<sup>14</sup>C年代を行えば正確なビーチロックの形成年代が得られる。しかしながらセメント、すなわちCaCO<sub>3</sub>は微細な針状のアラレ石や方解石の結晶であり、採取は困難である。そこで小元はセメントの代わりにビーチロックの中礫や大礫の下部から膠結している細粒～シルト質な石灰質な堆積物(膠結物質)を採取した。南西日本の非石灰岩で構成される12の海岸から合計24試料を採取し、ICP-MSによる元素分析とAMS<sup>14</sup>C年代測定を行った。元素分析の結果、膠結物質のCa含有量は25.2~55.1wt%(CaCO<sub>3</sub>に換算して63.0~137.8%)を示した。一方礫岩質ビーチロックは5240 yr BPから現在まで14回の形成時期があったことが明らかになった。膠結物質についてICP-MSによる元素分析を行うことにより、その構成元素がCaを含むことが明らかになり、またAMS<sup>14</sup>C年代測定によって貝化石やサンゴ化石の<sup>14</sup>C年代よりも正確なビーチロックの形成年代を決定することが可能になった。

キーワード: 礫岩質ビーチロック, 膠結物質, AMS(加速器質量分析計), <sup>14</sup>C年代測定, 元素分析, 南西日本

30

## 図表の説明文

図 1 試料採取地点を示す図

左図は九州の試料採取地点を示し, Na は奈留島, Sa は  
5 佐世保, Wk は脇岬, Mg は曲崎, Shi は島浦島を示す.  
中図は慶良間諸島の試料採取地点を示し, Z は座間味  
島, A は阿嘉島, G は慶留間島, T は渡嘉敷島を示す.  
右図は伊平屋島の試料採取地点を示し, A はアッチャ  
ビシ, B はテライバルを示す.

10 Fig. 1 Maps indicate sampling sites

Left map shows sampling sites of Kyushu Island. Na :  
Narushima Island, Sa : Sasebo city, Wk : Wakimisaki, Mg :  
Magarizaki, Shi : Shimaura Island, while the middle map  
shows sampling sites of Kerama Islands, Z : Zamami Island,  
15 A : Aka Island, G : Geruma Island, T : Tokashiki Island. Right  
map shows sampling sites of Iheya Island where  
A:Acchabishi and B:Teraibaru.

図 2 慶留間島北東部アカムキ西で掘り起こした大礫の  
裏面とその跡

20 試料は大礫下部の白色部分から採取した。(2020年10月  
15日撮影)

Fig.2 Photo shows a boulder and its hollow dogged out at  
west of Akamuki, Geruma Island. Sample was collected from  
lower part of the boulder shown in white. (Photo was taken  
25 on October 15, 2020)

表 1 西南日本の礫岩質ビーチロックの特徴

Table 1 Characteristics of the beachrocks developed at  
southwest of Japan

表 2 西南日本の礫岩質ビーチロックから採取した膠結  
30 物質の元素濃度

\*<sup>1</sup> 小元ほか(2022a), \*<sup>2</sup> 小元ほか(2021), \*<sup>3</sup> 小元(2024),  
\*<sup>4</sup> 小元ほか(2025)

Table 2 Concentration of cemented materials collected  
from conglomerate beachrocks develop at southwest of  
35 Japan

\*<sup>1</sup> Omoto et al.(2022a), \*<sup>2</sup> Omoto et al.(2021), \*<sup>3</sup> Omoto

(2024), \*<sup>4</sup> Omoto et al.(2025)

表 3 西南日本の礫岩質ビーチロックから採取した試料の<sup>14</sup>C年代

\*<sup>1</sup> 小元ほか(2021), \*<sup>2</sup> 小元(2024), \*<sup>3</sup> 小元ほか(2025),

5 \*<sup>4</sup> 小元ほか(2023a), \*<sup>5</sup> pMC

Table 3 <sup>14</sup>C ages of samples collected from conglomerate beachrocks develop at southwest of Japan

\*<sup>1</sup> Omoto et al. (2021), \*<sup>2</sup> Omoto (2024), \*<sup>3</sup> Omoto et al. (2025), \*<sup>4</sup> Omoto et al. (2023a), \*<sup>5</sup> pMC

10 表 4 礫岩質ビーチロックのセメントの主成分

出典:小笠原ほか(2004),小元ほか(2021,2022a,2023a),小元(2024),小元ほか(2025),鈴木ほか(2018),壇上・川崎(2013),寺田・松田(2001)による.

15 Table 4 Main component of the cements collected from conglomerate beachrocks

Bibliographies : Ogasawara et al.(2004), Omoto et al.(2021, 2022a, 2023a), Omoto (2024), Omoto et al. (2025), Suzuki et al. (2018), Danjo and Kawasaki (2013), Terada and Matsuda (2001).

20 表 5 西南日本の礫岩質ビーチロックの形成年代の対比ゴシックで示した年代はほかの地点と形成年代が同時でアルことを示し,それ以外は単独の形成年代を示す.

Table 5 Correlation of formation ages of conglomerate beachrocks develop at southwest of Japan

25 Gothic figures indicate same formation ages with other beachrocks, while the others indicate individual formation age.

1900

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

...

全体同の化成分  
必要なのよ.

小元論文図表

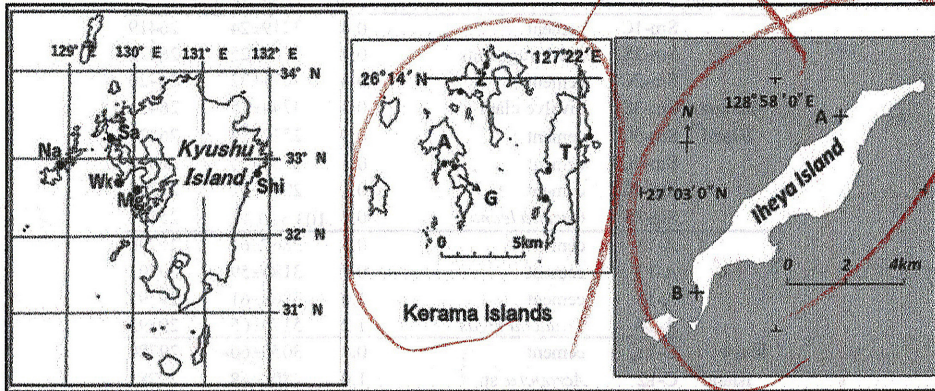


図1

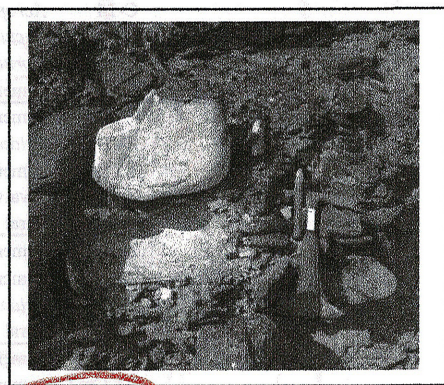
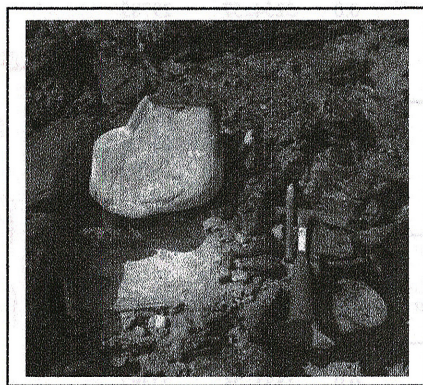


図2

表1

分布地	北緯 ° / ′	東経 ° / ′	長さ m	幅 m	傾き °	分布標高 m. s. l.	<sup>14</sup> C年代	測定試料数	膠結物質	貝化石	サンゴ化石
佐世保市東浜町の南端	33 07 55	129 44 27	60	6~15	5	-0.7~+0.3	3	3	0		
延岡市島浦島日井の浜	32 39 26	131 49 22	100	50	3	-0.7~+1.2	5	3	0		
伊平屋島アッチャビシ	27 04 35	127 59 19	300	6~19	3	+0.3~+1.2	3	1	0		
テライバル	27 00 27	127 56 15	110	10~20	5	+0.3~+1.2	3	1	3		
座間味島阿佐ユヒナ浜	26 14 29	127 18 27	—	—	—	+0.9~+2.1	2	2	1		
阿真ビーチ	26 13 39	127 17 23	100	6~10	8	-1.5~+0.8	2	1	1		
阿嘉島前浜	26 11 22	127 16 52	300	2~10	5	-1.2~+2.1	2	2	2		
慶留間島アカムキ西	26 11 10	127 17 06	100	30	—	0~-1.0	1	1	0		
アカムキ東	26 11 14	127 17 12	200	60	5	0~-3.9	3	1	0		
渡嘉敷島イシッピハラ北	26 12 20	127 22 25	40	15	—	-0.8	2	0	0		
渡嘉志久ビーチ	26 11 17	127 20 51	20	3~5	—	0~-1.0	1	0	0		
阿波連ビーチ西	26 10 13	127 20 32	80	14~17	7	-1.0~+1.8	0	0	1		

表2

試料採取地点	試料数	Al	P	Ti	Mn	Fe	Na	Mg	K	Ca	CaCO <sub>3</sub> (%)
佐世保市東浜町の南端 <sup>#1</sup>	4	6.95	0.040	0.450	0.495	4.90	1.22	0.75	1.57	0.57 <sup>#6</sup>	1.425 <sup>#6</sup>
延岡市島浦島日井の浜 <sup>#2</sup>	1	0.15	0.057	0.001	0.002	0.12	0.19	2.35	0.10	27.7	69.2
伊平屋島アッチャビシ <sup>#3</sup>	3	0.28	0.079	0.020	0.019	0.57	0.56	1.60	0.06	35.8	89.5
テライバル <sup>#3</sup>	3	0.93	0.099	0.047	0.028	0.65	0.49	1.63	0.27	31.9	79.8
座間味島阿佐ユヒナ浜 <sup>#4</sup>	2	1.12	0.077	0.075	0.007	0.48	1.96	1.75	0.80	25.2	62.9
阿真ビーチ <sup>#4</sup>	2	1.94	0.026	0.094	0.005	0.68	0.61	0.77	0.65	29.7	74.3
阿嘉島前浜 <sup>#4</sup>	2	0.49	0.018	0.024	0.003	0.18	0.77	1.33	0.17	34.2	85.5
慶留間島アカムキ西 <sup>#5</sup>	2	2.38	0.078	0.158	0.027	1.43	1.12	1.96	0.16	31.3	78.1
アカムキ東 <sup>#5</sup>	2	3.64	0.121	0.270	0.080	3.09	0.90	3.96	0.25	24.7	61.6
渡嘉敷島イシッピハラ北 <sup>#4</sup>	1	0.62	0.097	0.025	0.003	0.29	1.41	1.98	0.15	55.1	137.8
イシッピハラ南 <sup>#4</sup>	1	0.71	0.112	0.036	0.017	0.41	0.30	2.75	0.12	34.0	85.0
渡嘉志久ビーチ北 <sup>#4</sup>	1	0.52	0.039	0.053	0.001	0.29	0.52	0.60	0.09	39.6	99.0
合計または平均 <sup>#7</sup>	24	1.64	0.070	0.104	0.057	1.09	0.84	1.79	0.36	33.6	83.9

単位は...  
...  
...

... = ?

... ( ) は必要なのよ.

表3

Name of Island	Sample Code No.	Material	Elev. m	<sup>14</sup> C age yr BP (NUTA2-)	Lab. Code
Shimaura Island <sup>1</sup>	Sm-1C	cement	0.4	3219±24	26419
	Sm-1S	shell fragments	0.4	3791±25	26423
	Sm-2C	cement	0.4	3271±32	26420
	Sm-3S	bivalve clam	0.3	3744±25	26421
	Sm-3C	cement	0.3	2512±24	26422
	Sm-4C1	cement	0.1	2752±24	26426
	Sm-4C2	cement	0.1	2917±22	25294
	Sm-4S	<i>Cardita leana</i>	0.1	103.5±0.3 <sup>ns</sup>	25291
Iheya Island <sup>2</sup>	A-11	cement	0.3	3867±61	29790
	A-12	cement	0.7	3185±59	29791
	A-13	cement	1.0	3868±61	29792
	A-14	<i>Tridacna gigas</i>	1.2	5170±65	29793
	C-11	cement	0.8	3050±60	29780
	C-12	<i>Acropora</i> sp	1.0	4808±68	29781
	C-13	cement	0.7	2216±62	29786
	C-14	<i>Acropora</i> sp	0.0	5254±57	29785
	C-15	<i>Tectus nhoticus</i>	0.0	4814±64	29784
Zamami Island <sup>3</sup>	ZYB-1	cement	1.9	3268±62	29798
	ZYB-2	<i>Tridacna crocea</i>	2.0	3503±60	29803
	ZYB-3	cement	1.9	3764±62	29799
	ZYB-4	bivalvia	1.9	4666±64	29804
	ZYB-5	coral	1.9	4566±67	29805
Zamami Island <sup>3</sup>	Zm-1	cement (L surface)	-0.3	1020±26	27480
	Zm-2	cement (S surface)	-0.3	1043±26	27483
	Zm-3	<i>Tridacna squamosa</i>	-0.3	1601±26	27484
	Zm-4	coral	-0.3	1494±26	27485
Aka Island <sup>3</sup>	AKCm1	cement	-1.1	1336±26	27486
	AKCm2	cement	-0.9	1531±26	27487
	AKSh1	<i>Strigatella paupercula</i>	-1.1	102.5±0.3 <sup>s</sup>	27488
	AKCr1	<i>Acropora</i> sp.	-1.1	886±25	27489
Aka Island <sup>3</sup>	AKSh2	shell fragments	-0.9	1206±26	27492
	AKCr2	<i>Porites</i> sp.	-0.9	1064±26	27476
	WB2-C	cement	-0.1	1192±58	29774
	WB2-S	Shell	-0.1	108.0±0.1 <sup>s</sup>	29773
Gerume Island <sup>4</sup>	EB1-S	<i>Strombus luhuanus</i>	-0.5	105.3±0.2 <sup>s</sup>	29806
	EB1-C	cement	-0.5	2842±63	29801
	EB2-C	cement	-0.1	4661±63	29800
	EB3-S	<i>Strombus luhuanus</i>	-0.8	104.6±0.2 <sup>s</sup>	29807
Tokashiki Island <sup>3</sup>	EB4-C	cement	-1.0	5240±65	29802
	TICm1	cement	-0.4	3103±59	29776
	TICm2	cement	0.8	2700±64	29777
	TICm3	cement	-1.0	871±60	29779
TICr1	<i>Porites</i> sp.	-0.7	4669±72	29778	

5

10

28.

SP.

08.

coral &  
Porites sp.

同列は  
1002.1.1

0.17-4-9018 410.11.10.?

19

表 4

7/11/24

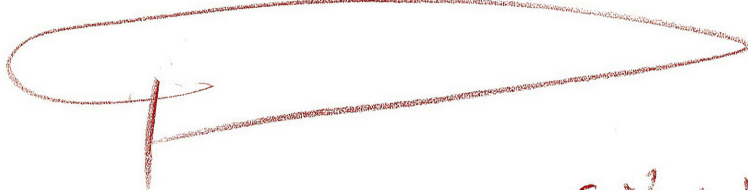
調査地域	分析方法	分析結果 (主要元素と含有率wt%)	文献
石川県輪島市渋田町	SEMおよびEDX	SiO <sub>2</sub> (50~60%), Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (6~7%)	壇上・川崎 (2013)
曾々木海岸	EPMA	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (平均43.68%), SiO <sub>2</sub> (平均15.88%)	小笠原ほか (2004)
福井県おおい町赤碓崎	EPMA	SiO <sub>2</sub> (48.66~47.40% : 平均47.92%) MgO (29.30~27.76 : 平均28.15%)	鈴木ほか (2018)
長崎県野母崎脇岬ほか5地点	不明	主として高Mg方解石 (Mg = 10.7~16.5 mole%)	寺田・松田 (2001)
長崎県佐世保市東浜町	ICP-MS	Al (6.9%), Fe (4.9%), Ca (0.6%)	小元ほか (2022a)
宮崎県延岡市島浦島日井の浜	ICP-MS	Ca (27.7%), Mg (2.3%)	小元ほか (2021)
沖縄県伊平屋島アッチャピシ	ICP-MS	Ca (35.8%), Mg (1.6%)	小元ほか (2024)
テライバル	ICP-MS	Ca (31.9%), Mg (1.6%)	同上
沖縄県本部町備瀬崎ほか4地点	不明	低Mg方解石と高Mg方解石 (Mg = 10.7~16.5 mole%)	寺田・松田 (2001)
沖縄県名護市済井出	SEMおよびEDX	CaO(87~90%), SiO <sub>2</sub> (8~5%)	壇上・川崎 (2013)
沖縄県座間味島阿佐ユヒナ浜	ICP-MS	Ca (25.2%), Na (1.9)	小元ほか (2025)
阿真ビーチ	ICP-MS	Ca (29.7%), Al (1.9%)	同上
阿嘉島前浜	ICP-MS	Ca (34.2%), Mg (1.3%)	同上
慶留間島アカムキ西	ICP-MS	Ca (31.3%), Al (2.3%), Mg (1.9%)	小元ほか (2023a)
アカムキ東	ICP-MS	Ca (24.7%), Mg (3.9%), Al (3.6%)	同上
渡嘉敷島イシッピハラ北	ICP-MS	Ca (55.1%), Mg (1.9%), Na 1.4%)	小元ほか (2025)
同上南方約200m地点	ICP-MS	Ca (34.0%), Mg (2.7%)	同上
渡嘉志久ビーチ	ICP-MS	Ca (39.6%), Mg (0.6%)	同上

9/1/2021

表5

宮崎県 島浦島 小元ほか 2021	沖縄県 伊平屋島 小元 2024	沖縄県 座間味島 小元ほか 2025	沖縄県 阿嘉島 小元ほか 2025	沖縄県 慶留間島 小元ほか 2023a	沖縄県 渡嘉敷島 小元ほか 2025	全形成 年代 yr BP 5240±65
	4749±64			4661±63		4749±64~ 4661±63
	3868±61					3868±61~
	3867±61	3764±62				3764±62
3271±32		3268±62				3271±32~
3219±24	3185±59				3103±59	
	3050±60					3050±60
2917±22				2842±63		2917±22~ 2842±63
2752±24					2700±64	2752±24~ 2700±64
2512±24						2512±24
	2216±62					2216±62
			1531±26			1531±26
			1336±26			1336±26
				1192±58		1192±58
		1043±26				1043±26~
		1020±26				1020±26
					871±60	871±60
				Modern		Modern

5



表、右造の誤用  
 041821. 表に2021  
 1043±26, 1020±26  
 言