

PDF issue: 2025-05-17

ビーチロックの最近の研究 : 温帯域のビーチロック、物理・力学特性、炭素の安定同位体比 (δ13C)

田中, 好國

<mark>(Citation)</mark> 兵庫地理,62:59-78

(Issue Date) 2017

(Resource Type) journal article

(Version) Version of Record

(URL) https://hdl.handle.net/20.500.14094/90004015



ビーチロックの最近の研究

ー温帯域のビーチロック、物理・力学特性、炭素の安定同位体比(δ¹³C)-

田中 好國

I はじめに

筆者は、日本地理学会サンゴ礁地域研究グループ 編『熱い自然・サンゴ礁の環境誌』(「古今書院」、1990) にそれまでのビーチロックの研究について総括的な 報告を行った(田中、1990)。その中で、ビーチロッ クの地形学的な意義や分布、形成年代、成因(CaCO3 の供給源)などについて述べ、ビーチロックを「海浜 にある堆積物が主に CaCO3 によるセメント作用で 板状に固結した石灰質砂礫岩である」とした。

ビーチロックはヨーロッパでは 19 世紀前半には 報告されていた(Goudie、1969; Vousdoukas et al.、 2007)。それ以来、ビーチロックの研究例は膨大で、 例えば GeoRef¹⁾では 1785 年から 2007 年までの間 に 500 本近い論文があるといわれている(Gischler、 2007)。外国ではビーチロックは、堆積岩関係や海洋 地質関係など地質学系統の専門誌に多く掲載され、 内容的には鉱物学・地球化学・微生物学など多方面 からの報告が目立つといえる。

日本では、地質学系統よりも地理学分野の地形学 での研究が多いといえる。最近でも琉球列島などの ビーチロックの¹⁴C年代や炭素安定同位体比(δ¹³C) の研究(例えば小元、2014、2016)や四国から初め て報告されたビーチロック(田中ほか、2016)が地理 学関係誌で発表されている。

ところが最近日本では、環境工学や地盤工学など 土木工学分野でビーチロックの形成過程を模した人 工岩の開発研究が行われ、ビーチロックの理化学特 性も明らかにされてきた(檀上・川崎、2011,2012a、 2012b;鈴木ほか、2013;Kubo et al.,2014;檀上、 2015)。しかし、ビーチロックの形成に関しては、 CaCO3の供給源が十分に解明されているとはいえ ない状況である。

これについて、外国では、ビーチロックのセメント物質の安定同位体比(δ¹³C、δ¹⁸O)からセメント

物質の供給源を探る研究(Gischler,2007)が増えてき ている。とくにδ¹³C は炭素の起源を推定するのに 有用²⁾で、物質の同位体比は同位体分別の影響によ るもので、それぞれ固有の値をもつ。そこで、ビー チロックのセメント物質のδ¹³C を測定することで 析出(沈澱)させた起源を推定することが可能とな る。

本報告では以上のような最近のビーチロック研究 の成果もふまえ、

1、未報告である温帯域の東九州のビーチロック の性状、

2、ビーチロックの理工化学特性、

3、外国のビーチロックの安定同位体比、

のそれぞれの研究について紹介し、今後のビーチ ロック研究について展望することにする。

Ⅱ 温帯域のビーチロック

1 ビーチロックの最初の報告と分布

かつて筆者は、"beach rock"という地形用語の最初 の使用者として OED³⁾の記述を基に Daly(1919)で あると論じた(田中、1994、1995)。さらに、地形現 象としてのビーチロックの最初の記述者としては Darwin (1842)の著作に引用されている Moresby (1835)の観察記録が最初であろうと考えていた(田 中、1994)。

しかし、最近ではインターネット上のフリーサイ トに、著作権が消失した文献や比較的新しい文献も pdf形式の学術論文として公開されるようになって きている⁴。こうしたことから、インターネット上 での情報検索の容易さもあり、古い文献の収集や文 献の所蔵状況⁵が以前と比べると格段にスピーディ ーにかつ簡単になってきた。そうして、ここ数年の 間に今まで国内では入手困難であった貴重な文献を 続々と閲覧・入手することができ、ビーチロックに 関する新知見を数多く見出すことができるようになった(田中、2016)。

そして、検索して入手した数多くのpdf形式の文 献の中から、ビーチロックの最初の記述者を報告し た Goudie(1969)の論文を入手することができた。 彼によれば、英国海軍の Sir F,Beaufort[®] 測量士官 がナポレオン戦争(1815 年 11 月終結)後に著したト ルコ南部の記録『*Karamania*』(Beaufort,1817)中 の"petrified beach"の記録がビーチロックの最初 の記述であろうと述べ、同時期に他の地中海岸やカ ナリア諸島からも報告されたことを述べている (Goudie,1969)。

このようにビーチロックは地中海周辺で注目され ていたので、比較的現在までよく研究され、地中海 におけるビーチロックは第1図のように多数分布し ている。地中海は、ビーチロックが世界的に見て集 中している"hot spot" (Vousdoukas et al.,2007)の 一つになっている(第2図)。



第1図 地中海におけるビーチロックの分布 (Longhitano,2001-2002 を元に田中がデータ追加(田 中ほか、2016))



第2図 文献から得られたビーチロックの分布 (Vousdoukas et al.,2009 を元に田中がデータを追加 (田中ほか、2016))

また、ビーチロックの分布域を緯度別に集計した

結果を見ると第3図aのように、30°~40°の中 緯度の温帯にも多く分布していることがわかる。む しろ、ビーチロックの分布は第3図bのように潮位 差が小さい場所や陸域に囲まれたギリシャ・トルコ 間(第1図)、サンゴ礁の発達するカリブ海やGreat Barrier Reef のように海流が穏やかな場所に分布す る傾向があると指摘されている(檀上、2015)。



第3図 ビーチロックの出現状況 (Vousdoukas et al.,2007)
 a ; 緯度的分布数
 b ; 潮位別分布数
 c ; 年代別分布数

従来、ビーチロックは熱帯から亜熱帯のサンゴ礁 地域に通常発達する(目崎、1981)といわれていた が、世界的には第2図のように必ずしもそうでない ことがわかる。

また、"beach rock"(beachrock)という地形用語の 最初の使用者について、Cloud(1959)はAgassiz (1895) であると報告している。

2 九州・四国のビーチロックの分布

ヨーロッパではビーチロックは、第2図のように イギリス、イベリア半島、地中海沿岸から多数報告 され、南半球では南アフリカ、アルゼンチン、ニュ ージーランド北島などS30°近辺からも報告されて いる。このように外国では、温帯域のビーチロック はよく知られ、比較的研究されてきたといえる。

日本の場合はビーチロックの93~95%はサンゴ 礁海域にある(田中、1990;檀上、2015)と考えられ ているが、1963年代以降琉球列島以外でも温帯域 の九州およびその周辺島嶼からしばしば報告されて きた。当初、九州周辺では、西側島嶼でビーチロッ クの発見例が多かったが、1994年に初めて東側の 大分県屋形島でも報告された(三浦・千田、1994)。 そして最近、愛媛県伊予市森海岸(田中ほか、2016)、 宮崎県島浦島(筆者 2016 年 5 月調査、本論文次項参 照)にもビーチロックが発見され、インターネット の情報によれば宮崎県日南市から大分県佐伯市の九 州東側の海岸も相当個所存在することが確認でき る。さらに、北側の壱岐赤島にも分布している 7。 ここで、九州およびその周辺島嶼等におけるビー チロックの現時点の分布を示すと第 4 図のようにな

る。



第4図 九州および周辺のビーチロックの分布 (★は既報告地点⁸、▲は最近発見された地点)

この図から、南部の9)~12)、22)を除くと、九州 西部に9地点(1)~8)と21))、東部・四国に7地点 (13)~15)、17)~20))、北九州に1地点(16))見 られ、今まで東部側では屋形島(14))しか報告さ れていなかったが、九州東部側にもビーチロックが 多く分布することがわかってきた。このように、温 帯域のビーチロックは離れた地域に点在している例 が多いので、それぞれの形成機構はサンゴ礁地域の 例と比べると分布地点ごとに異なっていることが予 想される。

3 東九州におけるビーチロックの性状

第4図に示されるように、九州東部から四国にか けては7地点(13)~15)、17)~20)) にビーチロ ックが分布しているが、14)の大分県屋形島(三 浦・千田、1994)、13)の愛媛県伊予市森海岸(田中 ほか、2016)のビーチロックについてはそれぞれ報告されているので詳細は各文献を参照されたい。

ここで報告する宮崎県で初めてのビーチロック は、県内最大の有人島である島浦(しまうら)島の南部 にある(第5図)。島浦島は、県北部に位置する延岡 市の中心から北東に約12kmの日向灘に位置し、 面積約2.84km²、周囲約15.5kmの島である。



第5図 調査地域図、島浦島のビーチロック(●)

当地域の地質は、古第三紀北川層群の最上位層で ある浦尻層が露出し、成層砂岩、砂岩頁岩互層およ びこれらの複合層からなっている(奥村ほか、1985)。

地形は、島のほぼ中央部にある遠見場山(185.5m) を中心に山がちであり、西側の一部を除いて平地に 乏しい。海岸線は西側では、新しい時代に沈降したリ アス海岸(奥村ほか、1985)に象徴されるように小湾 入部が多く、良港となっているところもある。これに 対して、東側は海食崖とその間の小規模なポケット ビーチの配列がみられ、南部にはこの島では少し規 模の大きな礫浜がみられる。

ビーチロックは、島南部の日井の浜(ひいのは ま、第5図、写真1)にある。この浜は、さらに南 にある"地の小島"を陸繋している10~25 c m程 度の礫によって構成されている礫州である。2016 年5月中旬の現地調査では、第6図のように内陸か らの小河川が礫州の背後の潟湖に流下するAの部分 (写真2)と礫州の潮間帯からやや低潮位に位置する Bの部分(写真3)でビーチロックを見出した。Aの ビーチロックは「さざれ石」として既に知られてい たが、Bの礫州上のビーチロックは今回が初めての 報告であろうと思われる。また、第6図のCは(写 真4)、現地調査当時礫州側(日向灘)が満潮であった ので、礫州側から潟湖側に礫州の下部を通って海水 が滲み出していた部分である。



第6図 日井の浜の空中写真(A、Bはビーチロック)



写真1 内陸から日井 の浜を望む(水面上中 央にビーチロックA と小河川、右端に礫 州)

写真2 ビーチロック A(潟湖状の部分に張 り出して膠結、一部 雑草に覆われている)



写真3 礫州上にある ビーチロックB(ほぼ 潮間帯に位置、コンクリ ートを流したような 固 結表面部に大礫が包含さ れている)



写真4 満潮時、礫 州下部から潟湖側(手 前)に海水が流入、干 潮時は逆流現象が予 想される

ここで、ビーチロックA、Bそれぞれの性状について現地調査の結果をもとにして記載する。

【ビーチロックA】第6回に示されるように、礫州 に閉じ込められた潟湖の部分に流入する小河川沿い に、1~2mmから5~6cm程度の大きさの小礫が厚 さ10cmほど固まって層を成している(写真2)。そ の断面を見ると写真5のように、複数の層を成して いる部分も認められ、各層の上位(表面)部は比較的 緻密な層となっている。これはサンゴ礁地域の典型 的なビーチロックにも認められる構造である(田 中、1978、1983)。



写真5 ビーチロ ックAの断面(厚 さ10cm程度の 層が複数ある)

総じて、このビーチロックAは、各層の表面部に は5~6cm 程度の丸みをおびた礫が含有され、周囲 から下部には1~2mmの角ばった礫片が多く集結 して成層している。表面部の礫は場所によって手で 簡単に取ることができ、板状に固結した後に流水ま たは暴浪によって周囲の礫が表面を覆い、膠結した ものかもしれない。また、一部ミクロケスタを呈す る部分も見られた。

【ビーチロックB】第6図のように、島浦島側から 地の小島方向に北北西〜南南東に延びる礫州があ り、その中央よりやや北北西(島浦島)(側に潮間帯と 低潮位部にビーチロックが認められた。潮位の関係 でこの両者の連続性は確認できなかったが、それぞ れ独立しているように見えたが、詳細は不明である。

この礫州は、日向灘に面した方にやや凹曲し、長 さ約150m、最大幅約20m、高さ約4~5mで、礫 州の構成物は砂岩を主とする長径10~25cm程度の 丸みをおびた礫からなっている。ここで、礫州に計 測点を4か所(南南東側を地点1として、約40mご とに地点を4つ)設け、礫州の礫の移動状況(礫州の 成長方向)を簡易に知るために、その計測地点ごと に最大礫を5個ずつ選び、各最大礫の見かけの体積 (長径×中径×短径 cm³)を計測し、各地点の平均値 を求めた。

その結果、一番北北西(島浦島側)の計測点4にお ける最大礫の大きさの平均値は5,008.4cm³、反対 側の南南東(地の小島側)の計測地点1の同平均値は 584.9cm³となり、この礫州の礫の供給源は北北西 の島浦島側の海食崖またはその周辺の岩礁と予想さ れ、礫州はほぼ島浦島側から地の小島側へ、つまり 北北西から南南東方向に礫が運搬(礫州が成長)して いったことがうかがえる⁹。これについては、さら に最大礫の球形度や扁平度を求めたり、波の屈折図 を作成すれば礫州の地形発達についてより正しい推 定ができると思われる。

この礫州上のビーチロックBは、上記の計測地点 の2~3、礫州の中央より島浦島側に近い場所に潮 間帯から低潮位にかけて広がっていた。ちょうど第 6図中のCおよび写真4にみられる部分の反対側に 位置していた。この部分は、前述のように満潮時に 海水が礫州を浸透し、潟湖側に流れ込んでおり、潟 湖側では海水と淡水の混合が行われていた。このよ うな礫州を通した水の移動は、長大な礫州のある鹿 児島県上甑島の長目の浜と海鼠池の関係で確認でき なかったが干潮時(もしくは大潮の干潮時)や、さら に島の内陸に多量の降雨があったとき、逆に潟湖側 の淡水が礫州を浸透して日向灘(礫州)側に流出して いることが考えられる。

このビーチロックBは、礫州の表面部にコンクリ ートを流したように盤状に固結している。サンゴ礁 地域の典型的なビーチロックと異なり、成層構造が 不明瞭で、多量の礫が表面に包含されている(写真 6)。これは、第7図に示される上甑島の長目の浜に 分布するビーチロックと形態的に非常によく似てい る(荒巻ほか、1976;田中、1978、1986、1990; 利光ほか、2004)。上甑島のビーチロックの位置 は、長目の浜の tidal inlet (潮口)としての場所にあ り、海水と湖水の交換が行われる場所に広がってい る。このビーチロックBもそれに似通った場所に分 布している。

以上のように、島浦島ではビーチロックA、Bと もに淡水と海水が混合すると思われる場所に形成さ れている。よって、檀上・川崎(2013)や檀上(2015) がビーチロックの形成に関する情報を整理した中の

「海水と淡水の混合(S-FMW)による CaCO3の析出」により形成されたと考えることもできそうであ

る。しかし、本島の場合は今回が初めての調査なの で、礫州の形成過程を含めてビーチロックに関して は、今後の継続的調査が必要であろう。



第7図 ビーチロックBと同じ上甑島の礫質ビーチ ロックの模式断面(田中、1978)

Ⅲ ビーチロックの理工化学特性

1 ビーチロックの従来の研究

ビーチロックの最初の記載は、本論文II 1 項で述 べたように、19世紀初めに遡ることができると思わ れる。その後、Moresby(1835)、Darwin(1841、1842) や Agassiz (1895)らの研究に続き、20世紀になり ビーチロックの研究は観察を中心とする記述的方法 から現地で断面測量を行い、論文に写真や断面図(第 8 図)を提示する実証的内容の論文が現れてきた (Gardiner,1903)。





しかし、2度の世界大戦と大戦間、大戦後の混乱の もと、さらには太平洋のサンゴ礁地域が太平洋戦争 の戦場になったこともあり、ビーチロックの研究も 停滞した期間があったようである。

第二次世界大戦後、サンゴ礁地域の調査を開始し たアメリカ合衆国は、日本が大戦前に委任統治して いたマリアナ諸島やマーシャル諸島などで地質調査 を行い、その成果は例えば、*Geological Survey Professional Paper*に続々と報告が載った。その中 で、Revelle and Emery (1957)、Emery(1962)は、分 析化学的研究手法を取り入れ、水質分析を行ってビ ーチロックの成因を追及しようとした。

その後、ビーチロックの研究は、海水準変動の指標、海岸線の変化、海岸におけるセメント作用や古環境の変遷などを知る資料(David et al.,2009)として期待され、世界各地で研究されてきた。

こうして、ビーチロックについては、その分布状 況以外に、とくに 1970 年代以降、形成年代の測定 (4C 法やその他の方法)と分布高度、ビーチロック の元素分析、セメント物質の特定(アラゴナイト、 High-Mg カルサイト、カルサイト、ほか)、周辺の 海水や淡水または地下水の水質分析データなど最新 の機器や手法を駆使した分析化学的研究が行われる ようになってきた。さらにセメント物質の安定同位 体比データも世界各地から異なる自然環境下のビー チロックから得られ、その形成年代や形成機構につ いても多様な説明がなされるようになってきた (Friedman,2004,2005;Vousdoukas et al.,2007; Gishler, 2007)。

その間、炭酸カルシウム(CaCO₃)の析出促進(堆積 物の固化促進)に、微生物の影響も重視され、ビー チロックの形成に微生物の活動を考慮した研究も増 えてきた(例えば、Neumeier,1999; Webb et al.,1999;Diez et al.,2007;檀上、2015)。

2 化学分析を用いた日本のビーチロック研究

日本では、1963年に米谷(1963 a)によってビー チロックが紹介された後、地下水成因説 ¹⁰⁾を唱えた 米谷(1963 b,1966,1982)以外の研究者はビーチロッ クの成因を説明するために、理化学(分析化学)的な 研究を行った。

まず、武永(1965 a、1965 b)は鹿児島県南端の与 論島において、ビーチロックの形態と分布を明らか にし、地下水・海水の水質分析を行った。また、堀 ほか(1972,1973)も与論島の水質分析とビーチロッ クの化学分析を行った。田中(1978,1983,1990)は与 論島のすぐ北に位置する沖永良部島において海水・ 地下水の水質分析を行い、3者ともCaCO₃が海水 から無機的に沈殿する可能性を示した。

さらに、化学研究者である寺井ほか(1985)は、与 論島の試料を用いて化学分析とX線回折を行った結 果、ビーチロックの形成はアラゴナイト型の CaCO₃が海水から沈殿-膠着作用で形成されると 推論した。彼らはまた、与論島の例では元素分析の 結果リンが含まれていなかったので、ビーチロック の形成に生物の作用は加わっていないだろうと述べ ている。

そのほか、奄美大島での河内(1974)、北陸地域で の東ほか(1982)もビーチロックのX線回折による鉱 物組成の分析、海水・地下水の水質分析を行い、海 中での膠結作用を論じた。

3 地盤工学系研究者のビーチロック研究

日本の最南端である沖ノ鳥島の浸食防止工事は 1988年から始まったようであるが、最近事故もあ り、大変な難工事であろうと思われる。この沖ノ鳥 島が完全に水没すれば、相当な範囲の経済水域を失 い、日本にとっては大きな損失となり、それを防止 するために、旧建設省の時代から工事が着手されて いる。

この工事が始まって、しばらくして(1998 年秋)から筆者の元に沖ノ鳥島の工事関係者から問い合わせがあった¹¹⁾。これが、土木工学(地盤工学)関係の研究者との出会いで、彼らがビーチロックについて興味を持っていることを筆者が知ったきっかけである。

そして、インターネットで情報検索を繰り返した 結果、地盤工学(土木工学)系研究者で、ビーチロッ クの形成機構を模した人工岩の研究をリードしてき た一人が北海道大学の川崎であることがわかった。 川崎とその共同研究者らによって、文献研究以外 に、世界的にもほとんど行われていなかった工学的 アプローチが始められ、ビーチロックの物性や理化 学特性など今まで未知であった部分が続々と明らか になり、その成果が続々と発表されてきた¹²。

この川崎のビーチロック研究の目的は、「ビーチ

ロックを加速固化させる技術を新たに開発し、海岸 の浸食防止、海岸コンクリート構造物の劣化抑制・ 長寿命化、岩盤・コンクリート構造物の亀裂の自己 修復などの技術へ応用すること」(川崎、2016)だと いわれている。そして、沖縄のビーチロック周辺か ら CaCO₃の析出に適した微生物も発見し、それを 用いて固化させる技術も開発している。

4 最近の理工化学特性に関する研究成果

前述のように、元素分析や水質分析を行ってビー チロックの特性や形成機構(成因)を探る研究は多か ったが、工学的側面からビーチロックの理工化学特 性を調査した研究は最近まで見られなかった。

筆者の知る限り、日本で工学的特性を最初に報告 したのは、筆者に問い合わせてきた川上ほか(2002) のようであり、ビーチロックの生成実験後の試料で 針貫入試験を行った結果を報告している(第9図)。 しかし、この実験は針貫入試験強度のほかはX線回 折や電子顕微鏡による固結物質の同定のみであっ た。



第9図 針貫入試験強度の経時変化(川上ほか、2002)

次にビーチロックの工学的性質を取り上げたのは、 小笠原ほか(2004)の研究であり、後の川崎らの研究 の先駆けになった。彼らは、能登半島のビーロックに ついて調査し、ビーチロックが海岸の砂を固化さ せていることに着目し、物理および力学試験を実施 した(第1表)。その結果、海岸の砂とビーチロック を比較すると、間隙率が10%ほど減少した分密度 が増し、透水性が2桁ほど小さくなり、一軸圧縮強 度が発現していることを見出した。

そして、ビーチロックのように自然に形成される

安定的な物質を効果的に応用すれば、高い耐久性を 持ち環境負荷の少ない構造物とすることが可能であ ろうと述べた。小笠原ほか(2004)の研究後、川崎ら が精力的にビーチロックに関する工学的研究を行い、

第1表 ビーチロックの土質試験結果(小笠原ほか、2004))

項目	単位	ビーチロック		
湿潤密度ρ t	g/cm ³	1.546	1.966	
乾燥密度ρ d	g/cm ³	1.479	1.615	
間隙率	%	49.19	44.51	
一動互旋強大。	kN/m²	_	6010	
一軸工相强equ	(kgf/cm ²)	_	60	
透水係数k (縦固め)	cm/s	3.4×10^{-2}	7.4×10^{-4}	

続々とその成果を発表してきた(例えば、川崎、 2011、2012;檀上・川崎、2011、2012b;Danjo・ Kawasaki、2012、2013;檀上ほか、2012)。

このうち、Danjo・Kawasaki(2013)は、沖縄県名 護市のビーチロックおよび周辺の海水を対象とし て、針貫入試験、菌数測定、元素分析、鉱物分析、 水質分析を実施した。そのうち、針貫入試験と菌数 測定の結果は第2表に示される。この表から、一軸 圧縮強度は、露出ビーチロックの方が埋没ビーチロ

第2表 針貫入試験と菌数測定の結果 (Danjo·Kawasaki,2013))

	Needle pene	etration test	Microbial population count				
Test Section	Np	qu	Marine	Viable			
	N/mm	Мра	10 ⁴ CFU/mL	10 ⁴ CFU/mL			
Seawater	—	_	1.3	0			
Exposed beachrock1	80±22	28 ± 6.9	410	45			
Exposed beachrock2	51±12	19 ± 4.7	1500	8.15			
Buried beachrock	8.9 ± 5.4	3.4 ± 2.2	460	14			
Sand	_	_	500	5.4			

ックより大きいのがわかり、これは筆者(田中、 1990)の「表面部ほど硬く、内部や下部では弱い」 という現場観察とも一致する。また、菌数に関して は、露出ビーチロック2は菌数が多いが、他のビー チロック中の菌数は通常の地盤の菌数と比較すると 少ないが、海水中の菌数と比べると多いので、ビー チロックの形成に微生物が関与している可能性があ ると指摘している。

また、沖縄本島の後備浜原(A)、真栄田(M)、儀間 (G)を調査地として行った檀上・川崎(2012b)は、ビ ーチロックの物理・力学特性を把握し、一軸圧縮強 度と各種特性の相関を検討するために多くの物理・ 力学特性の試験を実施した。その室内試験の結果は 第3表に示される。試験項目は左からそれぞれ、供 試体の密度 ρ 、含水比 ω 、一軸圧縮強度qu、50% ヤング率 E_{50} 、50%ポアソン比 v_{50} 、P波速度 V_{PL} 、S波速度 V_{SL} である。

第3表中で、一軸圧縮強度 qu は、調査地点およ びサンプルによって大きく異なっているが、儀間 (G)のサンプルが最も高く、後備浜原(A)のサンプル が最も低くなっている。Wet 供試体では、含水比ω が低い方が一軸圧縮強度の数値が高くなっているこ とがわかる。檀上・川崎(2012b)は、これらの試験

第3表 沖縄県のビーチロックの室内試験結果 (表中のーは測定エラー)(檀上・川崎、2012b)

サンプル番号	$\rho~(\text{g/cm}^3)$	ω(%)	qu(Mpa)	E ₅₀ (Gpa)	V ₅₀	$V_{PL}(km/s)$	$V_{SL}(km/s)$
AXW-1	2.01	12.2	10.88	0.230	0.130	3.80	2.50
AXW-2	2.10	10.3	13.99	0.219	0.106	3.49	2.44
AXW-3	2.05	11.3	5.63	0.076	0.180	3.37	2.29
AYW-1	2.09	-	17.97	0.308	0.150	3.37	2.32
AYW-2	2.01	12.5	7.11	0.207	0.119	3.41	2.15
AYW-3	2.08	9.3	11.23	0.259	0.067	3.73	2.35
平均值	2.06	11.1	11.14	0.218	0.125	3.50	2.34
標準偏差	0.04	1.3	4.50	0.078	0.039	0.14	0.12
AXD-1	1.98		25.69	0.368	0.159	3.75	2.28
AXD-2	1.91		15.29	0.206	0.089	3.46	2.08
AYD-1	1.76		7.92	0.233	0.110	3.00	2.05
AYD-2	2.00		19.11	0.329	0.149	3.85	2.22
AYD-3	2.00		27.10	0.309	0.185	3.80	2.42
平均值	1.93		19.02	0.289	0.138	3.57	2.21
標準偏差	0.10		7.86	0.068	0.039	0.35	0.15
MXW-1	1.96	25.2	24.31	0.166	0.027	3.74	2.14
MXW-2	1.96	26	11.04	0.129	0.041	3.44	2.26
MXW-3	1.98	25.2	24.38	0.217	0.119	3.88	2.54
平均值	1.97	25.4	19.91	0.170	0.062	3.69	2.31
標準偏差	0.01	0.5	7.68	0.044	0.050	0.22	0.21
MXD-1	1.60		43.03	0.364	0.127	3.94	2.77
MXD-2	1.60		26.37	0.321	0.083	3.80	2.83
MXD-3	1.57		18.25	0.295	0.123	3.80	2.60
平均值	1.59		29.22	0.327	0.111	3.85	2.73
標準偏差	0.02		12.63	0.035	0.024	0.08	0.12
GXW-1	2.49	3.4	49.71	0.326	0.111	5.14	-
GXW-2	2.49	3.6	57.80	0.546	0.157	5.05	3.49
GXW-3	2.50	3.4	50.45	1.243	0.338	4.77	3.40
GYW-1	2.44	3.7	31.48	0.349	0.140	4.82	2.98
GYW-2	2.40	4.2	24.66	0.592	0.248	4.57	2.78
GYW-3	2.47	4.1	39.25	0.512	0.169	4.11	2.76
平均值	2.47	3.7	42.23	0.594	0.194	4.74	3.08
標準偏差	0.04	0.3	12.64	0.335	0.084	0.37	0.34
GXD-1	2.38		36.61	0.362	0.073	4.09	2.48
GXD-2	2.36		21.86	0.665	0.240	4.09	2.32
GXD-3	2.24		30.98	0.220	0.081	3.84	2.48
GYD-1	2.37		39.33	0.617	0.153	4.20	2.43
GYD-2	2.31		30.39	0.322	0.077	4.20	2.72
GYD-3	2.39		27.50	0.671	0.157	3.99	2.62
平均值	2.34		31.11	0.476	0.127	4.07	2.51
標準偏差	0.06		6.28	0.198	0.070	0.13	0.14

※サンプル番号欄のWはWet供試体、DはDry供試体

値を用いて、例えば一軸圧縮強度とその他の物性の 相関関係を調べたり、物理・力学特性と形成年代の 関係を考察している。 また、湿潤の供試体のうち、一軸圧縮強度が高かった供試体AXW-2、MXW-3、GXW-2を対象として元素分析も行った。携帯型装置における元素分析の結果は、第4表のとおりで、いずれの供試体においてもCaOの割合が最も高い。

さらに、EDX による元素分析の結果は、第5表 のとおりで、CaO、C、MgOの割合が高く、GXW-2 では MgO の含有率が比較的高くなっている。

ビーチロックの元素分析については、日本でも堀 ほか(1972,1973)以降も行われてきたが、これだけ 詳細な物理・力学特性が報告されたことはなかっ た。

第4表 室内での携帯型蛍光X線分析装置による 元素含有率(檀上・川崎、2012b)

サンプル番号	CaO(%)	Cl ₂ (%)	SiO ₂ (%)	SO ₃ (%)	SrO(%)
AXW-2	54.750	0.130	2.360	0.290	0.030
MXW-3	42.300	300 22.040 0.500		2.250	0.650
GXW-2	57.790	8.470	1.500	0.480	0.030
サンプル番号	Al ₂ O ₃ (%)	FeO(%)	TiO ₂ (%)	Others(%)	
AXW-2	0.00	0.20	0.08	42.20	
MXW-3	0.00	0.00	0.00	32.90	
GXW-2	0.25	0.03	0.00	31.48	

第5表 エネルギー分散型X線分析装置(EDX)によ

る元素含有率(檀上・川崎、2012b)

サンプル番号	CaO(%)	C(%)	MgO(%)	SiO ₂ (%)
AXW-2	59.65	35.60	0.79	1.77
MXW-3	50.49	46.49	0.56	0.00
GXW-2	50.23	41.19	5.70	0.64
サンプル番号	SrO(%)	Y ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Na ₂ O(%)
AXW-2	0.00	1.16	1.04	0.00
MXW-3	1.74	0.00	0.00	0.72
GXW-2	0.00	0.85	0.66	0.73

檀上・川崎(2012b)は、ビーチロックは時間の経 過に伴って、密度が増加、含水比が低下し、一軸圧 縮強度が増していくことを示した。また、ビーチロ ックは一軸圧縮強度が数十 MPa になるのに形成期 間が 1,000~2,000 年程度であるのに対して、一般 の堆積岩は数百万年以上の時間が必要であるため、 強度増加が早い点において、ビーチロックが人工岩 盤のモデルに適していると考えられると述べてい る。

5 ビーチロックの地下構造調査

ビーチロックの形成過程を知るために、周辺を含

めた地下構造に関する調査も行われた。ビーチロッ ク周辺の地下構造を把握するためにはボーリング調 査が不可欠であるが、環境に与える影響もあり、ボ ーリング調査は難しい¹³⁾。そこで、沖縄県名護市で ビーチロック周辺を含めた地下構造に関する電気探 査調査も行われた(鈴木ほか、2013;久保ほか、 2013; Kubo et al.,2013、2014)。この電気探査の事 例は、ギリシャ北方の Thassos 島で行われた調査 (David et al.,2009)、トルコの黒海沿岸の事例 (Erginal et al.,2013)がある程度で、日本の事例は他 の分析も行っており、非常に意義が大きい。

調査地域の海浜で、海浜に平行に2側線、垂直方 向に1側線設け、それぞれの側線で表面波探査と電 気探査が行われ、ビーチロックのサンプルも採取し て室内試験によって各種物性値も測定された。

筆者が現地調査を行っているとき、ビーチロック が海浜下どこまで続いているか確認するときは下を よく掘り下げた。しかし、II章で述べたような島浦 島や上甑島のような礫浜にあるビーチロックの場合 は大礫に覆われているので、掘り下げることができ なかった。それが電気探査によって、初めてビーチ ロックの海岸線から内陸までの地下構造、ビーチロ ックの厚みが確認され、最大で1mほどであると推 定された。(第10図)。この厚みは、Eraginal et al. (2013)の黒海沿岸における、ビーチロックに直行す る4側線で行われた電気探査の結果と同じである。



第10図 名護市のビーチロックの地下断面 (Kubo et al.,2014)

さらに、この調査地域では、ビーチロックは内陸 側よりも海側の方が厚みがあることがわかり、海岸 線に近いほど厚みが増したことから、その形成には 海水の十分な浸漬と蒸発の繰り返しが必要なことが 指摘された(鈴木ほか、2013; 久保ほか、2013; Kubo et al.,2014)。これは、すでに筆者が提案した ビーチロックの形成モデルにおいて、「干満による 水没乾燥、日射による蒸発を昼夜にわたって繰り返 しながら初期の形成がおこる」(田中、1983,1990) と述べたことと矛盾しない。

また、Kubo et al.(2014)は、国内の堆積岩試料と ビーチロックに対する P 波、S 波速度の関係を調べ た(第 11 図)。その結果、名護市のビーチロック (KU)の弾性波速度は、Miocene の堆積岩に近い数値 を示したことがわかった。ビーチロック (DA) はこれ に対して、Early Paleogene から Jurassic の堆積岩 に数値が近い。これらの試料から、ビーチロック (KU)の形成年代が新しいことが推測された(鈴木ほ か、2013)。このような関係を求めた資料は地理学 関係の研究には見られない貴重なものである。



第11図 堆積岩とビーチロックのP波速度とS波 速度の関係(Kubo et al., 2014)(凡例のBeachrock (DA)は擅上 ほか、2012の資料、同(KU)はKubo et al., 2014の資料を示す)

電気探査の結果を表す場合、いくつかの図が用意される。例えば、側線上の比抵抗断面図、S波速度断面図などが示される。第12図は、Kubo et al.(2014)の行った沖縄県屋我地島におけるビーチロックの地下構造調査によって作成された porosity section である。(a)は、海岸線に直行する長さ約44.5mでほぼビーチロック上にある側線、(b)は海岸線と平行する長さ約89mの一部ビーチロック上を通る側線でほとんどは海岸砂上を通っている。(c)は海岸線と直行する長さ約14.75mの側線で、海岸線





から7m程度内陸までビーチロックがあり、内陸側 は海浜砂となっている側線である。この図を見る と、側線の表面部において、porosityの比較的低い (10~15%)部分にビーチロックがあることがわか る。また、直行する側線(c)において、ビーチロック の厚さが1m程度あること、海側の方が陸側より厚 いことが読み取れる。

さらに、基盤とビーチロックの間にある砂層は porosity も高く、固化が進んでいないと推測されて いる(鈴木ほか、2013)。

海外の研究では、David et al.(2009)のギリシャの Thassos 島の事例、Eraginal et al.(2013)の黒海沿 岸における調査で、比抵抗断面図が提示され、黒海 沿岸の事例からは、ビーチロック周辺の地下構造が 読み取れ、ビーチロックの厚さも1mとわかる。今 後は、他の海浜におけるビーチロックの地下構造が 物理的探査によって明らかになることを期待した い。

Ⅳ 安定同位体比を用いた研究

1 ビーチロックの炭素安定同位体比(δ¹³C)

日本では、琉球列島のビーチロックの¹⁴C年代測 定が当時日本大学に在籍していた小元によって 1991年頃より始められた。そして、その較正年代 の補正のために δ^{13} Cの測 定も実施され、他分野の研 究者によるビーチロックの δ^{13} C値も含めて現在529 のデータが公表されてい る。これは、ビーチロック の δ^{13} C値の数としては世 界でも突出した多さで、そ の資料的価値は高いと思わ れる。

そこで、ここでは500を 超えるビーチロックのδ

¹³C 値を整理し、諸外国の CaCO₃の供給源に関す る研究も紹介し、琉球列島におけるビーチロックの δ ¹³C 値を CaCO₃の供給源推定に使用する際の問 題点と展望について述べる。

2 炭素の安定同位体比(δ¹³C)

ある元素の同位体組成を示すのに、もっとも存在 度の高い同位体に対する二番目に高い同位体の比で 表すと、炭素では¹³C/¹²C、酸素では¹⁸O/¹⁶O とな る。同位体地球化学では同位体比の絶対値より物質 による変動が重視されるので、炭素では矢石 (Peedee 層の Belemite 化石=PDB)、酸素では標準 海水(SMOW)が国際標準物質として選ばれている (松尾、1989)。標準物質の同位体比からの試料の同 位体比の千分率(‰)で示され、δ(デルタ)値と呼ばれ 炭素の安定同位体比は次式で定義される。

δ¹³C 試料={(¹³C/¹²C 試料÷¹³C/¹²C 標準物質)-1} ×1000 (1)

地球化学の分野では、物質の同位体比を質量分析 器で測定することにより、物質の起源や流動、年代 測定を行うことができる。

ここで、自然界における炭素のδ¹³Cの変動を示 すと第13回のようになる。この図から、ビーチロ ックの形成に関与すると思われる海成炭酸塩につい ては、おおよそ0~+4‰程度の範囲にあることが 読み取れる。これについて Gishler(2007)は、海成



第13図 自然界の炭素安定同位体比の変動

由来のセメントはδ¹³Cがおよそ0~+5‰PDBの 範囲にあると述べている。

3 CaCO₃の供給源推定に関する従来の研究

ビーチロックの形成に関与している CaCO₃の供 給源については、多くの国内外の論文に報告されて いる(例えば、田中、1983,1990; Turner、2005; Gischler,2007)。Vousdoukas et al.(2007)らは、欧 米中心の 207 編¹⁴の引用文献から、ビーチロック の世界の分布、セメント物質、年代、成因(形成過 程)などについて総括的報告を行った。その中で、 ビーチロックの形成過程として、

海水から(PMW)、② 淡水から(PFW)

③ 多様なメカニズム(VM)、④ CO2の脱気

(CO₂-DEG)、⑤ 微生物(BIOL)、⑥ 海水と淡水の混合(M-FWM)、⑦ 物理化学的要因(P/C-F)
 による CaCO₃の析出と 7 種類の形成過程(成因)を
 まとめ、海水または淡水からのセメント物質(CaCO₃)

の沈殿が主要な説であると述べた。

また、ビーチロックの形成機構を模した人工岩の 開発研究を行っている地盤工学の檀上らは、国内外 の113 編の論文をもとに人工岩作成に必要と考えら れる、分布域、形成年代、物性および形成機構につ いて情報を整理した(檀上・川崎、2012a、2013;檀 上、2015)。その中で、国内外の77地点で報告され ているセメント物質中、75地点でHMC(高Mgカ ルサイト)やアラゴナイトなどCaCO₃の多面形を主 成分としていることを見出した。そして、ビーチロ ックのセメント物質と形成機構について検討し、形 成機構は Vousdoukas et al. (2007)の報告した前述の 7 種類のうち 6 種類(①②④⑤⑥⑦)があると述べた (檀上・川崎、2013)。その結果、ビーチロックは 6 種類の中の単一および2 種類以上の形成機構が組合 わさることで形成されると報告した。そして、従来 の報告からカルサイトをセメント物質とするビーチ ロックは CaCO₃ が淡水からの析出、アラゴナイト や HMC を含むものは海水からの析出が多い傾向が あると述べている(檀上・川崎、2013)。

4 外国の安定同位体比に関する研究

I章のように外国では、ビーチロックのセメント 物質を調べ、その安定同位体比を測定して CaCO3 の供給源や初期の形成環境などを推定する研究が 1970 年代後半より行われるようになってきた。

例えば、Magaritz et al.(1979)らは、ビーチロッ クのセメント物質の組成を調べ、ビーチロックの形 成プロセスを解明しようと試みた。彼らは、イスラ エル中部海岸の recent ビーチロックのセメント物 質としてアラゴナイトと Mg カルサイトを認め、安 定同位体分析の結果からセメント物質の起源を海水 と推定した。

さらに、Beier(1985)はバハマのサンサルバトル 島の contemporary ビーチロックについて、セメン ト物質としてアラゴナイトを認め、δ¹³C 値が+ 4.26~+4.91‰の範囲にあることを示し、海水から のセメント物質の沈殿を推定した。

また、ビーチロックが比較的集中して分布してい る東地中海や中近東の recent ビーチロックについ て、Holail and Rashed(1992)は、セメント物質組 成や安定同位体分析を行い、海水からのセメント物 質の沈殿の可能性を報告した。そして、安定同位体 とセメント物質組成がビーチロックの初期の形成を 知るのによい指標となることを示した。この研究 は、その後のビーチロックのセメント物質の組成や 形成プロセスに関する安定同位体を用いた研究にし ばしば引用されている。

これらの研究を含む安定同位体を用いた代表的な 報告をまとめると第6表のようになる。西インドの 例を除き、いずれの研究でもセメント物質はHMC

Region	Ages and beachrock composition ¹⁾	δ ¹³ C ‰	δ ¹⁸ O ‰	Formation process ²⁾	Reference		
Israel	Recent beachrock Ar,HMC	+0.5~+2.6	-1.0~-1.0	PMW	Magaritz et al.1979		
Egypt;Red Sea	Descript hose hyperki HMC	+2.1~+4.5	-0.1~+1.2		Heleil and Beeked 1992		
Mediterranean	Recent beachrock HMC	+1.0~+2.1 -0.4~+1.2		PIVIV			
Gulf of Aqaba		+2.9~+4.4	-1.6~+2.0				
Arabian Gulf	Holocene beachrock, HIMC	+0.3~+22	-0.5~-3.0	PIVIV	Holali et al.2004		
Arabian Gulf	Holocene beachrock,	+3.22~+5.90	+2.65~+4.40		Koeshidayatullah and Al-		
Gulf of Aqaba	HMC,Ar	+3.83~+4.64	+1.16~+1.50	PIVIV	Ramadan,2014		
0	ca33,000 to recent	+1 0~+1 9	-30~-42	PMW	Calvet et al.2003		
Callary 15.	beachrock,Ar,HMC	14.01 - 14.3	3.0 4.2	CO ₂ -DEG			
Northeastern		70	44	PMW			
Brazil	Holocene beachrock, HIMC	-7.8~+3.0	-4.4~+0.5	M-FWM	Vieira et al.2006		
Brazil		11.05			E : 1 : 10010		
Pernambuco	Holocene beachrock,HMC	-1.1~+3.5	-0.9~+0.5	PMW	Ferreira Jr.et al.2013		
Bahama	Contemporary beachrock,Ar	+4.26~+4.91	-0.53~-1.35	PMW	Beier1985		
West Coast	Recent to sub-recent	10 67	27.5~28.6		Kuman at al 2000		
of India	beachrock	-1.9~-0./	(SMOW)	PFW	Rumar et al.2000		

第6表 完新世等におけるビーチロックの炭素・酸素の安定同位体比

1) Ar : Aragonite, HMC : High Magnesium Calcite 2) PMW : Precipation from marine water/marine water evaporation, PFW : Precipation from fresh water, CO₂-DFG : CO₂-degassing, M-FWM : Marine-fresh water mixing

やアラゴナイトが多く、その δ^{13} C 値はやや高く CaCO₃の供給源は海水からと報告されている例が 多い。それに対して、 δ^{13} C 値が低い例である西イン ド海岸(Kumar et al.,2000)やブラジル北東岸(Vieira et al.,2006)の2 地点(No.7 と 8)のビーチロックは δ^{13} C 値が-7‰前後で、これらはいずれも CaCO₃ が 淡水または海水と淡水の混合の結果からと推定され ている。

ここで、第6表の安定同位体比の範囲を研究グル ープごとにまとめると第14図のようになる。この 図からも δ^{13} C値が0~+5‰の範囲内では、

CaCO₃(セメント物質)の供給源が海水からと推定されている例が多いことがわかる。これは、海成由来のセメントはδ¹³C がおよそ 0~+5‰の範囲にあると述べた Gishler(2007)の指摘に矛盾しない。

また、Keith and Weber(1964)は、石灰岩や化石の321の海成サンプル、183の淡水成サンプルの安定同位体比を測定し、石灰岩が海成か淡水成か成因の判別のための値(Z value)を求める式を考案した。これは、次式で表される。

 $Z = a(\delta^{13}C+50) + b(\delta^{18}O+50)$ (2) ここで、 $a \ t \delta^{13}C \ \sigma$ 定数、a = 2.048 $b \ t \delta^{18}O \ \sigma$ 定数、b = 0.498

この判別式で、Z値が120以上の場合は海成、Z 値が120未満の場合は淡水成タイプになるといわれ ている(Keith and Weber、1964)。

この判別式を用いて、第 14 図の 5)の Vieira et al.(2006)らの 2 試料(No.7[δ ¹³C=-7.35、 δ ¹⁸O= -4.41]と No.8[δ ¹³C=-7.80、 δ ¹⁸O=-4.33])を 計算すると、

No.7 はZ=110.1、No.8 はZ=109.2

となり、このZ値の結果からも両者が海成でないこ とが推定できる。さらに、平均値(δ^{13} C=+2.3、 δ^{18} O=-0.22)を用いて同様に求めると、Z=131.9 と



第14図 第6表の研究グループごとのビーチロッ クの炭素・酸素安定同位体比の範囲 1)Holail and rashed,1992 2)Beier,1985 3)Holail et al.,2004 4)Calvet et al.,2003 5)Vieira et al.,2006 6)Magaritz et al.,1979 7)Ferreira et al.,2013 8)Kumar et al.,2000 9)Koeshidayatullah and Al-Ramadan,2014

		cements			calcarenite			fossil coral			fossil shell							
No.	Island/material	nr	max	min	avg	nr	max	min	avg	nr	max	min	avg	nr	max	min	avg	文献
1	West Kyushu	6	2.84	1.24	_								<u> </u>					寺田・松田,2001
2	* Yakushima	17	5.73	-2.61	2.88					3	2.76	1.27	2.12	_	_	-	_	MATSUSHITA et a/2013
3	Amami-Oshima					11	2.05	-2.06	0.45	8	1.79	-1.09	0.38	7	3.35	-0.02	1.22	
4	Kakeromajima					2	2.20	1.94	2.07	—	—	-	—	—	_	_	_	
5	Yoro Island					—	—	_	_	1	-1.65	-1.65	-1.65	_	_	-	_	(h=0005
6	Tokunoshima					6	2.62	-3.28	1.21	4	1.66	1.03	1.30	6	4.67	2.74	3.67	152005
7	Okinoerabujima					12	3.18	0.15	2.27	10	4.28	-0.94	2.11	6	4.77	1.33	3.56	
8	Yoronjima					14	3.82	1.57	2.66	3	2.77	1.34	2.01	3	4.27	3.02	3.64	
A	mami Islands					45	3.82	-3.28	1.73	29	4.28	-1.65	1.05	22	4.77	-0.02	3.02	
9	Iheyajima					4	3.86	2.05	3.00	7	2.19	-2.26	1.17	8	3.86	1.96	2.97	
10	Izenajima					3	1.42	0.53	1.02	1	-3.49	-3.49	-3.49	3	1.15	-5.15	-1.13	小元2005
11	Okinawajima					10	5.63	0.60	2.17	20	2.48	-4.44	0.25	25	4.11	-5.97	1.01	
12	Okinawajima et al	5	3.83	1.67	-													寺田・松田2001
13	Hamahigajima					-	—	—	—	2	1.36	0.50	0.93	2	2.72	2.00	2.36	
14	Kourijima					3	2.37	0.35	1.44	2	1.03	0.36	0.70	5	3.02	2.14	2.55	小元2005
15	Yagajijima					1	1.25	1.25	1.25	—	—	-	—	3	3.46	2.63	2.96	
16	Iejima					13	2.89	0.15	1.90	2	3.51	0.63	2.07	11	6.03	0.95	2.97	
17	Agunijima					3	1.59	1.18	1.32	1	0.16	0.16	0.16	2	3.42	2.72	3.07	
18	Kumejima					5	3.43	1.20	1.97	7	2.31	-2.08	0.28	7	2.54	0.52	1.98	
19	Ohjima					7	2.89	0.17	1.71	2	1.33	0.62	0.98	3	3.37	1.12	2.05	
20	Hatenohama					7	4.06	1.21	2.90	-	—	-	—	1	1.12	1.12	1.12	
21	Ohajima					-	—	-	—	—	—	-	—	3	3.06	2.21	2.76	1,752003
22	Zamamijima					2	3.15	2.28	2.72	2	6.83	2.74	4.79	10	5.07	1.18	3.32	
23	Tokashikijima						—	—	—	1	-0.59	-0.59	-0.59	1	2.89	2.89	2.89	
24	Akajima					-	—	—	—	1	0.00	0.00	0.00	1	3.27	3.27	3.27	
25	Gerumajima									1	-1.23	-1.23	-1.23					
Ok	inawa Islands					58	5.63	0.15	1.95	49	6.83	-4.44	0.46	85	6.03	-5.97	2.28	
26	Ikemajima					2	4.72	2.44	3.58	3	0.58	-3.01	-0.72	1	3.41	3.41	3.41	産業技術総合研2010、小元
27	Kurimajima					1	2.09	2.09	2.09	6	3.35	0.42	1.87	1	5.41	5.41	5.41	2005,2014
28	MiyakojimaA					1	-0.31	-0.31	-0.31	22	3.80	-12.07	0.20	3	5.19	3.07	4.22	産業技術総合研2010
29	MiyakojimaB					30	2.86	-2.54	1.15	25	3.54	-1.98	0.71	32	6.98	0.00	3.07	小元2005、
30	Taramajima					5	2.38	-0.16	1.61	1	-0.29	-0.29	-0.29	2	3.20	2.46	2.83	2010,2011,2014
31	Ishigakijima					8	9.40	-2.54	5.58	13	7.04	-1.10	2.16	9	9.40	1.92	5.07	
32	Taketomijima					3	4.11	2.95	3.34	2	4.09	1.74	2.92	1	5.16	5.16	5.16	
33	Kuroshima					5	1.95	0.98	1.54	-	—	-	-	1	2.91	2.91	2.91	
34	Haterumajima					3	3.30	2.48	2.83	2	1.81	1.40	1.61	8	4.45	2.09	3.48	小元2005
35	Kohamajima					1	1.82	1.82	1.82	—	—	-	-	1	2.53	2.53	2.53	
36	Hatomajima					-	-	-	-	—	—	-	-	2	4.93	3.41	4.17	
37	Iriomotejima					5	8.40	-0.37	3.31	3	2.44	0.51	1.68	4	8.37	3.50	5.46	
38	Yonagunijima					2	2.35	0.67	1.51	2	3.57	0.10	1.84	3	6.70	0.92	3.31	小元2005、木村ほか2002
Sak	ishima Islands					66	9.40	-2.54	2.34	79	7.04	-12.07	1.20	68	9.40	0.00	3.92	
	Total	28		*		169	9.40	-3.28	2.00	157	7.04	-12.07	0.90	175	9.40	-5.97	3.07	
	529	* Yak	ushima	のデータ	ヌはビー	・チロッ	クのセメ	ント物質で	ではなく、	割れ目	充填物(セ	!メント物質	[)のデー	タ				

第7表 ビーチロック類の試料別炭素安定同位体比(nr 試料数、max 最大値、min 最小値、avg 平均値、単位‰)

なり、セメント物質が海水から沈殿したとする Vieira et al.(2006)の結論と矛盾しない。

5 日本の炭素安定同位体比(δ¹³C)のデータ

日本でビーチロックのセメント物質の δ¹³C 値を 初めて報告したのは、堆積学研究をしていた寺田・ 松田(2001)と思われる。彼らは、西九州や沖縄島の ビーチロックを調査し、西九州の δ¹³C が温帯地域 6 地点で+1.24~+2.84‰、沖縄島の亜熱帯地域5 地点で、+1.67~+3.83‰の範囲内にあることを示 した。ただ、彼らのデータは個別の数値は明らかに されていない。また、ほぼ同時期に小元は、琉球列 島におけるビーチロックの較正年代値とδ¹³C 値を 続続と発表してきた(例えば、小元、2005、2010、 2011、2014)。

ここに、現時点の日本で報告されているビーチロ ックのδ¹³C値をその試料の種類別にすべて取り上 げ、数値処理を行った結果を第7表に示す。

第7表の測定物質の種類のうち、cements また は calcarenite はそれぞれセメント物質(28 個)と石 灰質砂岩(169 個)、fossil coral はサンゴ化石(157 個)、fossil shell は貝化石(175 個)、を示している。 このうち、石灰質砂岩、サンゴ化石、貝化石は小元 の一連の研究試料が多く、サンゴや貝は自身で石灰 設をつくり、石灰質砂岩は他の有機物を含むおそれ もあり、ビーチロックのセメント物質のものではな いのでこれの試料のδ¹³C値を元にしてビーチロッ クのCaCO₃の供給源を推定するには無理があると 思われる。また、第7表の屋久島のデータはビーチ ロックの試料ではないが、海岸部における花崗岩の 割れ目充填物(セメント物質)がMgカルサイトであ り、割れ目充填物の化学組成を調査し、δ¹³C値に よって充填物の起源を海水からと推定(Matsushita et al., 2013)しているので、ここに参考として含め ている。

このように日本の場合、ビーチロックの 8¹³C 値 のデータ数は多いが、ビーチロックのセメント物質 の組成やその 8¹³C を計測している例は西九州と沖 縄島周辺の 11 個(寺田・松田、2001)しかない。そ こで、このデータを前掲第 14 図のように、炭素・ 酸素安定同位体比の範囲として図示すると第 15 図 のようになる。

第15図によれば、δ¹³C値はおよそ+1~+4‰程



第15図 日本のビーチロックの炭素・酸素安定同 位体比の範囲(寺田・松田、2001のデータを筆者図化)

度の範囲にあり、この西九州(温帯)・沖縄島周辺(亜 熱帯)のビーチロックのセメント物質の起源は海成 であることが推測される。寺田・松田(2001)もビー チロックの形成主要因として、蒸発作用や海水起源 の間隙水の循環の影響を述べている。また、セメン ト物質の組成がアラゴナイトやMg カルサイトであ ると指摘していることと上記は矛盾しない。 炭素安定同位体比からビーチロックの CaCO₃の 供給源を探る場合、今後日本では各地のセメント物 質の組成分析とδ¹³C 値データの蓄積が求められ る。

V ビーチロック研究の今後の展望

本報告では、現在におけるビーチロック研究の最 新の成果を紹介した。さらに、日本列島の 500 を 超えるビーチロックの δ^{13} C 値の数値処理を行った データを提示した。ビーチロックの成因については セメント物質の分析を行い、その安定同位体比を測 定して CaCO₃の供給源を推定するのに有効となる 資料(第 14 図)も作成した。

今後、外国のようにセメント物質を特定し、その 安定同位体測定値が蓄積されれば、両者によりビー チロックの CaCO3の供給源が予測可能になり、ビ ーチロックの形成機構の解明にも役立つと思われ る。

また、前述のように、ここ 10 年ほど地盤工学系 の研究者がビーチロックの特性(現地の堆積物が自 然に固まる、固化スピードが早くある程度の固さを もつ、など)を利用した人工岩の開発研究を進めて いる。最近の大規模地震・風水害による災害等で生 じる液状化や堤防・護岸破壊、海岸の浸食防止など に役立つ人工岩の開発のために、ビーチロックの形 成機構の解明は非常に重要なものになろう。

ビーチロックの成因解明により、地理学における 基礎的研究成果が応用工学に利用され、国土の強靭 化対策に生かされることが期待される。

注

- 1) GeoRef とは、アメリカ地質学研究所が編集す る地質学・地球物理学関係のデータベースのタイ トルである。一部の資料では北米資料は1785 年 から、全世界の資料は1933 年からそれぞれ現在 まで収録されている(慈道、1996)。
- 2)日本でも、海洋のδ¹³C変動は環境変動のメカ ニズムを探る上で重要な手がかりを与え、このよ うな関心から炭酸塩のδ¹³Cデータが質的にも量 的にも拡大してきたといわれている(松本、

1995)。

- OED とは、Oxford English Dictionaryの略 で、英語の語源も収録されている。その中に、
 beach rockの項目があり、Daly(1919)が使用し たことが述べられている。
- Darwin Online のように、著作権の消失した 後の書籍が収録されているフリーサイトや Atoll Research Bulletin、Geol.Survey Prof.Paper な どのような研究会や機関が最新号まで pdf で発信 されている。また、J-Stage や大学等のリポジト リで学術成果物をほぼ無償で閲覧できる。
- 5) インターネットは検索が容易で、しかも求めて いる文献が国内のどの大学・研究機関の図書館に あるかを探してくれるサービスもある。
- 6) Beaufort(1774~1857)は、風力階級を考案したことで知られる。
- 7)国土地理院の日本の典型地形九州地方のサイト に地名で載っている。
- 8)第4図の★21)は五島列島最北端の宇久島(松井、1990)、★22)は九州南端の佐多岬(鹿児島県、2004)で報告されているビーチロックである。
- 9)一番南南東の地点1の最大礫の見かけの体積の 平均は約584.9cm³、地点2は約424.1cm³、地点 3は約1,239.7cm³、北北西の地点4は約 5,008.4cm³であった。よって、一部の礫は南南東 側からももたらされている可能性も指摘できる。
- 10) 1960 年代にビーチロックの成因について、地 下水成因説を唱えた代表的人物は米谷と交流も行 っていたアメリカの Russell(1962、1967)であっ た。
- 11) その際に助言したビーチロックの室内固化実験の結果が後に日本土木学会で口頭発表された()川上ほか,2002)。これが筆者の知る限り、地盤工学(土木工学)系の研究者のビーチロックを模した人工岩研究の始まりだと思われる。さらに、2008年にやはり沖ノ鳥島の護岸工事を行っていた技術者が筆者の勤務校に来校され、ビーチロックの特性やサンプルについて助言を行った。その際の結果は後に日本土木学会論文集に掲載された(野口ほか、2010)。

- 12)川崎の研究室にいた檀上とともに内外の研究会 で発表し、多くの論文が出されたが、数が多いの で、本論文で引用されている文献の他は省略する。
- 13) ビーチロックは自治体の天然記念物となっている例もあり、現地調査に許可が必要な場合がある。
- 14) 207 編の論文の中に、日本および日本語の論文 は含まれていない。

文献

- Agassiz, A.(1895): A visit to the Bermudas in March, 1894: *Mus. Comp.Zoology, Bull*.26(2), pp.209-279.
- 荒巻 孚・山口雅功・田中好國(1976):鹿児島県、 上甑島における甑四湖の水文地形学的研究、専修 自然科学紀要9、pp.1-80.
- 東 洋一・藤井昭二・畑中 忞・竹山憲一(1982):北 陸地域にみられるビーチロックについて、第四紀 研究 20(4)、pp.271-280.
- Beaufort,F.(1817): Karamania, Or, A Brief Description of the South Coast of Asia-Minor and of the Remains of Antiquity: With Plans, Views, &c. Collected During a Survey of that Coast, Under the Orders of the Lords Commissioners of the Admiralty, in the Years 1811 & 1812, Printed for R.Hunter,309p.
- Beier, J.A. (1985): Diagenesis of Quaternary Bahamian Beachrock: Petrographic and Isotopic Evidence, *Journal of Sedimentary Petrology* 55(5), pp.755-761.
- Calvet, F., Cabrera, M.C., Carracedo, J.C., Mangas, J., Perez-

Torrado, F.J., Recio, C., Trave, A. (2003): Beachrock s from the island of La Palma (Canary Islands, Spain), *Marine Geology* 197, pp. 75-93.

- Cloud,P.E.Jr.(1959)Geology of Saipan,Mariana Islands, Part 4.Submarine Topography and Shoal-Water Ecology. *Geological Survey Prof. Paper* 280-K,pp.361-445.
- Daly,R.L.(1919) : Origin of beach-rock, *Carnegie* Institution of Washington Yearbook 18, p. 192

檀上 堯・川崎 了(2011):ビーチロックを模擬した
 人工岩の開発に関する基礎的研究―沖縄本島ビー
 チロックの力学試験およびその分析ー、Japan
 Geoscience Union Meeting2011、HCG036-P06.

檀上 堯・川崎 了(2012a):文献調査によるビーチ ロックの諸特性-ビーチロックを模擬した人工岩 の開発を目指して、応用地質 53(3)、pp.129-141.

檀上 堯・川崎 了(2012b):沖縄本島ビーチロック の物理・力学特性、応用地質 53(4)、pp.191-200.

Danjo,T.and Kawasaki,S.(2012):Property evalution of beachrock based on field investigation in Okinawa Island, *Japan, Harmonishing Rock Engineering and the Environment-Qian & Zhou(eds)*,pp.949-952.

檀上 堯・川崎 了・畠 俊郎(2012):ビーチロッ クのセメント物質含有量と一軸圧縮強さの相関に 関する検討、平成24年度日本応用地質学会北海 道支部・北海道応用地質研究会合同研究発表会、 2p.

檀上 堯・川崎 了(2013):セメント物質に着目し たビーチロックの形成メカニズムに関する考察, Journal of MMIJ129(7),pp.520-528.

Danjo,T.and Kawasaki,S.(2013):A Study of the Formation Mechanism of Beachrock in Okinawa,

Japan:toward Making Artificial Rock, *Int. J.of Geomate*5(1),pp.634-639.

檀上 堯(2015):ビーチロックの形成機構に学ぶ人 工岩の開発に関する基礎的研究,北海道大学工学 博士論文,155p.

David,P.,Panagiotis,T.and Konstantinos,A. (2009):Electrical resistivity tomography mapping of beachrocks: application to the island of Thassos(N.Greece), *Environmental Earth Sciences*59,pp.233-240.

Darwin,C.(1841) : On a remarkable Bar of Sandstone off Pernambuco, on the Coast pf Beazil, *Philosohical Magazine and Journal of Science, 19(124)*,pp.257-260. Darwin, C.(1842) : *The Structure and Distribution* of *Coral Reefs*.(Reprinted 1976 by Univ. California Press from 1851 ed.,239p.)

Diez, B., Bauer, K. and Bergman, B. (2007): Epilithic Cyanobacterial Communities of a Marine Tropical Beach Rock (Heron Island, Great Barrier Reef): Diversity and Diazotrophy , *Applied and Environmental Microbiology* 73(11), pp. 3656-3668.

Emery,K.O.(1962):Marine Geology of Guam , Geological Survey Professional Paper 403-B, pp.B1-B76.

Erginal,A.E.,Ekinci,Y.L.,Demicri,A.,Bozcu,M.,
Ozturk,M.Z.,Avcioglu,M.,Oztura,F.(2013):
First record of beachrock on Blck Sea coast of
Turkey: Implications for Late Holocene sea-level
fluctuations, *Sedimentary Geology* 294,pp.294-302.

Ferreira Jr, A.V., Araujo, T.C.M. and Sial, A.N. (2013):

Genesis of beachrock in coast of Pernambuco interpreted by isotopic studies. *Quaternary and Environmental Geosciences*4:9-16.

Friedman,G.M.(2004):Holocene

chronostratigraphic beachrocks and their geologic climatic significance , Geochemical Investigation in Earth and Space Sciences: A Tribute to Isaac R.Kaplan, Hill,R.J., Leventhal,J.,Aizenshtat,Z.,Baedecker,M.J., Claypool,G.,Eganhouse,R.,Goldhaber,M.,Peters

,K. Edi. Elsevier, pp.125-142.

Friedman, G.M. (2005): Climatic significance of Holocene beachrock sites along shorelines of the Red Sea, AAPG Bulletin89(7), pp.849-852.

Gardiner, J.S. (1903): Beach Sandstone. Being the Account of the Work carried on and of the Collections made by an Expedition during the years 1899 to 1900, Edited by J.S.Gardiner, M.A. *The Fauna and Geography of the Maldive* and Laccadive Archipelagoes, pp.341-346.

Gischler, E. (2007) : Beachrock and Intertidal

Precipitates. Edited by Nash,D.J, and McLaren,S.J. *Geochemical Sediments and Landscapes.* Blackwell, pp.356-390.

- Goudie, A.(1969) : A Note on Mediterranean Beachrock: Its history, Island News and Comment, *Atoll Research Bulletin* 126, pp. 11-14.
- Holail,H.and Rashed,M. (1992): Stable isotopic composition of carbonate-cemented recent beachrock along the Mediterrnean and the Red Sea coasts of Egypt , *Marine Geology*106 , pp.141-148.
- Holail,H.M.,Shaaban,M.N.and Mansour,A.S.
 (2004):Cementation of Holocene Beachrock in the Aqaba and the Arabian Gulfs : Comparative Study, *Carbonates and Evaporites*19(2), pp.142-150.
- 堀 信行・堀内公子・荒木 匡・寺井 稔
 (1972):Beach rock の発達とその成因について–
 与論島を例にしてー、日本地理学会予稿集 2、
 pp.16-17.
- 堀 信行・荒木 匡・寺井 稔・堀内公子(1973):ビ ーチロックの形成機構とその地形学的意義、日本 地理学会予稿集5、pp.51-52.
- 鹿児島県(2004):鹿児島湾沿岸海岸保全基本計画、 24p.
- 河内 諭(1974):サンゴ礁環境下の潮間帯と亜潮間 帯にみられる海中膠結作用ー奄美大島笠利半島東 岸の例ー、海洋科学6、pp.54-59.
- 川上 純・谷 卓也・小川豊和・柳澤 修(2002):
 室内ビーチロックの生成実験、土木学会第57回
 (平成14年9月)年次学術講演会57(2),pp.35-36.
- 川崎 了(2011):ビーチロック形成機構に学ぶ新しい 液状化対策技術に関する基礎的研究、公益財団法 人大林財団、平成23年度事業実施報告書、9p.
- 川崎 了(2012):ビーチロック形成機構に学ぶ新し い地盤固化技術の開発、前田記念工学振興財団、 平成24年度研究助成報告、6p.
- 川崎 了(2016):ビーチロックに学ぶ新たな地盤固 化・自己修復技術、北海道大学資源生物工学研究 室、Web 資料、labs.eng.hokudai.ac.jp/labo/bio

-res/www/reserch01.html(2016/12/3 閲覧)

- Keith,M.L.and Weber,J.N.(1964):Carbon and oxygen isotope composition of selected limestone and fossils, *Geochimica et Cosmorchimica Acta*28,pp.1787-1816.
- 木村政昭・安里嗣淳・中村俊夫・杉山真人・松浦暢 昌(2002):沖縄県与那国島トゥグル浜遺跡および ビーチロック類の年代測定、名古屋大学年代測定 総合研究センターXIV,pp.170-190.
- Koeshidayatullah,A.and AL-Ramadam,K.(2014): Unraveling cementation environment and patterns of Holocene beachrocks in the Arabian Gulf and Gulf of Aqaba: stable isotope approach, *Geological Quarterly*58(2),pp.207-216.
- 久保良介・川崎 了・鈴木浩一・山口伸治・畠 俊 郎(2013):物理探査を使用したビーチロックの地 下構造一沖縄県名護市屋我地島沿岸への適用一、 資源・素材学会 2013 (札幌) Py-01,1p.
- Kubo,R.,Kawasaki,S.,Suzuki,K.,Yamaguchi,S.and Hata,T.(2013):Geological structure of beachrock by geophysical exploration: application to Yagaji Island in Okinawa, Japan, *Proceeding of the 11th SEGJ International Symposium,Nroclaw,Poland*, 4p.

Kubo,R.,Kawasaki,S.,Suzuki,K.,Yamaguchi,S.and Hata,T.(2014):Geological Exploration pf
Beachrock through Geophysical Surveying on Yagji Island,Okimawa,Japan, *Materials Transations*55(2),pp.342-350.

- Kumar,B.,Rajamanickam,G.V.andGujar,A.R.(200 0)
- :Isotopic Studies of Beach Rock Carbonates from Konkan, Central West Coast of India, Proc. Int.Quat.Seminar on INQUA Shoreline Indian Ocean Sub-Commission, pp.167-170.
- Longhitano,S.(2001-2002) : Sedimentary features of incipient beachrock deposits along the coast of Simeto Riverd elta(easternSicily,Italy) 、 *GeoActa*,1、pp.95-110.

Magaritz, M., Gavish, E., Bakler, N. and Kafri, U. (1979): Carbon and oxygen isotope composition; indicators of cementation environment in Recent, Holocene, and Pleistocene sediments along the coast of Israel, *Journal of sedimentary Petrology*49(2), pp.401-412.

- Magaritz,M.(1983) : Carbon and oxygen isotope composition of recent and ancient coated grains, Peryt,T.M.ed. *Coated Grains*,Springer-Verlag, Heiderberg,pp.27-37.
- 松井和典(1990):小値賀島及び肥前平島地域の地 質、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、地 質調査所、63p.
- 松本 良(1995):<13>C 異常の要因と新しいパラダ イム「ガスハイドレート」仮説、地質学雑誌 101、pp.902-924.
- 松尾禎士(1989): 『地球化学』、講談社サイエンティフ ィク、276p.

Matsushita,T.,Osada,M.,Takahashi,M.and Fujii,Y. (2013):A study on the environment and time of precipitation of fracture fillings in rock on coastal outcrops of Yakushima Island, Japan,

Research Report of Department of Environmental Engineering, Saitama Univ. 39, pp.45-54.

- 目崎茂和(1981):ビーチロック、町田貞・井口正男・ 貝塚爽平・榧根勇・佐藤正・小野有吾編『地形学 辞典』二宮書店、p.511
- 三浦 真・千田 昇(1994):屋形島にみられるビー チロックについて、大分地理8、pp.1-6.

Moore,C.H.(2001) : *Carbonate reservoirs: prosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework*, Developments in Sedimentology55,Elsevier,444p.

- Moresby,Commander(1835):Extracts from Commander Moresby's Report on the Nothern Atolls of the Maldivas, *The Journal of the Royal Geographical Society of London*,pp.398-404.
- Neumeier, U. (1999): Experimental modelling of beachrock cementation under microbial

influence、*Sedimentary Geology*126,pp.35-46. 日本地理学会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、372p.

- 野口賢二・青木健次・板橋直樹・五味久昭・佐藤慎 司・渡邊国広・茅根 創(2010):サンゴ洲島の形 成・存続条件としてのビーチロック、土木学会論 文集 B2,海岸工学 65(1)、pp.686-690.
- 小笠原 洋・吉富健一・次重克敏(2004):能登半 島、輪島市曽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、 pp.31-34.
- 奥村公男・吉岡易司・杉山雄一(1985):蒲江地域の 地質、地域地質研究報告、5万分の1図幅、地質 調査所、58p.
- 小元久仁夫(2005):南西諸島から採取したビーチロ ックの¹⁴C年代および安定同位体比(δ¹³C)、日 本大学文理学部自然科学研究所紀要 40,pp.1-27.
- 小元久仁夫(2010):宮古島で観察された石灰華段、 津波石および膠結海浜砂層の特徴、日本大学文理 学部自然科学研究所紀要 45,pp.83-94.
- 小元久仁夫・中村俊夫・森 和紀・田中邦一・松田 重雄・大八木英夫・安谷屋昭・久貝弥嗣・新城宗 史(2011):宮古島平安名岬西方、ティダガー(太 陽泉)の石灰華段丘地形、堆積物の較正年代およ び水質分析の結果について、日本大学文理学部自 然科学研究所紀要 46,pp.25-48.
- 小元久仁夫(2014):沖縄県宮古列島から採取したビ ーチロック試料の較正年代、地理学評論 87(3)、 pp.267-275.
- 小元久仁夫・伊藤佑始(2016):長崎県天然記念物・ 脇岬のビーチロックの形成年代、地学雑誌 125(3)、pp.409-419.
- Revelle, R. and Emery, K.O. (1957): Chemical Erosion of Beach Rock and Exposed Rock, *Geological Survey Professional Paper 260-A*, pp. 699-709.
- Russell,R.J.(1962) : Origin of beach rock . Zeitschrift für Geomorphologie.v.6,1-16.
- Russell,R.J.(1967) : *River Plains and Sea Coasts.* Berkeley and Los Angeles,173p.

- 産業技術総合研究所(2010):宮古島断層帯の活動性
- および活動の履歴調査、『活断層の追加、補完調 査』成果報告書 H20-1:pp.1-108.
- 慈道佐代子(1996):GeoRef ネットワーク利用について、『静脩』京都大学附属図書館報 33(1)、Web 資料、www3.kulib.kyoto-u.ac.jp/bull/jpn/s33/ s33lb.htm(2016/12/3 閲覧)
- Simpson, J.A. and Weinner, E.S.C. (1989): The Oxford *English Dictionary* 2nd. Vol.2
- Stuvier, M. and Polach, H.A. (1977): Discussion reporting of 14C data, *Radiocarbon*19, pp.355-363.
- 鈴木浩一・川崎 了・久保良介・山口伸治・畠 俊 郎(2013):電気探査・表面波探査によるビーチロ ックの地下構造・沖縄県名護市屋我地島沿岸地点 での適用例、物理探査 66(4)、pp.277-285.
- 武永健一郎(1965a):与論島における beach rock と lagoon、地形研究 5、pp.1-30.
- 武永健一郎(1965b):Beach rock の成因について、地 理学評論 38(12)、pp.736-755.
- 田中好國(1978):Beach rock の成因と地形学的意義、鹿児島地理学会紀要 23(1・2)、pp.1-17.
- 田中好國(1983): ビーチロックの形成に関する一考察、地理科学 38(2)、pp.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、pp.16-30.
- 田中好國(1990):石になった砂浜・ビーチロック、日本地理学会サンゴ礁地域研究グループ編『熱い自然・サンゴ礁の環境誌』古今書院、pp.136-151.
- 田中好國(1994):サンゴ礁地域における微地形・ビー チロックのターミノロジーと研究小史、兵庫地理
 - 39、pp.1-12.
- 田中好國(1995):ビーチロックの研究小史、地理科 学 50(1)、p.45
- 田中好國(2016):インターネットを活用した文献検 索・収集・とくに古いビーチロックの文献を収集 するために、兵庫地理学協会 2016 年度夏季研究 大会、発表資料(未公表)
- 田中好國・沖野新一・水木崇行(2016):四国、伊予 市森海岸のビーチロック・温帯域のビーチロッ

ク、愛媛の地理24、pp.23-29.

- 寺田緑・松田博貴(2001):温帯域と亜熱帯域で見られるビーチロックの比較と成因、堆積学研究 53、 pp.96-98.
- 寺井 稔・荒木 匡・堀内公子・太田直一(1985):ビ ーチロックの生成機構、聖マリアンナ医科大学紀 要14、pp.155-161.
- 利光成一・尾崎正紀・川辺禎久・川上俊介・駒澤正 夫・山崎俊嗣(2004):20 万分の1 地質図幅「甑島及 び黒島」、産業技術総合研究所地質調査総合センタ 一、7p.
- Turner,R.J.(2005):Beachrock : Schwartz,ML,ed., Encyclopedia of Coastal Sciences , Kluwer Academic Publishers,The Netherlands, pp.183-186.
- Vousdoukas, M.I., Velegrakis, A.F and Plomaritis, T.A. (2007) : Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts, *Earth-Science Reviews* 85:, pp.23-46.

Vousdoukas1,M.I., Adonis F. Velegrakisa, Areti Kontogiannia and Efstratia-Natalia Makrykosta (2009) : Implications of the cementation of beach sediments for the recreational use of the beach , *Tourism Management*30(4), pp.544-552.

- Vieira,M.M.,Sial,A.N. and De Ros,L.F.(2006): Origin of Holocene Beachrock Cements in Northeastern Brazil, Revealed from Carbon and Oxygen Isotopes, *XLIII Congresso Brasileiro de Geologia*, Resumo,pp.428-431.
- Webb,G.E.,Jell,J.S.and Baker,J.C.(1999): Cryptic intertidal microbialites in beachrock, Heron Island, Great Barrier Reef: implications for the origin of microcrystalline beachrock cement, *Sedimentary Geology* 126,pp.317-334.
- 米谷静二(1963a):ビーチロックについて一海岸地形の新述語一、地理18、pp.863-867.
- 米谷静二(1963b): 奄美大島本島北部におけるビー チロックの予察的研究、地理学評論 36(9)、 pp.519-527.

米谷静二(1966):ビーチロックとその類似地形、地 理学評論 39(4)、pp.240-250.

米谷静二(1982): 奄美諸島におけるビーチロック、 九学会連合奄美調査委員会編『奄美』弘文堂、 pp.22-27.

(たなか よしくに、

元兵庫県立播磨特別支援学校)

Recent Studies of Beach rock

-beach rock in a temperate region, physical and mechanical properties and stable carbon isotope($\delta^{13}C$)-

TANAKA Yoshikuni (Pref.Hyogo Harima Special Needs School, ret.)

Beach rock is characteristic layered calcareous beach sediment that has been cemented by in situ calcium carbonate cements within the intertidal and supratidal zones of mainly tropical and subtropical beaches of the world. Loose beach sediments can be cemented into beach rocks very rapidly. The importance of beach rocks is based upon three main topics, 1) their impacts on coastal evolution, 2) their role as sea-level indicators,3) coastal processes of cementation and paleo-environmental evolution (David et al.,2009).

In this report, the author introduce recent studies of beach rock, these are beach rock in temperate region of East Kyushu (Chapter II), physical and mechanical properties of beach rock (Chapter II), and stable carbon isotope of beach rock (Chapter IV).