

沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島から採取した ビーチロック試料の較正年代と安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$)

小元 久仁夫

Calibrated Radiocarbon Ages and Isotope Fractionations of Beachrock Samples Collected from Okinawa Island, Kouri Island, Yagachi Island and Hamahiga Island, Southwest Japan

Kunio OMOTO

(Received October 31, 2008)

A total of eighty-one calibrated radiocarbon ages and isotope fractionations of beachrock samples collected from Okinawa Island, Kouri Island, Yagachi Island and Hamahiga Island were analyzed in order to determine formative ages of beachrocks and to discuss the origin of calcium carbonate, sea-level change, and tectonic movement in the late Holocene.

The first beachrock began to form at about 7,800y Cal BP on Kushibihamaru, on the west coast of Okinawa Island. The formative periods of beachrocks on Okinawa Island were divided into four stages, i.e. ca. 7,800y Cal BP, 5,800y Cal BP, between 5,300y Cal BP and 4,800y Cal BP, and between 4,300y Cal BP and the present time, respectively.

The figures of the maximum, minimum and average isotope fractionations ($\delta^{13}\text{C}$) for beachrock samples were 5.63‰, -5.57‰ and 0.83‰, respectively. Thirty-eight samples were outside of the range of $\delta^{13}\text{C}$ value ($0 \pm 2\%$) given for marine organism (Geyh and Schleicher, 1990). The deviation of isotope fractionation outside of the normal range for marine organisms suggests that calcium carbonate which cemented soft beach sediments into hard beachrock might have been brought about not only by marine origin but also through the surface or ground water system.

Relative sea level of the late Holocene in the southern and middle part of Okinawa Island was obviously higher than that of the present level. The higher sea-levels have been probably caused by the sudden uplifts which occurred later than about 3,000y Cal BP and about 800y Cal BP, respectively. These uplifts might have been triggered by huge earthquakes that occurred to the southeast of Okinawa Island and the amount of each uplift reached about 1 ~ 1.5 meters. While in the stable coasts, the sea level has remained similar to the present level for at least the past 6,000 years.

Keywords: Okinawa Island, beach rock, sea-level change, Holocene, radiocarbon age, isotope fractionation ($\delta^{13}\text{C}$)

I. はじめに

ビーチロックは熱帯や亜熱帯の砂浜海岸において、潮間帯の未固結の海浜堆積物が炭酸カルシウムによって膠結されたものである (Higgins, 1968)。ビーチロックは、わが国では南西諸島の多くの島々で見られ (米谷, 1963)、化石サンゴ、貝化石、大型有孔虫などの生物遺骸を含んでいることが多い。これらを試料として採取し ^{14}C 年代測定を行うことにより、ビーチロックの形成年代が、またその分布高度と年代を使用して海水準変動や地殻変動を明らかにすることができる。

^{14}C 年代を用いて海水準変動や地殻変動について細密

な議論を行うためには、正確な ^{14}C 年代と高度に関するデータを収集しなければならない。すなわち最適な試料の採取と慎重な年代測定、そしてレーザーレベル等による精密な地形測量が不可欠である。さらに正確な実年代 (暦年代) を得るためには、個々の試料について安定同位体比を質量分析装置によって測定し、同位体分別効果を補正した年代 (conventional age) を使用しなければならない (Stuiver and Polach, 1977)。その理由は、試料とした物質により安定同位体比が+60‰~-60‰ PDBの範囲 (Vogel and Ehhalt 1963, 木越 1976, Stuiver and Polach 1977, Olsson 1980, Geyh and Schleicher 1990など) に存在し、年代に換算して約1,500年~-540年 (Omoto, 2006b)

の年代差を生ずるためである。さらに conventional age を暦年代に校正する際に試料が海洋生物の場合、平均 400 年の “reservoir correction” が必要である (Stuiver and Braziunas, 1993)。

沖縄島のビーチロックについて砂村 (1983) は 60 余例の存在を報告した。Kawana (1981) および Kawana and Pirazzoli (1985) は沖縄島の 6 地点から採取した 8 個のビーチロックの ^{14}C 年代を報告した。小元ほか (2003) は沖縄島の 23 地点から採取した 35 個の試料中、西海岸から採取した 20 試料を用いて、沖縄島西岸におけるビーチロックの形成年代 (conventional age) を報告した。その後小元 (2005) は南西諸島のビーチロックの年代を報告した中で、沖縄島に関する合計 59 試料の conventional age を報告した。さらに小元 (2007) は、沖縄島本部半島北西端の備瀬岬から採取したビーチロックの年代が南西諸島で最古の歴年代であることを報告した。

沖縄島のビーチロックの形成年代に関する上記の研究や、後述の海水準変動に関する研究報告 (河名, 1993, 2002; 小元, 2005, Omoto, 2006a) において使用された年代は、安定同位体未補正年代もしくは “conventional age” にもとづいている。これまでの先行研究において沖縄島全域にわたる (1) ビーチロックの形成年代と年代決定に使用された試料の吟味, (2) ビーチロックの形成年代, すなわち海浜堆積物を膠結させたとされる炭酸カルシウムの起源, (3) 後期完新世における海水準変動および地殻変動—などについて、暦年代に校正した年代や安定同位体比にもとづいた考察や報告は行われていない。

このため本論では、既存の報告 (小元ほか, 2003; 小元, 2005, 2007; Omoto, 2004a, 2004b, 2006a, 2006b) から沖縄島と近隣の古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島のビーチロックに関する ^{14}C 年代および $\delta^{13}\text{C}$ 資料を抽出し、総数 81 件のデータを準備した。本論ではこの年代資料を CALIB program Rev.5.0 により暦年代に校正した年代をもとめ、安定同位体比の資料と合わせて、上掲 (1)~(3) について解明することを目的とした。この研究目的を設定するにあたり検討した先行研究の問題点については次節において詳述する。

II. 先行研究の問題点とその吟味

1. ビーチロックの形成年代を決定する試料

ビーチロックを構成する未固結の細粒堆積物を膠結した物質が次節で述べるように aragonite や calcite であれば、これらを分離して微量の炭素でも年代測定が可能な AMS による年代測定 (小元, 2002) を行えば、ビーチロッ

クの形成に直接関わった物質の年代や安定同位体比を正確に決定できる (小元, 1999a)。しかし (電子) 顕微鏡下でビーチロックの細粒堆積物表面に付着する aragonite と calcite を判別・分離して採取する手法は未だ確立されていない。このためビーチロックの形成年代は、ビーチロックに含まれる貝化石や化石サンゴ, 大型有孔虫または石灰砂岩などを試料として年代を決定せざるを得ない。これらの物質は、炭酸カルシウムを主成分とするため ^{14}C 年代測定試料として良好な試料である。石灰砂岩 (または石灰礫岩) の年代を使用する場合、その年代が化石サンゴや貝化石に比べて最大でおよそ 200 年古い方にずれる場合がある。その理由は、石灰砂岩を構成する細粒物質自体が、貝化石や化石サンゴが海岸に漂着する以前からすでに存在していたことによる。

厳密に言えばビーチロックが形成された「膠結年代」と、貝化石や化石サンゴの死亡年代との間には時間差がある。すなわち生物が死亡後に生息地点から汀線まで運搬され、膠結するまで経過時間が生ずるからである (小元, 1995, 1997b)。この経過時間について米谷 (1963) は 200 年以内、武永 (1965) は、100 年以内 (もっとも短い場合は数週間ないし 1 シーズン)、また Higgins (1968) は Russell (1959) の論文を引用しておよそ 10 年以内とそれぞれ推定している。これらの報告から、ビーチロックがきわめて短時間で形成されることは明らかである。

多くのビーチロックは陸側から順次海側に向かって傾斜する「ミクロケスタ状」もしくは「将棋倒し構造」を呈している。地層累重の法則から、ビーチロックのスラブ (膠結単層) がミクロケスタ状地形 (陸側から海側に将棋倒し構造の地層) を示す場合、そのビーチロックは陸側から順次海側に向かって形成されたと考えられる。ビーチロックの陸側と海側、あるいは上・下端から採取した試料の年代測定結果 (Kawana and Pirazzoli 1984, 小元, 1999a, 2008) は、上述の推定を実証している。このような結果にもとづき、ビーチロックの形成開始年代を求めためには、もっとも陸側のスラブから年代測定試料を採取しなければならない。

ビーチロックから採取した貝化石, 化石サンゴ, 石灰砂岩, 石灰礫岩などを試料としてもとめた ^{14}C 年代について、それぞれの試料について安定同位体比を測定し conventional age を決定し, reservoir effect を補正し, さらに暦年代に校正した年代は、ビーチロックの形成年代, 海水準変動, 地殻変動などの研究に十分使用できる。

2. ビーチロックの膠結物質とされる炭酸カルシウムの起源

ビーチロックの成因について、構成物質の実体顕微鏡や電子顕微鏡下での観察、化学成分分析およびX線分析などにもとづく研究が行われてきた。その中でStoddart and Cann (1965) は未固結の海浜物質を膠結した炭酸カルシウムの起源を、①海水、②地下水、③海水および地下水、④その他に区分し、海水起源の aragonite が海浜堆積物の粒子表面に付着して粒子間の膠結が始まり、続いて void filling により淡水に含まれる calcite によって粒子間の空隙が充填されるという説を提唱した。この考え方は多くの研究者によって支持されている。その後田中 (1994) は、ビーチロックの研究史を紹介後、地下水起源説よりも海水起源説が有力視されていると報告した。

Omoto (2001) は、未固結の海浜堆積物を膠結しビーチロックを形成した炭酸カルシウムの安定同位体比が海水起源と陸水起源では異なるため、炭酸カルシウムの安定同位体比を測定すればその起源を突き止めることができると考えた。すなわち炭酸カルシウムの起源が海水起源であれば、その安定同位体比は海水中の炭酸塩や有機物の安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) の平均値である $0 \pm 2\%$ の範囲 (Geyh and Schleicher, 1990) に存在する筈である。もしも $0 \pm 2\%$ の範囲から大きくはずれる試料があれば、その試料は100% 海水起源とはみなせず、地表水や地下水の影響を受けて生育してきたことを示唆 (Omoto, 2004b) しており、その影響はビーチロックの形成にまで及んでいる可能性が考えられる。

上記の考え方を実証するためには、野外調査を行いビーチロックの特徴と汀線付近における地下水や湧水状況を観察し、さらに試料を採取してその安定同位体比を測定することが不可欠である。ビーチロックの安定同位体比のデータと汀線付近における地下水や湧水状況に関する多数の資料を収集することにより、ビーチロックの形成に関わる炭酸カルシウムの起源をより一層明らかにすることができると考えられる。沖縄島は南西諸島のなかでも最大の面積を有する島であり、多数のビーチロックが分布しているため、本研究にとって最適な島のひとつであると位置づけられる。

3. 海水準変動または地殻変動の証拠と精度

ビーチロックは潮間帯で形成されるため、その分布高度と年代は過去の海水準変動や地殻変動の研究にとって有効な示標である。しかし潮位変化が大きい場合には、海水準変動や地殻変動を細密に論ずることはできない。田中 (1978) は「beach rock も notch と同じようにその垂

直上限高度がほぼ中等潮位を示す」と考えた。沖縄島の場合、那覇港における朔望平均満潮位と朔望平均干潮位の潮位差は208.4cm [(財) 日本気象協会沖縄支店 2003] に達する。この潮位差と、ビーチロックの分布高度 (上限及び下限) の平均値、そして試料の年代の精度がビーチロックを使用して海水準変動や地殻変動を論ずる際に重要な因子となる。本論ではビーチロック形成時の海面を中潮位と仮定して海水準変動を考察する。このため海水準の精度は上述の潮汐データから約 $\pm 1\text{m}$ となる。

沖縄島には過去の相対的海水準変動を示す海成段丘や離水したノッチが発達していることがこれまで多数の研究者によって報告 (木庭, 1980; Kawana and Pirazzoli 1985; 河名, 1993, 1996, 2002; 河名・菅, 1996, 1999; 町田, 2001, 町田ほか, 2001; 太田ほか, 2001 など) されている。沖縄島の完新世における海水準変動の研究は、これまで河名 (1993) および河名・菅 (1996) により行われ、その後河名 (2002) によって6回の海面安定時期 (I: 約7,700 ~ 7,000年, II: 7,000 ~ 6,300年, III: 5,900 ~ 4,500年, IV: 4,400 ~ 3,300年, V: 2,900年~, およびVI: 少なくとも690年~現在) と、相対的海水準が順次高度を減じIVからVIの時期には現海面下まで海退した可能性が指摘された。

河名 (1993) の報告は、おもに離水したノッチの後退点高度と離水サンゴ礁の ^{14}C 年代にもとづいているが、 ^{14}C 年代については安定同位体比による補正や“reservoir correction”が行われていないため時間尺の正確さに欠ける。また河名 (2002) は、化石サンゴの年代を暦年代へ較正するにあたり、 $\delta^{13}\text{C} = 0 \pm 2\%$, $\Delta R = 0$ (海洋リザーバー効果) として INTCAL 98 で最頻値をもとめて考察している。 ^{14}C 年代を補正して完新世の海水準変動について詳細な考察を行うのであれば、個々の試料について安定同位体比を測定し同位体補正を行うべき (Stuiver and Polach, 1977) である。

また河名 (1993) は、3,000年前頃から2,000年前頃にかけて約2mの海水準低下を図示し、河名 (2002) では4,400年前から現在までの間に、現海面下まで達する海退の可能性を指摘した。どちらかといえば海成段丘や離水したノッチが多数みられる沖縄島において、後期完新世において現海面下まで海水準が低下したという指摘は注目値する。しかしながら6,000 BP以降に地球規模で海水準が1,000年あたり1~2mのオーダーで変動したとは野上 (1977) が報告したように氷河性海面変動では説明できない。また海水準変動を伴う世界的な気候変動も検出されていない。

沖縄島に海水準変動の記録が残されていれば、それが沖縄島固有の地殻変動による場合を除き、近接する島々

にも同様の記録が残されているはずである。しかしながら沖縄島以外の南西諸島の島々から採取したビーチロックの高度と年代(小元, 1994, 1995, 1997a, b, 1998a, b, 1999a-d, 2000a-c, Oomoto, 2001, 2003a, b, 2004a, c, 2005, 2007)からは、河名(2002)が指摘した時期に海水準が低下し、その後ふたたび現海水準まで上昇した証拠は見あたらない。このため沖縄島における完新世中期以降の海水準変動の時期と規模、およびその原因についての再検討が必要である。

III. 試料の採取と分析

1. ビーチロックの分布と特徴

小元は沖縄島、古宇利島、屋我地島および浜比嘉島の海岸線を路査し、ビーチロックの分布地点を調査した。しかし調査の際にすべての地点が大潮や干潮時でなかったことにより、低潮位以下に分布するビーチロックを見落とされた地点があるかもしれない。かつて砂村(1983)が指摘した60余例には到底及ばなかったが、その半数近い28地点(第1図)でビーチロックを確認した。ビーチロックの分布は西海岸に偏在しているが(第1図)、その原因については後で検討する。

分析試料はおもに中潮位から高潮位の範囲で採取した。その理由は、中潮位以下のビーチロックは大部分が緑色の海草(アーサ)に覆われていて試料を探し出せなかったことによる。もちろんビーチロックの形成開始年代を決定するため、できるだけ陸側のスラブから試料を採取した。その結果、試料採取地点の高度は約3mから-3mまでの範囲に及んでいる。なお試料採取地点の高度は、レーザーレベルやトータルステーションを使用して基準点から測量し、あるいは那覇港の潮汐データにもとづき平均海面高度(TP)に補正した。試料は貝化石や化石サンゴがあれば優先して採取し、これらを発見できない場合は石灰砂岩(または石灰礫岩)の細粒物質を採取した。また年代や安定同位体比を確認するため、同一地点から複数の試料を採取した地点も多数存在する。

試料採取地点は西海岸(黄海)側が24地点であり、東海岸(太平洋)側はわずかに4地点である。沖縄島でもっとも長いビーチロックは、大宜味村「喜如嘉」にあり、その長さは約800m以上に達し沖縄県の天然記念物になっている(写真1)。

ビーチロックの陸から海側への幅は、地点により数メートルから30m以上まで様々である。またビーチロックの海側への傾斜は5~7度のものが大半であり、最大でも12度未満である。ビーチロックは現在多くの地点において潮間帯で見られるが、その分布高度は地点によ

り異なり、沖縄島全体では前述のように海拔約3m(具志頭)から-3m(辺土名沖)までの範囲にある(第1表)。

2. 試料の採取と分析

試料は、小元ほか(2003)が報告した20地点以外に、糸満市の「名城ビーチ南部」、具志頭村の「具志頭」、東海岸(太平洋)側では宜野座村の「惣慶」および旧勝連町の「浜比嘉島南部」において採取した。沖縄島、古宇利島、屋我地島および浜比嘉島から採取したビーチロック試料の採取地名、試料採取者名、試料名および採取高度、ビーチロックの特徴、Lab. Code No.などを第1表にまとめて示す。

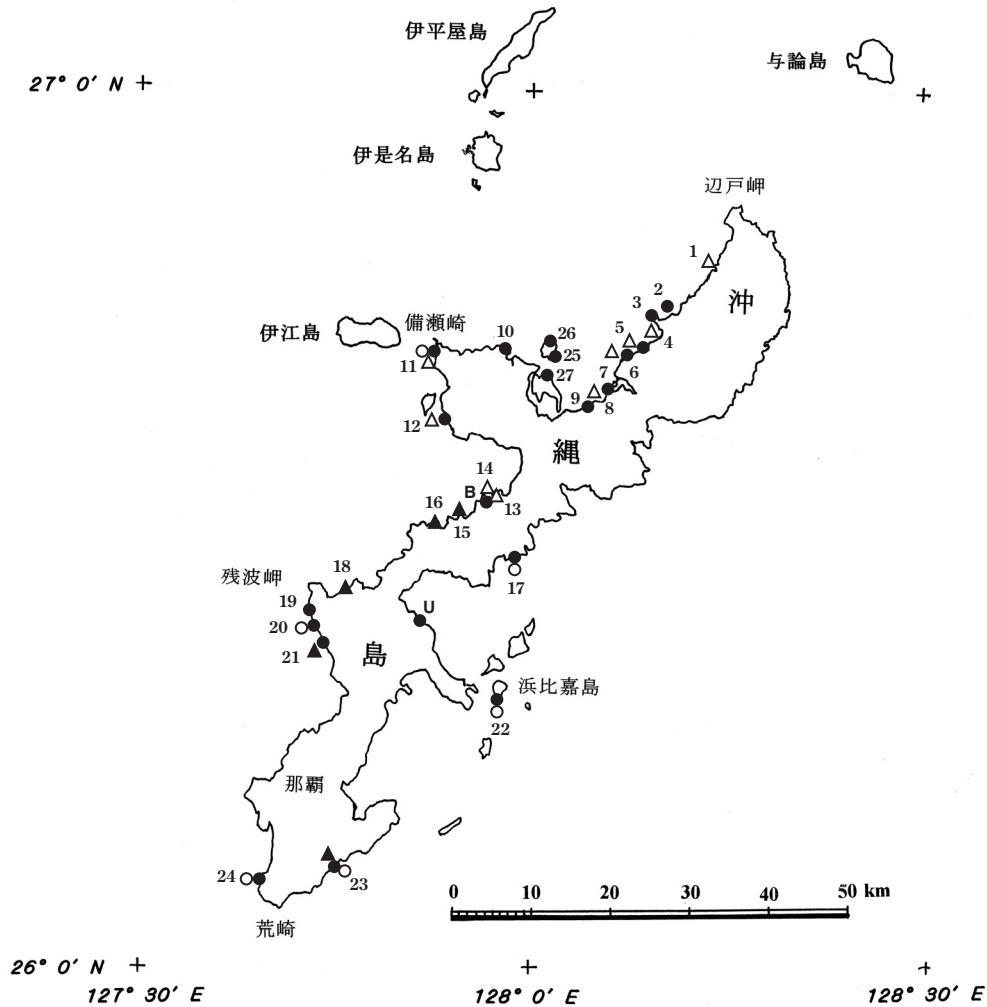
なお旧石川市の「石川」から採取した試料は、化学処理後に炭酸カルシウムの重量不足で β 線計測まで至らなかった。また喜屋武ではビーチロックの存在は確認したものの、ビーチロックが中等潮位以下の高度にあり、その大部分がアーサ(海草)で覆われているため良い試料を採取できなかった。本部半島北部の古宇利島では北部と東部の2か所にビーチロックがあり、屋我地島北部にもビーチロックが存在する(小元・紺野, 2006; 小元, 2007)。

採取した試料の種類別内訳は、石灰砂岩が14個、化石サンゴが31個、そして貝化石が36個の合計81個である。また試料採取者別の内訳は、児野(2003)が10個、神野(2003)が9個、そして小元が採取した試料は62個である。

採取した試料は、原則として各試料採取者自身が化学処理を行った。まず前処理で、試料表面の汚れを金属ブラシや電動グラインダー等で削り落とした後で、試料を2~4cm³の小塊に裁断し、その断面をルーペや実体顕微鏡で観察した。裁断面や表層部に変質部分や汚染部分があればその試料は除外した。試料の表層部が変質や汚染されていないと判断された試料は、0.5~1cm³前後の小塊にした。そしてその試料の表面を希塩酸(0.5~1N HCl)で溶解除去し、蒸留水で洗浄後に乾燥させた。乾燥した試料を電気炉に入れ、450℃で30分間保ち、化石サンゴ内部に付着している可能性のある有機物を焼却した。電気炉の電源を切って試料を冷却後、試料を鉄鉢で粉碎し粉末としてチャック付きビニール袋に入れ、計量後保管した。

前処理後、炭酸カルシウム生成までの化学処理、炭酸カルシウムから二酸化炭素の発生と貯蔵、二酸化炭素の精製までの実験は、日本大学年代測定マニュアル(小元, 1993)にもとづき行った。試料の β 線計測は、パーソナルコンピュータによる β 線自動計測プログラム(Omoto,

沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島から採取したビーチロック試料の較正年代と安定同位体比 ($\delta^{13}C$)



第1図 試料採取地点。図中の番号は第1表および第3表の番号に対応している。番号に相当する地名は次の通り。1：謝敷，2：辺土名，3：赤丸岬，4：浜，5：喜如嘉，6：根路銘，7：宮城島南部，8：津波，9：平安橋下，10：崎山，11：後備浜原，12：崎本部原，13：幸喜，14：喜瀬，15：安富祖，16：瀬良垣，17：宜野座，18：真栄田，19：儀間，20：都屋，21：渡具知，22：浜比嘉島南部，23：具志頭，24：名城ビーチ南部，25：古宇利島東部，26：古宇利島北部，27：屋我地島北部，B：万国津梁館，U：うるま市石川。

○はKawana and Pirazzoli (1985)，●は小元 (2005, 2007)，▲は神野 (2003)，△は児野 (2003) の試料採取地点を示す。

Figure 1. Map shows sampling sites of beachrocks. Figures on the map correlate Table 1 and 3 respectively. Locality names are following.

1: Zashiki, 2: Hentona, 3: Akamaru-misaki (Point), 4: Hama, 5: Kijoka, 6: Nerome, 7: South of Miyagi Island, 8: Tuha, 9: Below Heian Bridge, 10: Sakiyama, 11: Kushibihamabaru, 12: Sakimotobuhara, 13: Kouki, 14: Kise, 15: Asohu, 16: Watarase, 17: Ginoza, 18: Maeda, 19: Gima, 20: Toya, 21: Toguchi, 22: South of Hamahiga Island, 23: Gushikami, 24: Meijou Beach, 25: East of Kouri Island, 26: North of Kouri Island, 27: North of Yagachi Island, B: Bankokushinryokan, U: Ishikawa, Uruma City

○ marks were collected by Kawana and Pirazzoli (1985), ● marks were collected by Omoto (2005, 2007), ▲ marks were collected by Kanno (2003) and △ marks were collected by Chigono (2003) respectively.

1998および小元・陣野,1999) によって異なるカウンター (同容積のHoutermans Oeschger Type) を使用して2回ずつ行った。2回の計測値が $\pm 1\sigma$ に入らない場合は、更に別のカウンターを使用して3回目の計測を行った。通常2回の計測値は、その大部分が $\pm 1\sigma$ の統計誤差に入り、 $\pm 1\sigma$ の範囲をはずれても $\pm 2\sigma$ の誤差範囲には

ほとんどの試料が入った。このため2回の計測で $\pm 1\sigma$ の誤差範囲に計測値が入れば、その平均値を採用し、はずれれば3回目の計測を行い $\pm 1\sigma$ の誤差範囲に入る2個の平均値を採用した。

安定同位体比 ($\delta^{13}C$) は、 ^{14}C 年代測定に使用した二酸化炭素そのもの、または ^{14}C 年代測定のために化学処理



写真1 沖縄島で最大規模(長さ約800m)を呈し,天然記念物になっている「喜如嘉のビーチロック」
Photo1. The longest beachrock (ca. 800m in length) developed on the Kijoka coast, northwest Okinawa Island. Okinawa prefecture has designated this beachrock as a precious natural product.

して生成した炭酸カルシウムからクエン酸を使用して二酸化炭素を再発生させ,これを安定同位体測定用の容器に回収してMicromass社製のIsoPrimeを使用して測定した。 ^{14}C 年代測定で使用した標準試料はNIST(4990C)であり,また安定度同位体比($\delta^{13}\text{C}$)の校正にはIAEAおよびOztechの標準試料を使用した。

3. 安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)および ^{14}C 年代の補正

小元(2005)は,南西諸島の29島,152地点から採取した346個のビーチロック試料について,安定同位体比と ^{14}C 年代測定結果を報告した。この中から沖縄島で採取した59個と,その後年代を決定した22個を加味した合計81個のビーチロック試料について統計処理を行った。その結果,安定同位体比は5.63‰から-5.57‰の範囲にあり,その平均値は0.83‰となった(第2表)。試料別の数値は,石灰砂岩の最大,最小,平均値が,それぞれ5.63‰,0.35‰,1.95‰であり,化石サンゴの最大,最小,平均値は,それぞれ2.48‰,-4.63‰,-0.24‰である。また貝化石(大部分がシャコ貝)の最大,最小,平均値は,それぞれ4.11‰,-5.57‰,1.32‰となった。

この結果,試料別の安定同位体比の平均値は,石灰砂岩がもっとも高く,次いで貝化石(シャコ貝),化石サン

ゴの順となっている。安定同位体比にもとづき ^{14}C 年代の補正值を計算すると,508年から318年(平均426年)までの範囲(第2表)となる。

β 線計測によって得られた ^{14}C 年代について,個々の安定同位体比にもとづき年代を補正して“conventional age”をもとめ,この年代を“CALIB program Rev.5.0(Stuiver *et al.*, 2005)”に代入して校正し暦年代を得た(第3表)。沖縄島,古宇利島,屋我地島および浜比嘉島から採取したビーチロック試料の多くは化石サンゴや貝化石であるので,暦年代に校正するに際し“marine04.14c”のファイルを使用した。しかし沖縄島における海洋表層水と世界の海洋表層水の平均値との地域差である ΔR は,確定しているとは言えない状況のため補正しなかった。なお南西諸島では,Hideshima *et al.*(2001)が石垣島から採取したポーリングコアの化石サンゴ試料(*Porites* sp)から $\Delta R=35 \pm 25$ ^{14}C yr ($\pm 1\sigma$)の値を報告している。Omoto(2006b)によれば,南西諸島全体の $\Delta R=46$ (Nr=414) ^{14}C yr,沖縄島の $\Delta R=29$ (Nr=60) ^{14}C yrである。CALIB program Rev.5.0による補正では, $\pm 1\sigma$ および $\pm 2\sigma$ の年代範囲の校正結果が表示されるが,第3表にはその年代範囲のmedian value(中央値)を記載した。以後この値を用いて考察を行う。

第1表 沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島で観察されるビーチロックの特徴。小元 (2005) および小元 (2007) のデータから当該データを抽出した。

Table 1 Characteristics of beachrocks observed on Okinawa Island, Kouri Island, Yagachi Island and Hamahiga Island. Data source: Omoto (2005) and Omoto (2007).

No.	ビーチロックの分布地	長さ (m)	幅 (m)	傾斜 (°)	分布高度 (m.a.s.l.)	試料採取者氏名	試料採取高度 (m.a.s.l.)	試料の種類	採取数 (個)	Lab. Code No.
1	謝敷	255	16	5~6	0.5~0.1	児野 秀史	0.4	S	1	NU-1550
2	辺土名	200?	50?	?	-3.0~-2.0	小元久仁夫	-1.0~-3.0	C	7	NU-1600, NU-1602~1607
3	赤丸岬	250	30	5	-0.5~-1.5	小元久仁夫	-1	C	1	NU-1601
4	浜	205	17	5	0.8~0.2	児野 秀史	0.7	C	1	NU-1558
5	喜如嘉	600	20	7	0.8~-0.1	児野 秀史	0.8	S	1	NU-1551
					0.8~-0.8	小元久仁夫	0, -0.2	S	2	NU-1608~1609
6	根路銘	800	12	7	0.8~0.1	児野 秀史	0.8	C	1	NU-1555
					0.8~-0.8	小元久仁夫	-0.2	S	1	NU-1610
7	宮城島南部	500	50	6~7	0~-1.5	小元久仁夫	0.5~0	CN, C	4	NU-1591~1592, NU-1611~1612
8	津波	15	12	5	0.6~-0.4	児野 秀史	0.3, 0.6	C	2	NU-1554, NU1557
9	平安橋	20	4	3	0~-1.5	小元久仁夫	-0.4	C	1	NU-1613
10	崎山	200	20	6	1.5~-0.5	小元久仁夫	1.4, 1.3, 0.6, 0.5	CN, S, C	4	NU-1594~1597
11	後備浜原	265	45	6~7	1.1~-0.7	児野 秀史	1	S	1	NU-1549
					-0.5~-1.5	小元久仁夫	-0.8	CN	1	NU-1598
12	崎本部原	20	12	9	0.8~0.3	児野 秀史	0.6	S	1	NU-1552
					1.3~0	小元久仁夫	1.3	S	1	NU-1615
13	幸喜	50	2~7	8	0.5~-0.2	児野 秀史	0.2	C	1	NU-1556
14	喜瀬	150	15	5~6	1~0	児野 秀史	0.7, 1.0	S	2	NU-1553, NU-1559
B	万国津梁館	50	3	3~5	0.8~-0.7	小元久仁夫	0.4	S	1	NU-1599
15	安富祖	30	14	4	1.0~0.1	神野 賢一	1	C	2	NU-1545~1546
16	瀬良垣	20	13	3~4	1.4~-0.4	神野 賢一	1.3	S	1	NU-1544
17	宜野座	200	30	6~8	1.8~-0.5	小元久仁夫	1.0, 0.8, 0.7	S, C, CN	7	NU-1662~1668
18	真栄田	100	14	4	0.6~0.3	神野 賢一	0.5	S	1	NU-1547
19	儀間	150	25	3~4	1~-0.5	小元久仁夫	0.7, 0.1	CN, S	2	NU-1577~1578
20	都屋	150	30	5~6	2.0~0.4	神野 賢一	1.8, 1	S	2	NU-1540~1541
21	渡具知	16	6	3~4	0.7~-0.2	神野 賢一	0.6	C	1	NU-1548
					1.4~-0.6	小元久仁夫	1.1, 1.0, 0.9, -0.1	C, S	6	NU-1574~1576, NU-1694~96
22	浜比嘉島南部	80	19	8	2.0~0	小元久仁夫	1.8, 1.6, 1.5, 1.2	S, C	4	NU-1686~1689
23	具志頭	10	6	6	2.1~1.5	神野 賢一	1.5	S	1	NU-1542
					2.8~2.0	小元久仁夫	2.8~2.0	S, C	4	NU-1690~1693
24	名城ビーチ南部	5	3	2	0~-0.5	小元久仁夫	0	CN, S	2	NU-1669~1670
25	古宇利島東部	100	20	3~5	2.1~-0.9	小元久仁夫	1.1, 1.0, 0.2, 0.1	S, CN, C	8	NU-1736・37, 40・41, 69*, 75~77
26	古宇利島北部	10	3	3~5	0~-0.5	小元久仁夫	0	CN, C	2	NU-1738~1739
27	屋我地島北部	100	10	3	0.9~-0.9	小元久仁夫	0.4, 0.3, -0.1, -0.3	S, CN	4	NU-1742~1744, NU-1771*

注：試料の種類欄のSは貝化石, Cは化石サンゴ, CNは石灰砂岩を示す。*は小元・紺野 (2006) による。

なおKawana (1981)が備瀬 (N-3709), 宜野座 (N-3708), 都屋 (N-4265, N-4264 および N-4263) から採取した試料や, Kawana and Pirazzoli (1983)が浜比嘉島南部 (N-4262) および具志頭 (N-4390) から採取した試料は, 安定同位体比の補正や “reservoir correction” が行われていない。そこでこれらの試料の安定同位体比が, 同一地点から小

元, 児野, 神野のいずれかが採取した同種試料の安定同位体比 (平均値または単独の値) と同じであると仮定してそれらの年代を補正して “conventional age” を算出し, その数値を “CALIB program Rev.5.0” に代入して未補正年代を較正した。その結果得られた数値は, 小元, 児野, 神野のいずれかが採取した試料の年代の $\pm 2\sigma$ 以内の誤

第2表 ビーチロックの安定同位体分析結果と同位体補正年代。小元 (2005) および小元 (2007) のデータから当該データを抽出し、Omoto (1998) が開発したプログラムにより補正年代を計算した。

Table 2 Result of isotope analyses and figures for age corrections on beachrocks. Figures of age corrections for Omoto (2005) and Omoto (2007) were calculated using a program developed by Omoto (1998).

	化石サンゴ		貝化石		石灰砂岩		全試料平均	
	同位体比	補正年代	同位体比	補正年代	同位体比	補正年代	同位体比	補正年代
	‰	年	‰	年	‰	年	‰	年
Max	2.48	454	4.11	482	5.63	508	5.63	508
Min	-4.63	334	-5.57	318	0.35	418	-5.57	318
Aver	-0.24	408	1.32	434	1.95	445	0.83	426
Total	31		36		14		81	

第3表 沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島に発達するビーチロックの形成年代。小元 (2005) および小元 (2007) のデータから当該データを抽出し、CALIB 05 (Stuiver *et al.* 2005) により暦年代に校正した。

Table 3 Formative periods of beachrocks of Okinawa Island, Kouri Island, Yagachi Island and Hamahiga Island. Conventional ages of Omoto (2005) and Omoto (2007) were calibrated by CALIB 05 (Stuiver *et al.* 2005).

No.	Locality	Formative period of beachrock ($\pm 1\sigma$)	Median Age
1	謝敷	3837 - 4059	3945
2	辺土名	4770 - 4960, 3664 - 3851, 2145 - 2301, 225 - 468, modern	4843, 3757, 2217, 334, modern
3	赤丸岬	3365 - 3719	3543
4	浜	modern	
5	喜如嘉	3876 - 4115, 1242 - 1354, 145 - 167	3999, 1297, 262
6	根路銘	2129 - 2290, modern	2198, modern
7	宮城島南部	3336 - 3502, 2293 - 2485, 506 - 602	3420, 2421, 2391, 553
8	津波	3456 - 3636, 2456 - 2666	3555, 2542
9	平安橋下	3491 - 3680	3593
10	崎山	1223 - 1337, 1182 - 1309, 857 - 1027, 595 - 693	1278, 1253, 938, 643
11	後備浜原	7660 - 7844, 857 - 1027	7756, 926
12	崎本部原	5107 - 5542, 3767 - 3985	5337, 3884
13	幸喜	4147 - 4374	4254
14	喜瀬	3371 - 3536, 2332 - 2543	3454, 2455
B	万国津梁館	2090 - 2279	2164
15	安富祖	modern	modern
16	瀬良垣	3603 - 3815	3703
17	宜野座	1916 - 2085, 1717 - 1876, 1616 - 1826, 1579 - 1751, 1472 - 1770, 1357 - 1509, 1228 - 1322	1998, 1801, 1726, 1667, 1610, 1433, 1274
18	真栄田	728 - 870	796
19	儀間	2905 - 3148, 1804 - 1964	3025, 1879
20	都屋	780 - 918, 272 - 425	849, 344
21	渡具知	4836 - 5037, 2498 - 2678, 1850 - 2013, 1350 - 1516, 1295 - 1438, 891 - 1026, 790 - 904	4958, 2575, 1933, 1439, 1377, 949, 846
22	浜比嘉島南部	5718 - 5879, 4234 - 4403, 3040 - 3213, 2787 - 2970	5791, 4314, 3126, 2894
23	具志頭	3973 - 4159, 3348 - 3513, 953 - 1114, 810 - 942, 732 - 875	4078, 3431, 1038, 880, 801
24	名城ビーチ南部	2714 - 2819, 1775 - 1905	2767, 1837
25	古宇利島東部	2497 - 2692, 2733 - 2868, 2853 - 3069, 3011 - 3210, 3065 - 3263, 3302 - 3462	2808, 2811, 2580, 2957, 2980, 3112, 3165, 3381
26	古宇利島北部	1170 - 1305, 1385 - 1534	1243, 1466
27	屋我地島北部	1322 - 1465, 1418 - 1588, 1627 - 1793, 2344 - 2555	1395, 1513, 1708, 2472

差範囲に入ることが確認された。

IV. 考察

1. ビーチロックの形成年代と近隣諸島との対比

沖縄島におけるビーチロックの分布は第1図から明らかのように西海岸に偏在している。この結果は、サンゴ礁地形の発達を規制する遠浅の海底地形と礁嶺およびラグーンが存在とその規模、砂浜海岸の地形形成に影響を与える地質や岩石、陸上河川の影響を受けた結果とみられる。なおビーチロックは、形成当時はおそらく当時の汀線にほぼ平行であり、かつ連続していたと推定される。しかし今日見られるビーチロックの多くは、波浪による侵食のため不連続になっている。また宮城島南部の津波や備瀬岬南部では、現汀線と斜交して発達しているビーチロックも存在する。

沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島の28地点から採取した81個のビーチロック試料の暦年代にもとづき、ビーチロックの形成時期を次のように決定した。なお同一海岸から採取した複数の試料から得られた年代は、潮間帯から採取して“modern”となったものを除き、すべてを有意と判断した。年代表記が“modern”の意味は、 β 線計測で得られた試料の計数率が標準試料(モダンカーボン)の計数率の $\pm 2\sigma$ 以内に入り、統計的に両者の判別が不可能なため年代が決定できず、“modern”と表記されるという年代測定上の約束(2σ のcriteria)にもとづいている。

いくつかの試料が「modern」となったことは、ビーチロックの地形や堆積状況から判断して決して納得できる結果ではない。あえて年代を求めれば、それらの年代の多くは百数十年以内であり、ごく最近の生物遺骸が細粒物質と膠結したことを示唆している。しかしながら現地調査では、それらの試料を含むビーチロックがごく最近形成されたような証拠、たとえば堆積物が特に脆弱であり、あるいはスラブの上方は膠結していても下部が未膠結であるような状態は、ほとんど見られなかった。

ビーチロックの形成に好都合な環境が長期間継続していたかどうかは、次のような基準にもとづき検討した。もしも試料の年代が $\pm 2\sigma$ (確率95.8%)の誤差範囲で相互に重複すれば、ビーチロックが連続的に形成可能な環境にあったと判断し、重複しない年代は独立したビーチロックの形成時期と判断した。

沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島の28地点でビーチロックから採取した試料の暦年代補正後の年代は、地点別に示すと第2図のようになる。第3表および第2図にもとづけば、ビーチロックの形成年代は、本

部半島「後備浜原」の外洋側に位置する約7,800y Cal BPがもっとも古い年代(小元, 2007)となった。そして「浜比嘉島南部」の約5,800y Cal BPが2番目に古い年代となった。5,800y Cal BP以降では、5,300y Cal BP~4,800y Cal BP頃にビーチロックの形成期があり、4,300y Cal BP以降はごく最近まで、ほぼ連続的に島内のいずれかの地点でビーチロックが形成可能な環境にあったことをグラフから判読できる。この結果、沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島におけるビーチロックの形成期は、 $\pm 1\sigma$ で重複しない年代にもとづけば4グループに区分(第2図)される。

なおKawana and Pirazzoli (1985)が「喜屋武」で採取した試料(N-2741)の年代を、その北部の「名城ビーチ」の安定同位体比を使用して補正したところ、「喜屋武」周辺では「名城ビーチ」南部でビーチロックが形成されていた年代よりもはるかに古い時期にビーチロックが形成されていたことが明らかになった。

次に沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島で同時期にビーチロックが形成されていた近隣諸島はどの島かについて検討する。このため第3表のデータ、これまでに発表された沖縄島に隣接するデータ(小元, 2005)にもとづき第3図(横軸に年代、縦軸は近隣諸島を含む)を作成した。この図は、グラフ上で上下に年代値が重なる場合、沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島でビーチロックが形成されていた時、該当する島々でもほぼ同時にビーチロックが形成されていたことを示している。このような解釈にもとづけば、沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島のビーチロックの形成期と同時の形成期をもつと判断された島々は、次の通りである。

[第1期: 7,800y Cal BP]

沖縄島に現存するビーチロックで最古のものは、本部町「後備浜原」で外洋側に伸びているビーチロックであり、その形成年代は7,756y Cal BP (NU-1598)である。この時期に該当するビーチロックは沖縄島以外では見あたらず、この年代が南西諸島の中でもっとも古い年代である可能性が高い(小元, 2005; 小元, 2007)。

[第2期: ca.5,800y Cal BP]

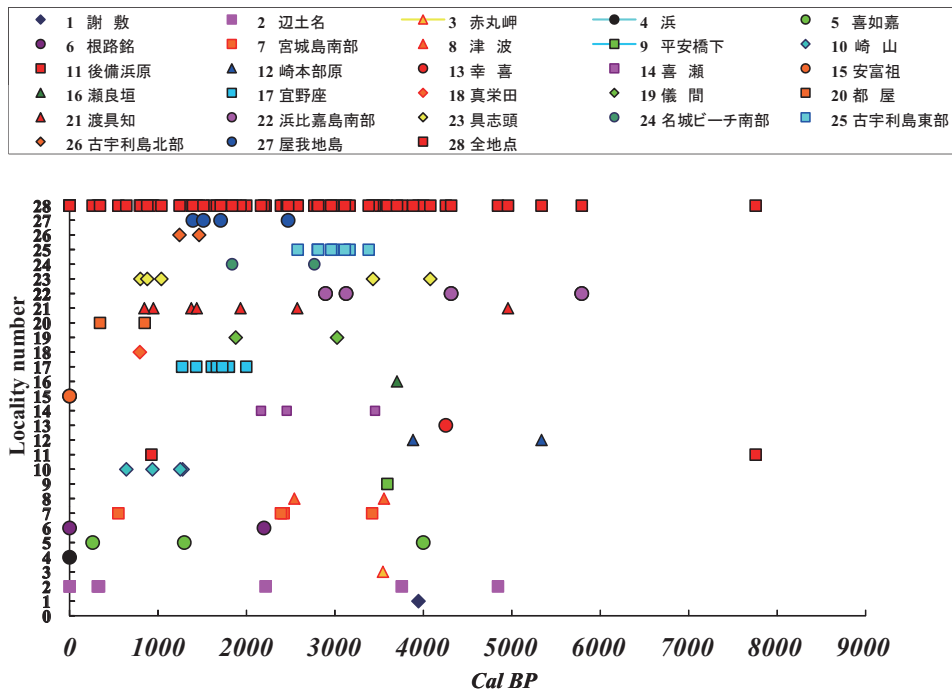
5,791y Cal BP (NU-1686)頃にビーチロックが形成された島としては、座間味島の5,600y Cal BP (NU-1036)がもっとも近い年代である。

[第3期: 5,300y Cal BP ~ 4,800y Cal BP]

この頃にビーチロックが形成された島としては、座間味島, 粟国島, 伊是名島, 伊平屋島の四島が該当する。

[第4期: 4,300y Cal BP ~ ごく最近まで]

この期間にビーチロックが形成された島は、座間味



第2図 沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島から採取したビーチロックの¹⁴C年代。小元 (2005) および小元 (2007) のデータから当該データを抽出し, CALIB 05 (Stuiver *et al.* 2005) により暦年代に校正した。

Figure 2. Radiocarbon ages of beachrocks of Okinawa Island, Kouri Island, Yagachi Island and Hamahiga Island. Data source: Omoto (2005) and Omoto (2007). Conventional ages were calibrated by CALIB 05 (Stuiver *et al.* 2005).

島, 久米島, 伊江島, 粟国島, 伊是名島, 伊平屋島など沖縄諸島のすべての島々が含まれ, これらの島々のいずれかで, この時期にビーチロックが形成されている。

2. 安定同位体比からみたビーチロックの成因

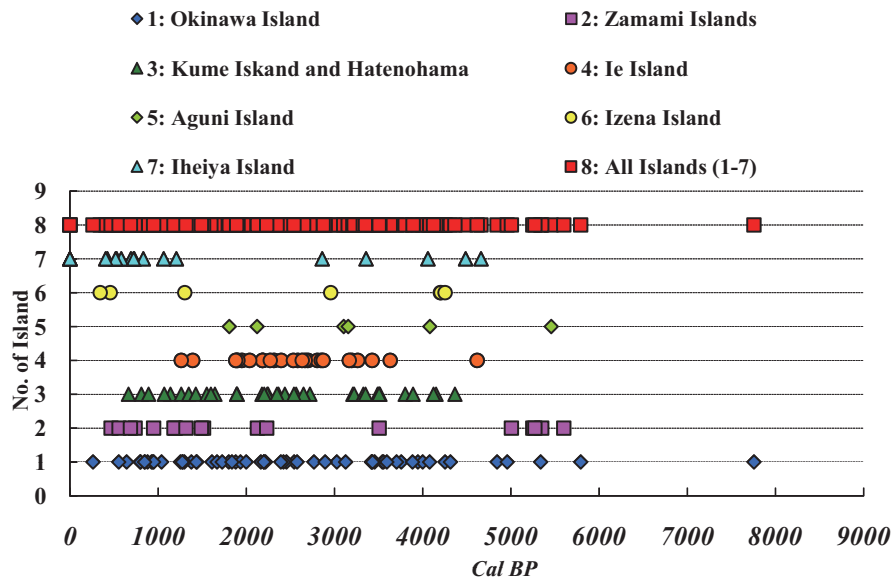
先にビーチロックを構成する細粒物質を膠結する炭酸カルシウムのみを分離して採取することができれば, ビーチロックの形成年代をAMSによって正確に決定できると述べた。またこの炭酸カルシウムの起源を, その安定同位体比を測定することにより推定できる。この理由は, 炭酸カルシウムが海水起源かあるいは陸水起源かは海水と陸水で安定同位体比が異なるためである。¹⁴C年代測定値の補正に用いられてきた安定同位体比の数値は, 研究者により異なる。たとえばStuiver and Polach (1977) によれば, 海水の炭酸塩の安定同位体比は $-14 \pm 2\%$ である。またOlsson (1980) は海棲貝化石116試料の安定同位体比 (平均値) を -0.8% , 有孔虫79試料の安定同位体比 (平均値) を -1.7% と報告している。さらにGeyh and Schleicher (1990) は, 海水の炭酸塩や有機物の安定同位体比を $0 \pm 2\%$ と報告している。

沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島から採取

した全試料の安定同位体比の平均値は 0.58% であり, 海水の炭酸塩や有機物の平均値である $0 \pm 2\%$ の範囲内 (Geyh and Schleicher, 1990) に存在する。しかし81試料中, $0 \pm 2\%$ をこえた試料が38個 (46.9%), $0 \pm 4\%$ をこえた試料が9個あった。その内訳は, 化石サンゴが6個, 貝化石が19個, そして石灰砂岩が4個である。この結果は, これらの海洋生物は生存中に, 陸域から供給された地下水や地表水の影響を受ける環境で成長したことを強く示唆しているように思われる。

野外調査の際に, 沖縄島西海岸の「喜如嘉」, 「古宇利島」, 「崎山」, 「崎本部原」, 「喜屋武」ほかの砂浜海岸では, 干潮時にビーチロックの上位や下位に位置する砂浜に, 湧水による小水路が多数出現していた。また小河川の河口近くに位置しているビーチロックも多数観察された。一方鍾乳洞が海底で開口している海域では地下水と海水が混合しており, 当該海域で成長する海洋生物は地下水による影響を受けていると推測される。以上述べたような地下水や地表水がビーチロックに含まれる貝化石, 化石サンゴ, 細粒堆積物の安定同位体比に影響を及ぼし, ビーチロックの膠結にも影響を与えてきたと推察される。

しかしながら安定同位体比と¹⁴C年代との関係を示す



第3図 沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島から採取したビーチロックの年代と周辺諸島間のビーチロック形成年代の対比。小元 (2005) および小元 (2007) のデータから当該データを抽出し, CALIB 05 (Stuiver *et al.* 2005) により暦年代に較正した。

Figure 3. Correlation of formative ages of beachrocks collected from Okinawa Island, Kouri Island, Yagachi Island, Hamahiga Island and adjacent islands. Data source: Omoto (2005) and Omoto (2007) . Conventional ages were calibrated by CALIB 05 (Stuiver *et al.* 2005) .

第4図からは, 両者間に密接な相関を読み取ることができない。また第5図は安定同位体比と三種類の試料別採取高度との関係を示している。図中, 「辺土名沖」, 「赤丸岬」および「後備浜原」から採取した試料以外は, すべて潮間帯以上の高度にある。これらの中で石灰砂岩の安定同位体比は第1象限と第4象限にあり, 1試料を除きその符号は+である。これに対して貝化石は辺土名沖から採取した試料を除けば, そのほとんどは第1象限と第2象限に入り, 貝化石は第3象限に1個も入らない。また石灰砂岩は, 「後備浜原」から採取した1試料を除き第1象限に集中している。一方化石サンゴは1~4のすべての象限に広く分布している。

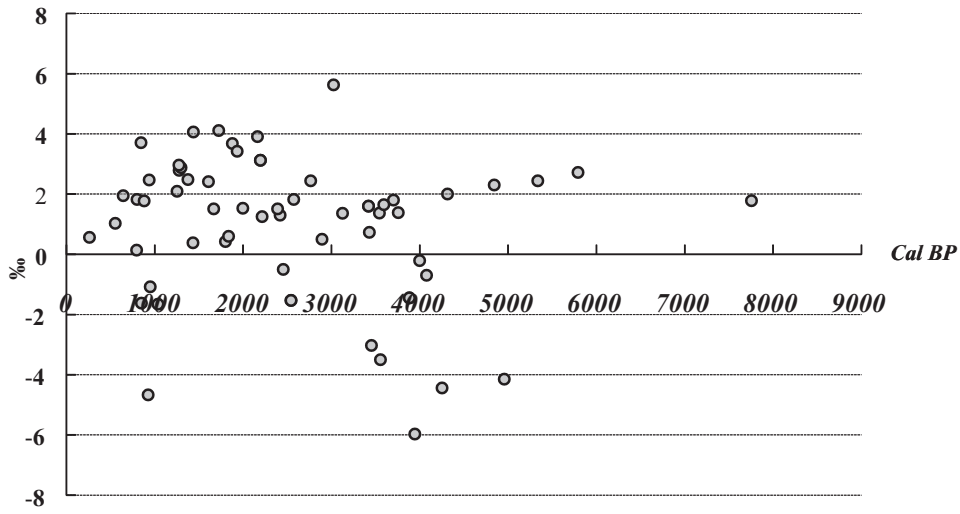
なお本部半島北西端の「後備浜原」で外洋側に伸びている石灰砂岩は, 現在では低潮位以下に位置する。しかし膠結時は潮間帯に位置していた筈であり, ビーチロックの形成高度と第1象限とは何らかの関連があるように思われるが, その因果関係を具体的に論ずることができない。

3. 沖縄島における完新世海水準変動

沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島から採取した三種類のビーチロック試料の高度 (縦軸) と暦年代 (横軸) との関係は第6図に示す通りである。採取した大部分の試料の高度が中等潮位以上に存在することが読み

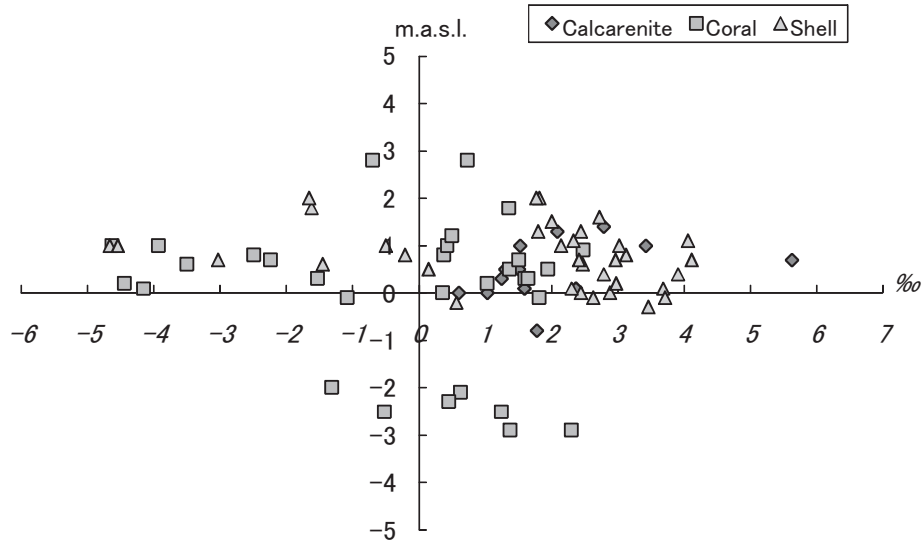
取れる一方, 中等潮位以下にも若干の, おもに化石サンゴから成る試料が存在する。図中高度2m以上を示す試料はすべて沖縄島南部の「具志頭」海岸から採取した。また「崎山」, 「崎本部原」, 「瀬良垣」, 「都屋」および「浜比嘉島南部」から採取した試料の高度は, いずれも1mをこえている。試料の多くは最上位のスラブから採取されているが, その理由は, すでに記述したように低潮位から中等潮位くらいまでのビーチロックの表面が「アーサ」と呼ばれる緑色の海草で覆われており, 年代測定試料のある場所を探し出せないからである。またビーチロックの形成は, 最上位 (内陸側) のスラブから始まるという通説にもとづき, 内陸側のスラブで試料を探し求めたことにもよる。したがって海水準変動を検討する場合, 大部分のビーチロックは, 実際には第6図の高度よりも1m以上低い位置まで連続していることを留意しなければならない。

ビーチロックやノッチの高度を指標として海水準変動を考察する場合, 旧汀線高度の精度ではノッチがビーチロックに勝るかもしれない。しかし地形形成年代を示す試料を直接ノッチから得ることは困難である。そこで本論ではビーチロックとノッチの高度を比較し, ノッチとほぼ同じ高度を示すビーチロックが近隣地域に存在する場合, ノッチの後退点高度が平均海面を示し, かつその



第4図 ビーチロックから採取した試料の安定同位体比と¹⁴C年代の関係。小元 (2005) および小元 (2007) のデータから当該データを抽出し、CALIB 05 (Stuiver *et al.* 2005) により暦年代に較正した。

Figure 4. Relationship between isotopic fractionations ($\delta^{13}\text{C}$) and calibrated radiocarbon ages of beachrock samples. Conventional ages of Omoto (2005) and Omoto (2007) were calibrated by CALIB 05 (Stuiver *et al.* 2005) .



第5図 ビーチロック試料の採取高度と安定同位体比の関係。小元 (2005) および小元 (2007) のデータから当該データを抽出した。

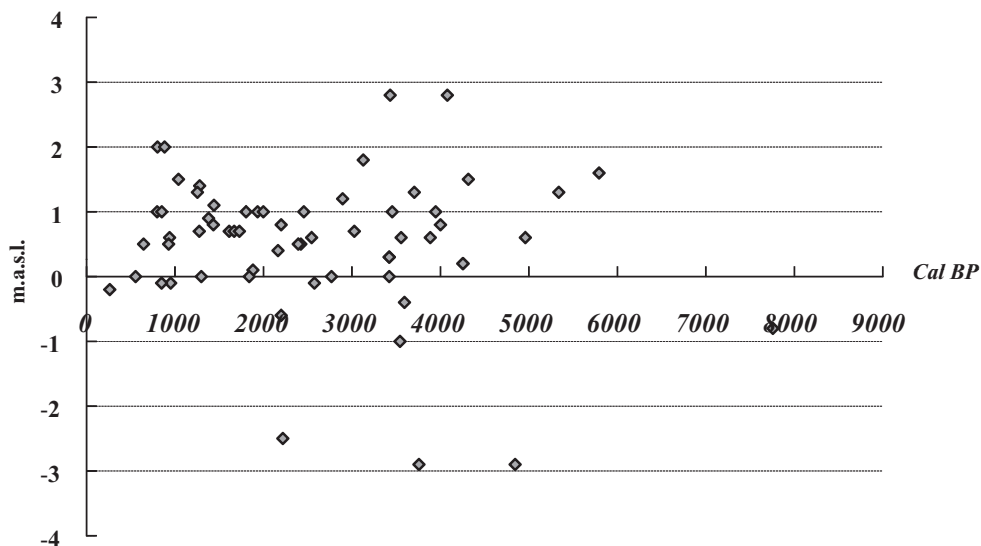
Figure 5. Relationship between elevations and isotopic fractionations ($\delta^{13}\text{C}$) of beachrocks collected from Okinawa Island, Kouri Island, Yagachi Island and Hamahiga Island. Data source: Omoto (2005) and Omoto (2007) .

形成時期がビーチロックの形成年代と一致するとみなして、相互に補完関係にある二つの地形データおよびビーチロックの年代を使用して海水準変動を考察してみた。河名 (1993) が報告した図 (地理予No.43, p.131) にもとづき、沖縄島南部の「北名城」におけるノッチの高度を算出すれば、それぞれ約2.7m, 2mおよび1.2mとなる。一方沖縄島南部の「具志頭」から採取したビーチロックの高度はおよそ2.8mと2mであり、1.2mに該当する試料はない。ノッチの高度と対応関係が成立するビーチロックの年代は、4,080y Cal BP ~ 3,430y Cal BPと1,040y Cal BP ~ 800y Cal BPである。同様にして沖縄島中南部の「渡久地」で見られるノッチの高度は約2mと1.2mであり、「ビル原」のノッチの高度は1.8mと1.0mである。これと対比するビーチロックは、「浜比嘉島南部」で高度1.8mから採取されたビーチロックの3,130y Cal BPの年代と、「崎山」の高度1.3mから採取したビーチロックの示す1,280y Cal BPの年代である。

第6図によると、約3,000y Cal BPより古い年代と約800y Cal BP ~ 1,300y Cal BPを示す試料の中に、その高度が2m以上にあり、他のデータよりも突出しているものが存在する。それらは「具志頭」、「崎山」、「崎本部原」、「瀬良垣」、「都屋」および「浜比嘉島南部」などから採取したビーチロックである。沖縄島南部の「具志頭」では、

隆起サンゴ礁の離水年代がKawana and Pirazzoli (1985) によって約2,400y BP (CALIB program Rev.5.0で補正年代を求めると中央値は2,034y Cal BPとなる) の地震性地殻変動によると報告されている。この報告から、これらの突出試料は急激な離水を示していると推定される。もしもこの推定が正しいとすれば、「具志頭」では約4,100 ~ 3,400y Cal BPに潮間帯で形成されたビーチロックが、その後起こった地震性地殻変動によって1.5mほど高い位置まで隆起し、その後約800y Cal BP頃にふたたび起こった地震性地殻変動により、更に1m ~ 1.5m隆起して現在の高度に至ったと推定される。また第6図から約800y Cal BPころに起こった地震性地殻変動は、「崎山」、「崎本部原」、「瀬良垣」、「都屋」および「浜比嘉島南部」など沖縄島中・南部のビーチロックを離水させ、ビーチロックの高度が現在の高度に到達したことを示唆していることを読み取ることができる。

なおKawana and Pirazzoli (1985) は、沖縄島南部を隆起させた地震のマグニチュードを7.4、地震性地殻変動の再来周期を7,000 ~ 10,000年と見積もっている。また彼らは、1回の地震により沖縄島南部が隆起したと解釈している。しかし第6図の「ビーチロックの年代—高度分布」からは、隆起の時期は少なくとも2回存在したことを推定できる。この場合地震の再来周期は、Kawana



第6図 ビーチロック試料の ^{14}C 年代と高度の関係。小元 (2005) および小元 (2007) のデータから当該データを抽出し、CALIB 05 (Stuiver *et al.* 2005) により暦年代に較正した。

Figure 6. Relationship between radiocarbon ages and elevations of beachrock samples. Conventional ages of Omoto (2005) and Omoto (2007) were calibrated by CALIB 05 (Stuiver *et al.* 2005) .

and Pirazzoli (1985) の見積りよりも短くなり注目される。

完新世後期の海水準変動量が50 cm / 1,000年(海水準変動50 cmという数値は現在地球上に存在する山岳水河がすべて融解しても到達しない水当量に相当する)以上に到達しないことを考慮すれば、河名・菅(1996および1999)が推定した海面安定期以後の離水(海水準低下)は、地震性地殻変動による隆起を示唆していると小元は考えている。しかしこのような地殻変動の影響を受けなかった地域では、6,000y Cal BP以降に形成されたビーチロックの中で、高度1 m以下のものは現在でも潮間帯に位置するため、これらのビーチロックは現在とほぼ同じ海水準のもとで形成されたと考えられる。

次に2003年4月および5月の大潮の際に「辺土名」沖合で採取した試料の年代について考察する。試料は、かつて砂村(1983)や目崎(1985, 1988)が「世界でも珍しい沈水ビーチロック」と指摘した海域で採取した。しかし砂村がビーチロックの存在を示した地点(海底)は、小元が調査した当時漂砂に埋もれていたため、ビーチロックのマイクロケスタ状の地形を確認できなかった。したがって本当に「沈水ビーチロック」から試料を採取したかどうか疑問が残る。仮に沈水ビーチロックから試料を採取できた場合、試料の水深と潮位差を考慮すれば当該地域で約2 m以上の沈降が起こったことになる。その時期は、得られた化石サンゴの年代から約2,220y BP (NU-1604)以降と推定される。なお「辺土名」のすぐ南部に位置する「赤丸岬」では、中潮位以下に発達するビーチロックの年代が3,543y Cal BP (NU-1601)であった。この年代は3,540y Cal BP以降に「赤丸岬」も「辺土名」と同様若干沈降したことを示唆している。

沖縄島南部が3,300y Cal BP以降の地震性地殻変動により隆起しているという今回の研究成果は、2,400y BP (2,034y Cal BP) 頃に沖縄島が地震性地殻変動により隆起したというKawana and Pirazzoli (1985) の見解を支持しているように思われる。この成果と、砂村(1983)や目崎(1985, 1988)が示唆した「辺土名」地域が相対的に沈降しているという報告とはきわめて対照的である。「辺土名」沖で水深-2m以深から採取した試料の年代に関する別の解釈は、「試料採取深度で生息していたサンゴが地殻変動によって死亡したのではなく、何らかの環境変化によって死滅した」という考え方である。この地域のビーチロックの形成年代については、本論では両論併記にとどめ、この議論の決着は試料と海底地形との関連性が明らかになった時点で改めて報告したい。

以上記載した内容をまとめると、沖縄島の潮位変化量(約±1 m)を考慮し2 m以上の高度にあるビーチロック

は、沖縄島南部では2,034y Cal BP頃に起こったと推定されている地震性地殻変動による隆起(Kawana and Pirazzoli 1985)を反映した結果とみられる。また「崎山」, 「崎本部原」, 「瀬良垣」, 「都屋」および「浜比嘉島南部」のビーチロックは、約800y Cal BP以降に発生した地震性地殻変動により隆起した可能性を新たに指摘できる。「辺土名」沖で水深-2m以下から採取した試料が「沈水ビーチロック」からであれば、少なくとも2,220y Cal BP以降の地殻変動により、かつて潮間帯で形成されたビーチロックが沈降したと考えられる。しかし水深-2m以深から採取した試料は、「沈水ビーチロック」の形成年代を示さず、単に現地性サンゴの死亡年代を示しているという解釈を現段階では完全には否定できない。いずれにせよ地殻変動による影響の大きい地域のデータを除けば、沖縄島では少なくとも6,000y Cal BP以降に形成されたビーチロックの多くは今日でも依然として潮間帯にあり、この結果から6,000y Cal BP以降の海水準は現在とほぼ変わらないという結論が導かれる。

V. まとめ

これまで沖縄島および浜比嘉島のビーチロックの年代資料はKawana (1981) およびKawana and Pirazzoli (1985) が6地点から採取した8個のデータであった。小元は野外調査により沖縄島と近隣の古宇利島、屋我地島および浜比嘉島など28地点から採取した合計81個の試料について、安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)と ^{14}C 年代を測定し、安定同位体比にもとづき ^{14}C 年代を補正し“conventional age”を求めた。さらにそれらの年代をこのたび“reservoir correction” $R=400$ 年, $\Delta R=0$ として“CALIB program Rev.5.0”により暦年代に較正した。その結果にもとづいて沖縄島、古宇利島、屋我地島および浜比嘉島から採取したビーチロックの形成年代を推定した。また試料の安定同位体比から、ビーチロックの膠結に接着剤的な役割をはたした炭酸カルシウムの起源を推定した。さらに暦年代に較正した年代と試料採取地点の高度にもとづき、沖縄島の海水準変動や地殻変動について検討した。これまでに記載してきた内容は、次のように要約される。

(1) 沖縄島において海水準変動や地殻変動が顕著でなかった地域では、ビーチロックは潮間帯で常時形成される環境にあった。この場合、同一地点において複数の異なる年代が生じてもよく、また潮間帯なら高度が異なってもよい。

(2) 同一層準から採取した複数試料の年代が、同位体分別補正後に±3 σ の範囲に入らない場合、これらの年

代からビーチロックの形成年代を推定する際には、地形や堆積物の特徴を考慮した慎重な吟味が必要である。

(3) 沖縄島のビーチロックは、本部半島「後備浜原」の約7,800y Cal BPの年代がもっとも古い年代であり、ついで「浜比嘉島南部」の約5,800y Cal BPがこれに続いている。それ以降ビーチロックは、5,300y Cal BP～4,800y Cal BP頃と、4,300y Cal BP以降からごく最近まで、ほぼ連続的に形成されている。

(4) 沖縄島で5,300y Cal BP以降にビーチロックが形成されていたとき、近隣の座間味島, 久米島, 伊江島, 粟国島, 伊是名島, 伊平屋島などのいずれかの島(島々)でもほぼ同時期にビーチロックが形成されていた。

(5) 沖縄島と近隣の古宇利島, 屋我地島および浜比嘉島など28地点から採取した合計81個の試料のビーチロック試料の安定同位体比は、+5.63～-5.57‰ PDBの範囲にあり、平均値は0.83‰である。この結果、最大値と最小値の差は10‰に達している。試料別では、石灰砂岩の最大, 最小, 平均値は、それぞれ5.63‰, 0.35‰, 1.95‰であり、化石サンゴの最大, 最小, 平均値は、それぞれ2.48‰, -4.63‰, -0.24‰である。また貝化石(シャコ貝)の最大, 最小, 平均値は、それぞれ4.11‰, -5.57‰, 1.32‰である。試料別にみた安定同位体比は、石灰砂岩の安定同位体比の平均値がもっとも大きく、次いで貝化石(シャコ貝), 化石サンゴの順となる。

(6) 各試料の安定同位体比から算出される同位体補正年代は508年から318年(平均426年)までの範囲にある。この数値は試料の種類により、また試料採取地点により異なる。上記の試料別・地域別平均値を使用すれば、既存の安定同位体比未補正の ^{14}C 年代を補正できる。

(7) 海水中の炭酸塩や有機物(海洋生物)の安定同位体比は $0 \pm 2\%$ (Geyh and Schleicher 1990)といわれているが、採取した81個の試料中38個(46.9%)の安定同位体比は、その範囲外にある。 $0 \pm 2\%$ をこえるサンゴや貝は、成長中に陸域からの地表水や地下水による影響を受けた可能性を示唆し、このような環境で形成されたビーチロックもまた同様に海浜堆積物が膠結した際に、陸域からの地表水や地下水による影響を受けた可能性が高いと考えられる。今回得られた結果は、小元(2004b) Omoto (2004b)の報告と矛盾しない。

(8) ビーチロックを示標として海水準変動を論ずる場合、高度の精度はビーチロックの形成範囲が潮間帯という制約から沖縄島では $\pm 1\text{m}$ 程度である。一方年代は、化石サンゴや貝化石の代わりに石灰砂岩や石灰礫岩の年代を使用する場合、これらの充填物質(母材)が試料と

した化石サンゴや貝化石が海岸に打ち上げられる以前から存在していたため、最大で200年程度古くなる場合がある。

(9) ビーチロックの高度と年代を、旧汀線高度の精度はよいが形成年代試料に乏しいノッチや、サンゴ礁段丘の高度や年代と対比させることにより、海水準変動を復元する場合に示標とすることができる。

(10) ビーチロック試料の分布高度と形成年代にもとづき、沖縄島における後期完新世の相対的海水準を検討した結果、海水準が現海水準を上回った所がある一方、顕著な高海水準が認められない地点も多数存在する。高海水準の存在を示す沖縄島南部から中南部地域にかけての地域では、Kawana and Pirazzoli (1985)が推定した約2,400y BP頃(2,034y Cal BP)と、新たに推定される約800y Cal BP以降に、それぞれ最大約1～1.5mずつ2回にわたる地震性地殻変動による隆起が生じたと推定される。

(11) その隆起量は南部ほど大きく、突然の隆起という特徴から判断して、沖縄島南東海底を震源とする巨大地震の結果ではないかと推察される。しかしこれらの地震性地殻変動の影響が小さかった地域や、ほとんど影響が及ばなかった沖縄島中南部以北の地域では、ビーチロックは現在とほぼ同じ海水準のもとで形成された。

最後に、本論では全くふれなかったが、沖縄島から採取した化石サンゴや貝化石の安定同位体比が $0 \pm 2\%$ をこえた原因の一つとして、海陸間における炭素の循環や生物の食物連鎖に関する研究が今後必要であることを指摘し、その解明を期待したい。

謝辞

琉球大学の河名俊男教授には、南西諸島のビーチロックの分布とビーチロックの形成に関する多数の外国文献を教えていただいた。ビーチロックの調査にあたり、沖縄県教育庁はじめ各市町村役場の教育委員会、文化財課、総務課、土木・建築課等の関係者には野外調査の際に便宜をはかっていただいた。また辺土名沖合で試料を採取した際、国頭村教育長宮城馨氏・国頭村商工会長崎浜秀安氏はじめ漁業関係者のご協力をいただいた。英文学科のWilliam D. Patterson教授には英文要旨の校閲をしていただき、または枝若奈さんには、年代測定実験(試料の化学処理)を手伝っていただいた。以上の皆様方と本稿の査読者に深甚の謝意を表します。

現地調査・年代測定・安定同位体比の測定にあたり、平成15年度日本大学学術研究助成金、平成11～17年度日本大学文理学部研究助成金および平成13～16年度文部科学省ハイテク・リサーチ・事業私学研究助成金を使用したことを明記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 太田陽子・大村朗雄・河名俊男 (2001): 「琉球外弧」, 『日本の地形7 九州・南西諸島』町田洋・太田陽子・河名俊男・森脇 広・長岡信治 編, 東京大学出版会, 231-271.
- 小元久仁夫 (1993): 放射性炭素年代測定マニュアル. 日本大学文理学部地理学教室, 1-102.
- 小元久仁夫 (1994): 南西諸島波照間島から採取したビーチロックの¹⁴C年代. 地理誌叢, **35** (2), 69-71.
- 小元久仁夫 (1995): 宮古島から採取したビーチロックの¹⁴C年代. 地理誌叢, **36** (2), 18-20.
- 小元久仁夫 (1997a): 先島諸島, 多良間島から採取したビーチロックの¹⁴C年代資料について. 季刊地理学, **49** (1), 60.
- 小元久仁夫 (1997b): 八重山列島黒島から採取したビーチロックおよび化石サンゴの¹⁴C年代. 地理誌叢, **39** (1), 24-32.
- 小元久仁夫 (1998a): 南西諸島久米島東部, 奥武島およびハテノ島から採取したビーチロックおよび化石サンゴの¹⁴C年代. 季刊地理学, **50** (1), 85-86.
- 小元久仁夫 (1998b): 沖縄県伊江島から採取したビーチロックの¹⁴C年代資料—特にニヤテイガマ (千人ガマ) 洞窟底のビーチロックについて—. 日本サンゴ礁学会第1回大会講演要旨, 46.
- 小元久仁夫・陣野正敏 (1999): Windows NT Workstation 4.0 用全自動¹⁴C年代測定プログラムの開発—日本大学年代測定報告—6—. 日本大学文理学部自然科学研究所「研究紀要」, **34**, 73-100.
- 小元久仁夫 (1999a): 沖縄諸島粟国島から採取したビーチロックと化石サンゴの¹⁴C年代—粟国島における後期完新世の海水準変動—. 地理誌叢, **40** (2), 15-28.
- 小元久仁夫 (1999b): 与論島から採取したビーチロックの¹⁴C年代—南西諸島のビーチロックの¹⁴C年代資料 (その10) —. 季刊地理学, **51** (3), 237-238.
- 小元久仁夫 (1999c): 沖永良部島から採取したビーチロックの¹⁴C年代—南西諸島のビーチロックの¹⁴C年代資料 (その11) —. 日本地理学会発表要旨集, **56**, 104-105.
- 小元久仁夫 (1999d): 宮古島から採取したビーチロックの¹⁴C年代—南西諸島のビーチロックの¹⁴C年代資料 (その12) —. 日本サンゴ礁学会代2回大会講演要旨, 17.
- 小元久仁夫 (2000a): 徳之島から採取したビーチロックの¹⁴C年代資料. 地理誌叢, **41** (1・2), 15-30.
- 小元久仁夫 (2000b): 奄美大島北部から採取したビーチロックの¹⁴C年代—南西諸島のビーチロックの¹⁴C年代資料 (その13) —. 日本地理学会発表要旨集, **57**, 62-63.
- 小元久仁夫 (2000c): 西表島から採取したビーチロック試料の¹⁴C年代資料 (予報). 地理誌叢, **42** (1), 17-30.
- 小元久仁夫 (2002): 高精度AMS年代測定と, その応用. 地理誌叢, **43** (1・2), 22-41.
- 小元久仁夫 (2003a): 与那国島および波照間島から採取したビーチロックの¹⁴C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」, **38**, 1-17.
- 小元久仁夫・児野秀史・神野賢一 (2003): 沖縄島西岸から採取したビーチロックの¹⁴C年代と安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$). 日本地理学会発表要旨集, **64**, 122.
- 小元久仁夫 (2003b): 石垣島から採取したビーチロックの¹⁴C年代と安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$). 日本サンゴ礁学会代6回大会講演要旨, 37.
- 小元久仁夫 (2004a): 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¹⁴C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 (2004b): 南西諸島から採取した完新世化石サンゴ, 貝化石および石灰質砂岩の同位体補正年代. 日本地理学会発表要旨集, **66**, 92.
- 小元久仁夫 (2004c): 伊平屋島から採取したビーチロックの¹⁴C年代と安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$). 季刊地理学, **56** (3), 199.
- 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 ($\delta^{13}\text{C}$) —測定資料とその分析—. 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・紺野善崇 (2006): 沖縄県古宇利島および屋我地島から採取したビーチロックの¹⁴C年代と安定同位体比. 季刊地理学, **58** (3), 186-187.
- 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 (2008): 宮古島東部大浦田原海岸におけるビーチロックの成長率. 日本地理学会発表要旨集, **74**, 79.
- 河名俊男 (1993): 沖縄島における後期完新世の海面変動. 日本地理学会発表要旨集, **43**, 130-131.
- 河名俊男 (1996): 琉球列島中部の非石灰岩地域 (渡嘉敷島, 阿嘉島, 渡名喜島) における後期完新世の海面変動—礫岩ビーチロックとそれに保護された完新世サンゴ礁の例—. 日本地理学会発表要旨集, **50**, 116-117.
- 河名俊男・菅 浩伸 (1996): 沖縄東南部の具志頭海岸における完新世離水サンゴ礁の掘削によるポーリングコアの記載. 琉球大学教育学部紀要, **48**, 1-16.
- 河名俊男・菅 浩伸 (1999): 沖縄東南部の具志頭海岸における完新世離水サンゴ礁の発達過程と完新世海面変動. 日本サンゴ礁学会第2回大会講演要旨集, **15**.
- 河名俊男 (2002): 暦年代にもとづく沖縄島の完新世海面変動. 日本地理学会発表要旨集, **61**, 260.
- 神野賢一 (2003): 沖縄本島中・南部の海岸地形. 日本大学文理学部地理学科卒業論文 (手記), 1-40.
- 木越邦彦 (1976): 同位体, 年代測定. 新実験化学講座 宇宙地球化学. 日本化学会編. 丸善. 東京, 337-352.
- 木庭元晴 (1980): 琉球層群と海岸段丘. 第四紀研究, **18**, 189-208.
- 財団法人日本気象協会沖縄支店 (2003): 平成16年沖縄の気象暦, **61**.
- 砂村継夫 (1983): 海岸地形の変化. 地形変化の定量的予知に関する基礎的研究 [昭和56,57年度文部省科学研究費 (総合研究A) 研究代表者 水山高幸 研究成果報告書, 29-39].
- 武永健一郎 (1965): Beach rockの成因について. 地理学評論, **38**, 739-755.
- 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), 1-18.
- 田中好國 (1994): サンゴ礁海岸における微地形—ビーチロックのターミノロジーと研究小史—. 兵庫地理, **39**, 1-12.
- 児野秀史 (2003): 沖縄島北部の海岸地形. 日本大学文理学部地理学科卒業論文 (手記), 1-57.
- 野上道男 (1977): 氷河の質量収支と海面変化の早さ. 地理学評論, **50** (3), 181-182.
- 町田 洋 (2001): 徳之島, 与論島, 久米島, 宮古島, 石垣島, 小池一之・町田 洋編『日本の海成段丘アトラス』東京大学出版会. CD-ROM3枚+122p.
- 町田 洋・太田陽子・河名俊男・森脇 広・長岡信治編 2001. 日本の地形7 九州・南西諸島. 東京大学出版, 245-

- 250.
- 目崎茂和 (1985) : 『琉球弧をさぐる』 沖縄あき書房. 253p.
- 目崎茂和 (1988) : 『南島の地形』 沖縄出版. 158p.
- 米谷静二 (1963) : 奄美大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), 512-527.
- Geyh, M.A. and Schleicher, H. (1990) : *Absolute Age Determination*. Springer-Verlag. 503.
- Hideshima, S. Matsumoto, E. Abe, O. and Kitagawa, H. (2001) : North Pacific marine reservoir correction estimated from annually banded coral from Ishigaki Island, southern Japan. *Radiocarbon*, **43** (2A). 473-476.
- Higgins, C.G. (1968) : Beachrock. In *The Encyclopedia of Geomorphology* (Ed. Fairbridge, R.W.), Reinhold, New York 70-73.
- 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 25 Part 1. 245-249.
- Kawana, T. and Pirazzoli, P.A. (1983) : Late Holocene crustal movements in Okinawa Island, the Ryukyus, Japan.—In *International Symposium on Coastal Evolution in the Holocene*, Abstract. Tokyo. 53-56.
- Kawana, T. and Pirazzoli, P.A. (1984) : Late Holocene shorelines and sea level in Miyako Island, the Ryukyus, Japan. *Geographical Review of Japan*, **57** (Series B), 2, 135-141.
- Kawana, T. and Pirazzoli, P.A. (1985) : Holocene coastlines and seismic uplift in Okinawa Island, the Ryukyus, Japan. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. Bd, **57**, 11-31.
- Olsson, I.U. (1980) : Progress in radiocarbon dating, promising techniques and trends in the research. *ZKAAA*, **12** (S2), 37-68.
- Omoto, K. (1998) : Development of new beta-counting programs operate under a Windows NT Workstation. In *Proceedings of the 16th International Radiocarbon Conference in Groningen, The Netherlands*. Eds. Mook, W.G. and J van der Plicht. *Radiocarbon*, **40** (1). 151-155.
- Omoto, K. (2001) : Radiocarbon ages of beachrocks and late Holocene sea-level changes in the southern part of the Nansei Islands, southwest of Japan. *Radiocarbon*, **43** (2B). 887-898.
- Omoto, K. (2004 a) : Radiocarbon ages and isotope fractionations of beachrock samples collected from the Nansei Islands, southwestern part of Japan. *Radiocarbon*, **46**, 539-550.
- Omoto, K. (2004 b) : Isotope fractionations and radiocarbon ages of fossil coral, shell and calcrenites samples collected from the Nansei Islands, southwestern part of Japan. In *International Conference on Isotopes in Environmental Studies—Aquatic Forum 2004—*, 25-29 October 2004, Monaco. International Atomic Energy Agency (IAEA-F3-CN-118), Abstract, 254-255.
- Omoto, K. (2006 a) : Radiocarbon ages and $\delta^{13}\text{C}$ isotopes of beach rocks from the Okinawa Islands, southwest Japan. In *Proceedings of 10th International Coral reef Symposium (June 28 to July 2, 2004, Okinawa Convention Center, Okinawa Japan)*. *Japanese Coral Reef Society*, 511-518.
- Omoto, K. (2006 b) : ^{14}C age corrections based on isotope fractionations for beachrock samples collected from the Nansei Islands, SW Japan. In *LSC 2005, Advances in Liquid Scintillation Spectrometry* (eds. Chalupnik, S et al.), 429-434.
- Russell, R.J. (1959) : Origin of beach rock. *Zeitschrift für Geomorphologie*, NF 3, 227-236.
- 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}C data. *Radiocarbon*, **19**, 355-363.
- Stuiver, M. and Braziunas, T.F. (1993) : Modeling atmospheric ^{14}C influences and ^{14}C ages of marine samples to 10,000 BC. *Radiocarbon*, **35**, 137-189.
- Stuiver, M. Reimer, P.J. and Reimer, R.W. (2005) : CALIB 5.0 [WWW program and documentation].
- Vogel, J.C. and Ehhalt, D. (1963) : The use of the carbon isotopes in ground water studies. In *Radioisotope Ratios as Pollutant source and Behavior Indicators*, 143-150, IAEA, Vienna.

