

宮古島東平安名岬西方、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結果について

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*****

Geomorphology of travertine terraces, calibrated ages of their deposits and results of hydrological analyses of water samples collected from Tidagah, west of Higashihenna promontory, Miyako Island, SW Japan

Kunio OMOTO (Nihon University), Toshio NAKAMURA (Nagoya University), Kazuki MORI (Nihon University), Kunikazu TANAKA (Nihon University), Shigeo Matsuda (Riegl Japan Ltd.), Hideo OYAGI (Nihon University), Akira ADANIYA (Cultural Heritage Committee of Miyakojima City), Mitsugu KUGAI (Miyakojima City Museum), and Munefumi SHINJO (Educational Board of Miyakojima City)

(Received October 31, 2010)

Travertine terraces develop on the southern coast of Miyadozaki promontory located at the west of Higashihenna promontory, southeast of Miyako Island, Okinawa Prefecture, SW Japan. Geological and geochemical characteristics of the travertine terraces were revealed by field observations, surveys, radiocarbon datings, and chemical analyses. A large scale topographic map was provided by using 3D laser scanner model VZ-400 and field surveys. The precise topographic map was drawn with contour interval of 2.5cm and it contributed analyzing characteristics of travertine terraces. The travertine deposits, beach rocks, spring water and seawater samples were collected for radiocarbon datings and chemical analyses. Radiocarbon datings were carried out by an AMS ^{14}C dating equipment of Nagoya University and a β -counting apparatus of Nihon University. Calibrated ages of travertine deposits revealed that the travertine terraces began to form at the latest 3,600 cal BP. Chemical analyses of water samples revealed that spring water percolated through the Ryukyu Limestone Group contributed together with seawater to the formation of the travertine terraces.

keywords: travertine terrace, calibrated age, AMS (Accelerator Mass Spectrometry), Miyako Island, 3D laser scanner
キーワード：石灰華段丘、較正年代、加速器質量分析計、宮古島、3D レーザ・スキャナー

I はじめに

石灰華段丘について地学事典には「石灰岩地域を流下する河川水がつくる階段状の地形。河川水には多量の重炭酸カルシウムが溶解しており、急流部で河川水が飛沫になることによって圧力が変わり、溶解しきれない炭酸

カルシウムが河床に沈殿・析出する。軟らかい炭酸カルシウムをトゥファ (tufa)、硬いものをトラバーチンと呼ぶ。トラバーチンがダム縁のように集積したものをリムストーン。せき止められた流れの緩やかな皿状の小池をリムストーンプールと呼び、これが高さを異にしていくつも接するようになった階段状の地形が石灰華段丘。

* 日本大学文理学部地理学科：
〒156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40

** 名古屋大学年代測定総合研究センター：
〒464-8602 愛知県名古屋千種区不老町

*** 日本大学文理学部地球システム科学科：
〒156-8550 東京都世田谷区桜上水 3-25-40

**** リーグルジャパン株式会社：
〒164-0013 東京都中野区弥生町 5-11-29 フジビル 2 階

***** 宮古島市文化財審議委員会：
〒906-0103 沖縄県宮古島市城辺字福里 600-1

***** 宮古島市総合博物館：
〒906-0011 宮古島市東仲宗根 1166-287

***** 宮古島市教育委員会：
〒906-0103 沖縄県宮古島市城辺字福里 600-1

* Department of Geography, College of Humanities and Sciences, Nihon University. 3-25-40, Sakurajousui, Setagaya, Tokyo 156-8550, Japan

** Center for Chronological Research, Nagoya University. Chikusa, Nagoya 464-8602, Japan

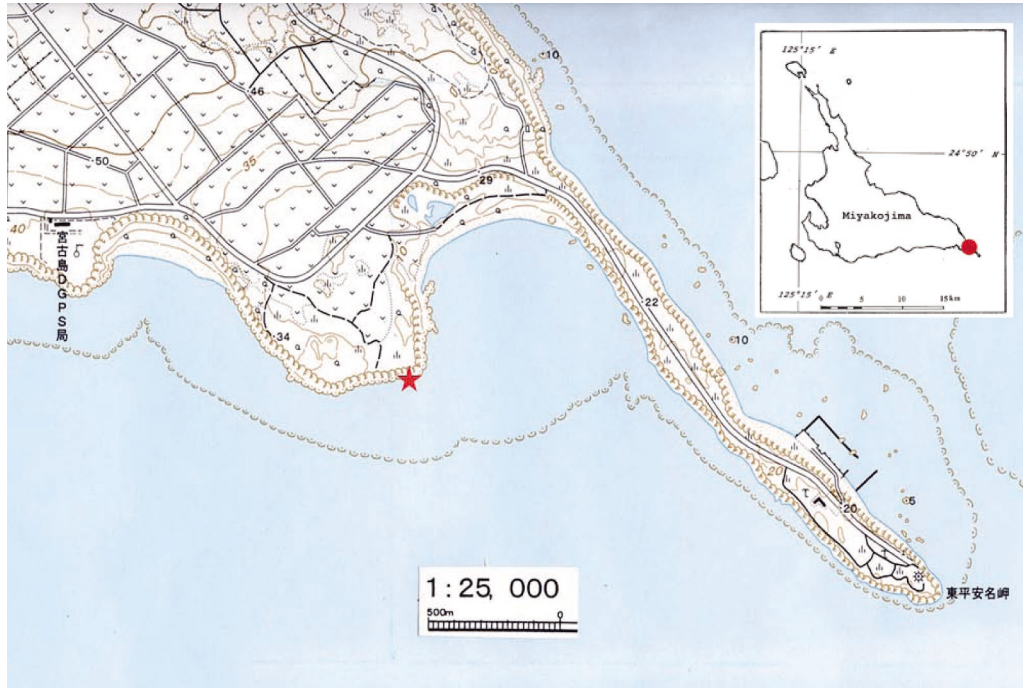
*** Department of Geosystem Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University. 3-25-40, Sakurajousui, Setagaya, Tokyo 156-8550, Japan

**** Riegl Japan Ltd. Fuji Building 2F. 5-11-29, Yayoi-cho, Nakano, Tokyo 164-0013, Japan

***** Cultural Heritage Committee of Miyakojima City. 600-1, Fukusato, Gusukube, Miyakojima-shi, Okinawa 906-0103, Japan

***** Miyakojima City Museum. 1166-287, Higashimakasonesoe, Miyakojima-shi, Okinawa 906-0011, Japan

***** Educational Board of Miyakojima City. 600-1, Fukusato, Gusukube, Miyakojima-shi, Okinawa 906-0103, Japan



第1図 宮古島南東部(右上図)の調査地点(★印)を示す地形図(1:25,000地形図幅「東平安名岬」)
 Figure 1 Index map (upper right) and topographic map showing investigated area with ★ mark
 (1:25,000 Topographic map of Higashihenna-misaki).

秋吉台の秋芳洞の百枚皿はその好例。」と記載されている。

この地形が鍾乳洞内ではなく沖縄県宮古島の南東、国の名勝「東平安名崎」の西方、宮渡崎南端の太陽泉(通称ティダガー:第1図)に存在した。地元の漁師たちは棚田のような地形の存在は知っていた。しかしその地形学的名称や学術的価値については、漁師たちはもとより宮古島市教育委員会をはじめ多くの宮古島市民もまったく認知していなかった。小元は2009年3月、共同執筆者の一人である安谷屋の案内でこの棚田状の地形を観察して「石灰華段丘」であると判断し、その学術的存在価値を高く評価し、概要を報告(小元 2010)した。

石灰華段丘は、中国の「九寨溝」、トルコの「パムッカレ(Pamukkale)」、クロアチアの「プリトヴィツェ(Plitvice)湖群国立公園」、アメリカ合衆国の「イエローストーン(Yellow Stone)国立公園」など野外で形成されたものを除けば、そのほとんどは鍾乳洞内に形成されている。その地形は水を満々と湛えた小さな棚田状の地形が上下左右に展開する特徴を有する。しかしこのような石灰華段丘の形成年代について論じた文献はMas-Pla *et al.* (1992) しか見あたらなかった。

筆者らは学術的価値の高い貴重な存在である宮古島の石灰華段丘について、地形学的・地質学的特徴を明らかにするのみでなく、その形成年代を決定するとともに、

地形形成に関わった湧水の成分についても明らかにしたいと考えた。石灰華段丘を構成する堆積物はその主成分が炭酸カルシウムであるから(前述)、太陽泉の場合は石灰華段丘の上方から流下する湧水が供給源である。しかし石灰華段丘の約半分は満潮時に海水に浸るため、海水起源の炭酸カルシウムの影響も考えられる。いずれにしても石灰華段丘の形成年代は、その堆積物を試料として採取し¹⁴C年代測定を行うことにより決定できる。しかし次に述べるような問題を指摘できる。宮渡崎太陽泉の石灰華段丘の上部からは、幾筋もの湧水が流下しているが、その源は宮古島を構成している第四系琉球石灰岩層と下位の島尻層のほぼ境界付近である。湧水が琉球石灰岩層を透過中に、その成分を溶解した炭酸カルシウムを大量に含んでいれば、湧水の¹⁴C年代は無視できないほど古い年代を示す可能性がある。

一般に石灰岩地域の地表水・地下水・湧水には古い炭酸塩が大なり小なり溶解している。このため石灰華段丘を涵養し、その形成に大きく関わってきた「水の年代とともにその化学成分」についても明らかにする必要がある。水の年代決定を¹⁴C法で行う場合、β線法では200リットル近くを採水しなければならないが、AMS(加速器質量分析)法を使用すれば100ミリリットル程度の試料で十分である。このため湧水の年代決定はAMS法で行い、石灰華段丘堆積物の年代決定はβ線法とともに

AMS法も併用することにした。

本論文はこれまでわが国では年代決定が行われたことのない石灰華段丘の形成年代を明らかにするとともに、その形成に関わる水のはたす役割についてその成分分析結果にもとづき論じ、さらに石灰華段丘の地形学的特徴を表現可能な詳細な地形図について考察し作製することを目的としている。

II 研究方法

1. 精密地形図の作製

(1) 基準点測量

石灰華段丘の地形学的・地質学的特徴は野外調査によって観察した諸特徴と、採取した試料の化学分析結果によって明らかにすることが可能である。野外調査にあたり、まず必要なのは詳細な地形図である。空中写真を撮影して地形図を作製するためには、空中写真の中（地形図中）にあらかじめ基準となる点が必要不可欠である。石灰華段丘は宮渡崎南端の高さ約30mの海成段丘崖下の斜面上にある。この現場に至るには、段丘崖の急斜面上に漁師たちが切り開いた柚道をロープにつかまって降りるしかない。このため段丘上の既知基準点と石灰華段丘のある地点に新たに設置した基準点とを通常の水準測量を行って直接接続することは困難である。そこでまず石灰華段丘上に設置した11個の基準点のほぼ中央部の基準点(No.6)からトータルステーション(TS)を使用して極座標方式で対岸の東平安名岬北部に宮古島市教育委員会が作製した「保良マイバー崖下現況平面図(1/500)」の「基準点11-5」と関連づけた。さらに上記各基準点の座標はNo.6の基準点から極座標方式により算出した。使用した座標は日本測地系(Tokyo Datum)であるため国土地理院がWebで提供している変換ソフトTKY2JGD(Ver.2.1)により世界測地系(JGD2000)に変換した。

(2) 精密地形図の作製

石灰華段丘は直径数cmから10m位まで様々の大きさであり、その比高も数mmから1mまで多様性に富んでいる。このため従来の測量手法では到底このような微地形を表現する地形図の作製は不可能である。本研究に使用可能な詳細な地形図を作製するため、リーグルジャパン株式会社の3Dレーザ・スキャナーVZ-400(time of flight方式)を使用して、石灰華段丘の周辺8箇所から測定しデータを収集した。測定に際してはスキャナヘッドにデジタルカメラNikon D300(f:10mm)を装着し、パノラマ写真撮影も行った。また各測定点のデータを統合する上で、必要な基準点にシリンダー型標識を14点設置した。

2. 水質分析

(1) 採水および分析

宮渡崎太陽泉の湧水および海水は、石灰華段丘を形成する炭酸カルシウムの供給源である。このため湧水や海水の成分分析は不可欠である。検水のため2009年8月に石灰華段丘の中央最高位(第3図の地点A:標高4.5m)、高位(B:3.5m)、中位(C:2m)、低位(D:±0m)からと、吉野海岸の2箇所の湧水(GおよびH)および地下ダムの水(I)をそれぞれ1リットルずつ採水し、ポリエチレン試料容器に入れて持ち帰った。また2010年6月下旬には、前年度の採取位置より約10m東方の高位(E)と低位(F)から、さらに石灰華段丘最上流部の停滞水(No.2)、石灰華段丘高位4地点の湧水(Nos.3, 4, 5, 6)および海水(No.1)をそれぞれ1リットルずつ採水し、ポリエチレン試料容器に入れて持ち帰った。試料採取地点(地下ダムおよび吉野海岸を除く)の詳細は後掲の第3図に記載した。

以上の試料についてpH・RpH・電気伝導度(D-54: HORIBA社)の測定と主要無機成分の水質分析を行い、それぞれの特徴を比較した。無機主要溶存成分の分析は、 HCO_3^- については4.8アルカリ度法を用い、1/50規定の H_2SO_4 滴定にて実施した。その他の主要成分(Na^+ ・ K^+ ・ Ca^{2+} ・ Mg^{2+} ・ NH_4^+ ・ Cl^- ・ SO_4^{2-} ・ NO_3^-)に関しては、イオンクロマトグラフィー法(SHIMAZU, Shim-pack IC-C3・IC-A3カラムを用いSCL-10Avにて制御)により測定した。

3. ^{14}C 年代測定

^{14}C 年代測定は日本大学の ^{14}C 年代測定装置(β 線法)と名古屋大学のAMS ^{14}C 年代測定装置(HVEE Model-4130 AMS based on 3MV tandem accelerator)を使用して行った。この結果についてIntCal04またはIntCal09(Reimer *et al.* 2004; Reimer *et al.* 2009)により暦年代を求めた。その際、海洋生物試料については“reservoir correction”の ΔR 値としてHideshima *et al.* (2001)が石垣島のサンゴ礁で行ったボーリング試料を分析して決定した 35 ± 25 年の値を使用した。試料採取と化学処理法(試料調製)は以下に記載した通りである。

(1) ^{14}C 年代測定試料の採取

石灰華段丘堆積物、ビーチロック状堆積物中の貝化石、化石サンゴおよび石灰質礫岩、湧水、停滞水、海水などを2009年3月29日、8月4日、12月22日、2010年5月2日および6月28日にそれぞれ採取した。

このうち石灰華段丘堆積物は、東西に分布する石灰華

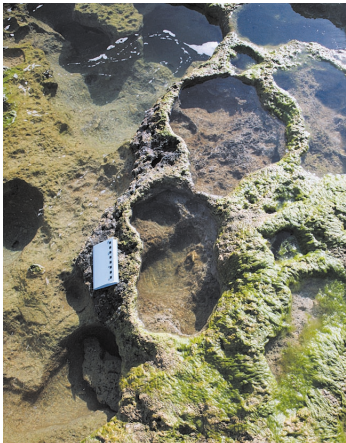


写真-1 Rim stoneから年代測定試料(野帖の右側)を採取
Photo-1 One of the sampling site of rim stone sample.



写真-2 石灰華段丘中央部の簡易ボーリング地点
Photo-2 A view of boring site 2, center of Tidagah.



写真-3 ビーチロック状堆積物から貝化石を採取
Photo-3 Sampling site of fossil shell from beach rock.



写真-4 西側の最大規模の石灰華段丘(左下)と階段状石灰華段丘(中央)。写真の右端にノッチがみえる。
Photo-4 The largest travertine terrace (left lower) and staircase travertine terraces (middle), west of Tidagah.



写真-5 中央東側に分布する魚鱗状石灰華段丘
Photo-5 The squamosa travertine terraces, middle east part of Tidagah.



写真-6 中央および低位の石灰華段丘
Photo-6 Travertine terraces of middle and lower part of Tidagah.

段丘中央部の低位（海拔-0.5m：写真-1）、中位（0～+0.5m）、高位（3.5m）および最高位（4.5m）のrim stoneと中位のrim stone pool底から採取した（写真-2）。rim stone pool底から試料を採取するため、内径48mm、長さ50cmの鉄パイプの先端をグラインダーで削ったものを準備した。これをrim stone pool底に直立させて、その上部を「かけや」または「岩石ハンマー」でたたいて打ち込む「簡易ボーリング」を行った。その結果、東部の石灰華段丘から約19cm、中央部の石灰華段丘で約13cm、そして西部の石灰華段丘から約40cmのコアをそれぞれ採取することができた。これらの試料について鉄パイプの最下部約1cmを取り出したところ、“varve”（年縞）のような細粒堆積物より成る年相（層）構造が認められ、また直径3～5mmの細礫、化石サンゴ片、生物遺骸なども観察された。

石灰華段丘がよく発達する中央部から東方にかけて標高約2.5mから0mにかけてビーチロック状の堆積物が数列見られ、その中には貝化石をはじめ化石サンゴが含まれていた。このため、貝化石をはじめ化石サンゴの破断面を観察し汚染されていないものを年代測定試料として採取した（写真-3）。石灰質礫岩（calcarenite）について年代測定するため試料を採取していた時、偶然その中に埋まっていた貝化石（エダカラ：*Cyprae teles*）を発見し、試料（NUTA2-15838）として採取した。この試料はビーチロック状の堆積物の年代を決定するのに最適の試料と考えられた。各試料採取地点は後掲の第3図に記載した。

採取した試料はプラスチックバッグに入れ、¹⁴C年代測定のために日本大学年代測定室に持ち帰り、さらに必要に応じてAMSによる¹⁴C年代測定を行うため名古屋大学年代測定総合研究センターに送付した。

(2) 試料の調製と¹⁴C年代測定

AMS法

2009年3月29日に採取した石灰華段丘堆積物（travertine）については、こぶし大の塊から親指大程度の新鮮な部位を選別して蒸留水による超音波洗浄を行って¹⁴C年代測定に用いた。貝化石試料は、蒸留水に浸して超音波洗浄して汚れを取り除いたあと、微量片に分割した。これらの塊について、0.2規定塩酸で表面を溶解除去して、内部を分析試料として用いた。試料を水洗後、乾燥して、ステンレス製乳鉢で粉末にした。2009年8月4日以後に採取した石灰華段丘堆積物については、日本大学から微細片の状態を送付されてきたため、そのまま粉末部分を必要量分取して用いた。化石サンゴおよび貝化石試料は、超音波洗浄の後、0.2規定塩酸で表面を溶解除去して、内部を分析試料として用いた。試料を水洗後、

乾燥して、ステンレス製乳鉢で粉末にした。石灰華段丘堆積物（travertine）、化石サンゴおよび貝化石試料の粉末を適当量分取して真空反応容器内で85%のリン酸試薬と反応させて二酸化炭素を抽出した。さらにこれを鉄粉触媒のもとに620℃で、水素による還元を行ってグラファイト（石墨）に変えた。調製されたグラファイトは、アルミニウム製のターゲットホルダーに圧縮封入して、AMS装置に用いるターゲットとした。

湧水、海水、石灰華段丘の溜まり水の溶存無機炭酸については、塩化ストロンチウムを試料水に加えて、炭酸ストロンチウムの沈殿を作り、それをリン酸で分解して二酸化炭素を得た。その後は、炭酸カルシウム試料と同様に、グラファイト・ターゲットを作成した。

また、¹⁴C年代測定に不可欠な、¹⁴C濃度が既知の標準体としては、米国国立標準技術研究所（NIST）から提供されている国際的な標準体であるシュウ酸（NIST-SRM-4990C（HOxII））を用いた。さらに試料調製過程および¹⁴C測定における¹⁴Cブランク試料の補正を行うためにキシダ化学（株）製の特級シュウ酸（2水和物）試薬（#57952）を用いた。両シュウ酸の約14mgを約500mgの線状酸化銅と共にパイレックス管に入れて排気したあと封管し、500℃にて2時間加熱することによって完全に燃焼して二酸化炭素を得た。次に、年代測定試料の場合と同様に、真空ラインを用いて二酸化炭素を精製したあと、約1.5mgの炭素に相当する二酸化炭素を分取してグラファイトに還元し、これをアルミニウム製の試料ホルダーに圧縮封入して¹⁴C年代測定のための¹⁴C濃度標準体、および¹⁴Cブランク補正用として用いた。

試料から得たグラファイトおよびシュウ酸を処理して得たグラファイトについて、名古屋大学のタンデトロン加速器質量分析計を用いて¹⁴C年代測定を行った。タンデトロン分析計では、¹⁴C、¹³C及び¹²Cが測定される。同分析計を用いて得られた炭素安定同位体比¹³C/¹²Cを用いて同位体分別の補正を行ったのち、試料の¹⁴C年代値（conventional ¹⁴C age: 同位体分別補正¹⁴C年代）を算出した（中村，2003）。¹⁴Cの半減期としては、国際的な慣例に従って、Libbyの半減期5,568年を用いた。¹⁴C年代値は、西暦1950年から遡った年数として与えられる。誤差はone sigma（±1σ；1標準偏差）を示した。また、幾つかの試料については、¹⁴C濃度が、1950年の標準濃度として定義される値である（¹⁴C/¹²C）_{AD1950}より高い値が得られた。環境試料の¹⁴C濃度として表すために、標準体及び試料中の¹⁴C濃度の減衰補正を行い、試料を採取した年の¹⁴C濃度を算出した。¹⁴C濃度は、以下の式で定義されるΔ¹⁴Cで示した（Mook and van der Plicht 1999）。

$$\Delta^{14}\text{C} = [({}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{spl}} / ({}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{AD1950}} - 1.0] \times 1000 \text{ (‰)}$$

また、得られた¹⁴C年代の暦年較正については、IntCal04データセット (Reimer *et al.* 2004) および較正プログラム Calib5.0 (Stuiver *et al.* 2005) を用いた。

β線法

β線法の化学処理は次のようにして行った。石灰華段丘堰堤 (rim stone) 堆積物はその表面が薄い緑色を呈していたため表面から約2~3cm内部から汚染されていない新鮮な約50gを取り出し試料とした。また簡易ボーリング・コアは、それぞれの下部から厚さ約5~10mmを取り出し試料とした。これらをアルミホイルで包み、ルツボに入れ、その周りに石英砂をいれてルツボにふたをした。これを電気炉に入れて450℃で1時間保った後に自然冷却した。ルツボが冷却後に内部から試料を回収し、鉄鉢で粉末にして計量後チャック付きビニール袋に入れ、ラベリングして保管した。

貝化石や化石サンゴ試料は、まず表面の汚れ (付着物) を電動グラインダーで削り落とした。次に1規定 HClで試料の約20%を溶解除去し、蒸留水で洗浄後に電気乾燥機で乾燥した。乾燥した試料の破断面を観察し、汚染や変質の有無を観察した。汚染や変質のないことを確認後に計量し、これをルツボに入れて電気炉の温度を450℃に上げて1時間保った後に自然冷却した。冷却後に試料を回収し、鉄鉢で粉末にして計量後チャック付きビニール袋に入れラベリングして保管した。以下の化学処理は小元 (1993) にもとづき行い、炭酸カルシウムを生成した。

この炭酸カルシウムにクエン酸溶液 (1:1) を滴下し二酸化炭素を発生させ、液体窒素で試料フラスコに貯蔵した。二酸化炭素発生時に生じた水分は、ドライアイス粉末にしてアルコールと一緒に入れた魔法瓶で真空回路のトラップを冷却して除去した。試料ガスはフラスコに入れたまま2週間放置し、ラドンの壊変を待った。二酸化炭素はこの後、あらかじめ水素で還元しておいた銅網や銀網の中を通して酸素やハロゲン化合物を除去した。

日本大学年代測定室のβ線法は、ガスプロポーションナル・カウンターを使用する気体計数法と液体シンチレーターカウンター (Liquid Scintillation Counter) を使用する液体法を併用している。今回は気体計数法により二酸化炭素を試料としてβ線を測定した。β線の測定は、各試料について3本のガスプロポーションナル・カウンター (Houtanman and Oeschger型: 容積約1リットル) のいずれかを使用してβ線を1,500分ずつ最低2回測定し、ノイズの有無を確認した。β線の測定後、試料の付加誤差

が±2σに入った測定値の平均値があればこれを採用した。通常2回の測定で付加誤差の±1σに入る。一方試料の安定同位体比 (δ¹³C) は、¹⁴C年代測定に使用した二酸化炭素をIsoPrime (Micromass Co. Ltd.) で計測した。¹⁴C年代およびδ¹³Cの校正にはN.B.S. (SRM-4990C) およびOztechのIsotope Ratio Reference Gas (δ¹³C = -3.65‰ PDBおよび同-40.79‰ PDB) を使用した。このようにして決定したconventional ageを暦年代に変換するため、IntCal04およびIntCal09データセット (Reimer *et al.* 2004; Reimer *et al.* 2009) の較正プログラムを使用した。

III 野外調査および試料の分析結果¹⁾

1. 石灰華段丘と周辺の地形の特徴

石灰華段丘は標高約7mの海成段丘の下方、標高約4mから低潮位までの範囲に、汀線にそって長さ約70m、幅最大約30mにわたり発達している。高潮位 (約1m) には石灰華段丘のほぼ中央部まで海水が侵入する。個々の石灰華段丘の平面形は変化に富み、不規則な形状を呈する。最大規模の石灰華段丘は西部にあり (写真-4および7)、その長径は約10mである。急斜面状に発達する石灰華段丘の両端の標高約0.5mおよび約2mには琉球石灰岩層を侵食して形成されたノッチが発達している (写真-4)。各rim stone pool間の段差もそれぞれ異なり、5mm程度から約1mのものまで様々である。中央より東部の標高2m~3.5mには段差の小さな魚鱗状のrim stone pool群をもつ石灰華段丘が発達している (写真-5)。rim stone poolは小さいものは約15×30cm、水深は約5~8mm、poolの中には緑色や褐色の堆積物 (石灰華や藻類) を有するものが多い。低位の石灰華段丘は高位の石灰華段丘より一般に大きい傾向が認められ (写真-6)、平均潮位以下にはポットホールが随所に発達している。さらに石灰華段丘の見られる東端部には海食洞があり、大小の岩塊が多く石灰華段丘は少ない。その洞底にはビーチロックがみられ、天井には小規模なストローや鍾乳石が認められる。ティダガーの石灰華段丘の総数は少なくとも300をこえる。

調査地域の中央部には長さ10~15mのビーチロック状堆積物がほぼ南北に3列見られ、その南端は低潮位以下まで続いている。また一部ではこのビーチロック状の堆積物上に石灰華段丘が形成されている。西側ではビーチロック状の堆積物上に、高さ3.8m周囲15m以上の大きな津波石があり、その陸側には長径10mのティダガーで最大規模のrim stone pool (写真-7) がある。

石灰華段丘の3次元 (3D) 点群斜め画像を写真-7と写



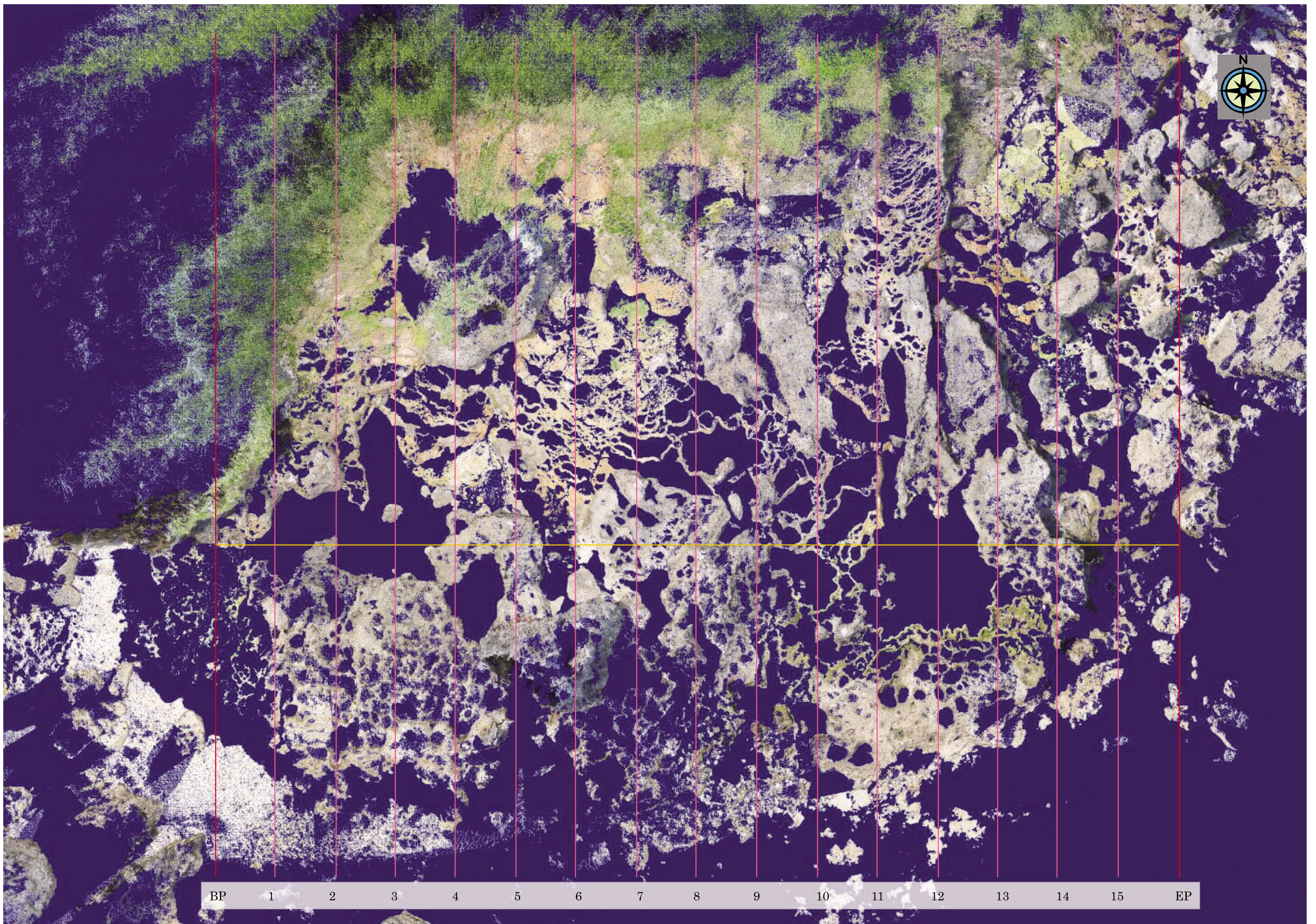
写真-7 南東部海側から見た最大級の rim stone pool（左下）と西端の急斜面上に形成された石灰華段丘の3次元点群画像。黒色部分は水面またはレーザの不到達域を示す。

Photo-7 Point cloud view of travertine terraces viewed from southeast sea-side. Black colored areas represent local water tables (surfaces) or out of areas of laser reflections.



写真-8 北東部海側から見た中央部の石灰華段丘の3次元点群画像。黒色部分は水面またはレーザの不到達域を示す。灰色は基盤岩（左上）、津波石（左端）、およびビーチロック状堆積物（中央～右端）を示す。

Photo-8 Point cloud view of central part of travertine terraces viewed from northeast sea-side. Black colored areas represent local water tables (surfaces) or out of areas of laser reflections, while grey colored areas represent bedrock (left upper), Tsunami boulder (left) and beach rocks (middle~right end) respectively.



第2図 宮古島宮渡崎太陽泉（ティガダー）の正射投影詳細写真地図
 緑色は海成段丘上の草木類、黄色～黄褐色は石灰華段丘、灰色はビーチロックや津波石などの岩類、青色はrim stone poolや海面、またはレーザーの不到達部を示す。南北の赤色線は第4図の地形断面位置を示し、その脇の黄色線は各断面の中心線を示す。

Figure 2 Precise orthograph for Tigadah, Miyadouzaki, Miyako Island.
 Green color indicates grass and trees on marine terrace while yellow and brown colored parts indicate travertine. Grey colored areas indicates beach rocks and tsunami boulders or other rocks. Blue colored areas indicate rim stone pools and sea surface else it indicates a place where the laser beam was out of range. Red colored lines indicate locations of cross sections shown in Figure 4 and yellow lines indicate center of each cross section.

真-8に示す。画像が粗く粒子状に見えるのは、3次元座標をもつ点群データに画像の色情報を結合したためである。

写真-7は写真-4に対応している。この写真からも汀線付近ではrim stone pool間の落差は大きいことが読み取れる。また形成されたrim stone pool自体も大きいので、「臼を上下に積み重ねたような形状」を呈している。写真左側に見えるノッチの後退点標高は約2mであり、もっとも西のrim stone poolの標高は1.5~1.8mである。その東側（右側）のrim stone poolの標高は約1mであり、このrim stone poolからボーリング試料（B-3）を採取した（写真-2）。

写真-8は、調査地域の中でもっとも典型的に発達している石灰華段丘群を示している。湧水は最上段のrim stone poolに溜まり、5~6条の侵食溝を通して下位のrim stone poolへと扇状に流下し多数のrim stone poolを形成している。この石灰華段丘の前面には大きな津波石があるため、中心線より東側の流路は東に向かい東側に形成されている石灰華段丘のrim stone poolと合流し、海に注いでいる。この石灰華段丘の上端から末端までの斜距離は、西側で4.6m、中央が6.0m、東側では5.8mあり、それぞれの高低差はいずれも1.2m、従って傾斜はほぼ12~15°である。扇状地状の末端に形成されているrim stone poolの水面は標高1.6mで、これから東側は傾斜が緩やかとなり、扇状地面に形成されたrim stone poolよりやや大きなrim stone poolを形成しながら海へと注いでいる。扇状地状の末端から海までの斜距離は18.8m、高低差は1.3mなので、傾斜は約4°と緩やかである。rim stone poolの大きさは扇状地状の末端のものうち比較的大きなもので長径3.4m、短径1.1mである。

2. 精密地形図

3Dレーザ・スキャナーで取得したデータは約1億5千万点に達した。この点群データを水平方向には2cmごとに1点、高さ方向は1cmごとに1点の割合でフィルター処理すると同時にrim stone poolに反射した誤謬点群を除去して約2,200万点の点群データに整理した。これらのデータは各計測点を原点とする座標データである。これをシリンダー型の基準点（リフレクター）を用いて1つの座標系に統合し、かつ世界測地系（JGD2000）座標上に展開した。さらにこれらの点群データをスキャナヘッドに搭載したカメラで撮影したデジタル画像とレンダリングして、3次元の画像データに変換した。従って、コンピュータ上で視点の座標を与えるといろいろな角度から観察可能である。

このようにして取得した3次元点群画像データを正射投影し第2図を作成した。この図で緑色に見えるところは段丘上の草木類、黄色~黄褐色は石灰華段丘、灰色はビーチロック状堆積物や津波石などの岩盤や岩塊、青色はrim stone poolの水面や海面またはレーザが照射されなかった部分である。図中の縦線は南北方向に2.5m間隔で描いた地形断面図（後述）の位置を示している。

第3図は3次元点群データを処理ソフトLAND FORMSをもちいて描いたコンター図である。等高線間隔は2.5cmで、0.5mごとに赤色で表示している。図中の赤色丸印は¹⁴C年代測定試料採取地点、青色の四角印は採水地点、橙色の菱形印はスキャナ撮影点、赤色の★印はリフレクター設置点、緑色の三角印は基準点をそれぞれ示している。この図の西南隅の座標は、X：-140,020.0, Y：146,455.0である。

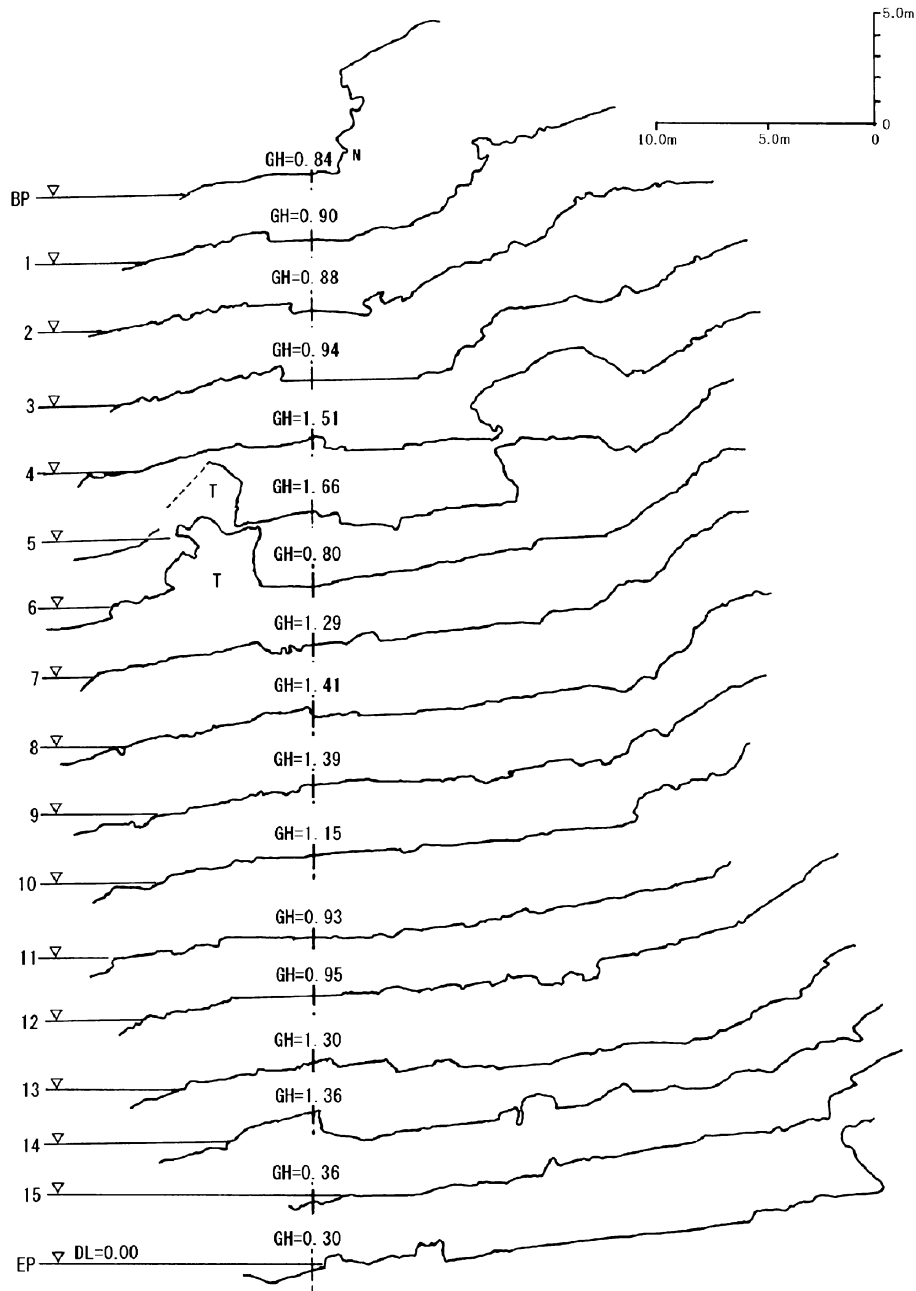
第4図は南北方向に2.5m間隔で東側から西側を見た地形断面図である。BP（Beginning Point）が最も西側であり、EP（Ending Point）が最も東側になる。中心線の位置に各地点の標高（GH）をメートル（m）で表示した。左側の水平面は各断面のdatum lineである。BPの座標は、X：-140006.0, Y：146,460.0である。

3. 水質分析結果

15地点から得られた検水の水質分析結果を整理し、第1表に示す。無機主要溶存成分の陽イオンと陰イオンの分析誤差率は何れも5%未満であり、これらの結果は、APHA-AWWA-WEF（1989）によって定められている誤差率の範囲内にある。電気伝導度は、15地点中12地点では614~1,206 μ S/cmの範囲内にあるが、1地点において2,810 μ S/cm、さらに残りの2地点では、16,000 μ S/cmおよび47,200 μ S/cmと高い値を示した。pHの測定値が得られた9地点についてみると、弱酸性を示す2地点を除き、ほぼ中性（pH7.02~7.58）を示す検水が7地点を占めた。主要溶存成分からみた水質組成の特徴については後述する。

4. ¹⁴C年代測定結果

採取した試料をAMS法および β 線法で¹⁴C年代測定した結果を第2表に示す。宮古島に発達するビーチロックの¹⁴C年代（小元 2005, 2009および2010）と太陽泉で観察したビーチロック状堆積物と石灰華段丘との層序関係から、石灰華段丘の形成年代はおそらく数千年前であろうと推察していた。石灰華段丘の中位から採取したrim stone試料（NUTA2-14764やNU-1994）をはじめに測定したところ、“modern”あるいは“super modern”となっ



第4図 宮古島宮渡崎太陽泉（ティダガー）の南北方向の地形断面図
断面図の間隔は2.5m。図中の番号は第2図と対応する。図の中央の数字は標高（m）を示す。Tは津波石を、またNはノッチを示す。▽印は海面を示す。BPは地形断面図の開始地点を、またEPは終了地点を示す。

Figure 4 Longitudinal profiles (North-south direction) of Tigadah, Miyadohazaki, Miyako Island.
Each interval is 2.5m respectively. Figures in the map are correlative with the figures described in Figure 2. Figures expressed in center indicate elevations. “T” means a Tsunami boulder while “N” means a notch.

た。推定値と全く異なるため中村はさらに2件の試料を、小元は3件の試料を測定したが、その結果は前回と同じ“modern”や“super modern”となった。石灰華段丘のrim stoneから採取した試料はNU-1995をのぞき、すべてが“modern”あるいは“super modern”となった(第2表)。唯一年代が確定したNU-1995は、石灰華段丘の発達する中央部高位の石灰華段丘の垂直部位(5cm内

部)から採取した試料である。

以上の結果とは対照的にボーリング・コア試料からは有意の年代が得られた。しかしながら、ほぼ同じ年代が期待された試料であっても測定結果が大きく乖離した試料も出た。類似の年代が得られた試料は、ビーチロック状堆積物中から採取した貝化石(NUTA2-15502およびNU-2139)の年代とボーリング・コア-3(NUTA2-15841

第1表 宮古島から採取した湧水・地下水・海水の水質分析結果
Table 1 Results of chemical analyses of spring, underground and sea water samples collected from Miyako Island.

採水地点	採水年月日	pH	RpH	電気伝導度 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	Br (mg/L)	分析誤差率 (%)
A 石圧華段丘中央最上流	2009/8/04	6.20	6.87	836	61.7	1.46	66.3	9.5	0.35	97.7	43.3	196.2	24.5	0.00	0.25	3.1
B 同中央中位	2009/8/04	6.64	6.84	809	61.7	1.35	71.8	9.1	0.43	98.0	42.7	202.4	23.8	0.00	0.18	2.0
C 同中央低位	2009/8/04	7.02	7.13	1,206	143.4	4.39	67.9	17.3	1.21	244.9	63.4	187.0	22.2	0.00	0.58	1.9
D 同中央最低位	2009/8/04	7.36	7.38	16,000	2,981.8	108.68	249.6	336.0	13.08	5,374.5	764.3	162.5	10.3	0.00	14.17	0.8
E 同中央東上流	2009/8/04	7.58	7.53	920	60.8	1.28	77.2	11.1	0.20	95.0	42.4	257.6	24.5	0.00	0.24	4.7
F 同中央東低位	2009/8/04	7.56	7.51	2,810	402.5	14.27	92.7	45.3	1.89	709.9	127.1	208.5	21.7	0.00	1.64	0.2
G 吉野海岸湧水	2009/8/08	7.57	7.48	872	69.3	2.59	72.8	11.1	0.40	135.8	40.7	208.5	11.2	0.00	0.17	3.9
H 吉野海岸入口湧水	2009/8/08	7.54	7.50	1,111	91.0	3.21	91.6	15.1	0.93	190.6	47.4	239.2	7.8	0.00	0.28	2.5
I 地下ダム	2009/9/28	7.22	7.92	614	29.3	0.26	70.4	7.4	2.11	59.0	30.1	220.8	7.5	0.00	0.00	4.4
1 石灰華段丘西南の海水	2010/06/28	-	-	47,200	10,089.6	351.89	623.4	1,094.9	-	17,768.7	2,699.2	131.1	12.5	0.00	60.26	0.8
2 同西上部滞留水	2010/06/28	-	-	760	69.8	1.19	62.9	8.4	-	97.1	46.8	209.2	26.1	4.32	0.42	4.9
3 同中央最上流	2010/06/28	-	-	740	69.7	1.13	61.9	8.8	-	98.1	47.9	184.1	22.3	4.01	0.38	2.2
4 同中央東湧水	2010/06/28	-	-	750	66.0	1.12	69.0	8.4	-	88.0	47.0	213.3	25.8	6.28	0.27	2.8
5 同東部湧水	2010/06/28	-	-	790	67.3	1.13	76.2	8.5	-	90.5	46.7	215.6	25.8	3.72	0.25	0.4
6 同東部洞窟内	2010/06/28	-	-	750	68.6	1.16	66.3	8.3	-	94.2	46.5	200.6	25.3	4.03	0.24	2.5

第2表 宮古島宮渡崎太陽泉（ティダガー）から採取した試料の較正年代

Table 2 Calibrated ages of sample materials collected from Tigadah, Miyadohzaki, Miyako Island.

Lab. Code No.	Material	$\delta^{13}\text{C}$	Conv. Age	$\pm 1\sigma$	Cal (m)	Remarks
NU-2114	rim stone	-3.31	406.4‰	—	—	lowest
NUTA2-14764	rim stone	-5.20	49.8‰	4.0‰	—	middle
NUTA2-14765	Do.	-5.10	49.1‰	4.0‰	—	Do.
NUTA2-14766	Do.	-4.80	36.5‰	3.9‰	—	Do.
NUTA2-15497	rim stone	-3.90	14.5‰	3.0‰	—	middle
NU-1994	Do.	-4.46	62.0‰	—	—	Do.
NUTA2-15496	rim stone	-5.00	14.5‰	3.0‰	—	higher
NU-1995	Do.	-4.28	2802	52	2908	Do.
NU-2142	Do.	-3.30	421.9‰	—	—	highest
NUTA2-15495	travertine	-4.60	2021	25	1969	bore core-1
NUTA2-15842	Do.	-7.00	1500	29	1380	Do.
NU-2119	Do.	-3.68	3594	47	3901	Do.
NUTA2-15496	travertine	-4.80	17433	52	20574	bore core-2
NUTA2-15843	Do.	7.70	1722	29	1632	Do.
NU-2120	coral	-0.70	3702	48	4041	Do.
NUTA2-15841	travertine	-5.10	1190	28	1116	bore core-3
NU-2108	Do.	7.00	1189	57	1116	Do.
NUTA2-15502	shell	1.90	966	25	533	beach rock
NU-2139	Do.	2.41	1065	45	602	Do.
NU-2140	Do.	2.44	480‰	—	—	Do.
NU-2141	coral	0.67	modern	—	—	Do.
NUTA2-15838	shell	0.00	1812	28	1321	Do.
NUTA2-14672	spring water	-8.40	224	30	188	higher water
NUTA2-15952	standing water	-7.20	251	19	286	highest water
NUTA2-15951	sea water	-2.70	18.5‰	—	—	sea water

およびNU-2108)の年代である。一方ボーリング・コア-2 (NUTA2-15496, NUTA2-15843およびNU-2120)の年代は、17433±52 BPから1722±29 BPまで、大きな年代差が生じた。この原因については後述する。

湧水およびrim stone pool最上位から採水した停滞水 (NUTA2-15952)の ^{14}C 年代は251±19 BPとなり、上位より採水した試料 (NUTA2-14672)の年代224±30 BPと±1σの誤差範囲に入る。しかし西部の石灰華段丘で採水した海水 (NUTA2-15951)の ^{14}C 年代は“modern”で、その ^{14}C 濃度 ($\Delta^{14}\text{C}$)は18.5±2.5‰であった。

ビーチロック状堆積物から採取した試料の中で、ヒレナシジャコ (*Tridacna derasa*)は966±25 BP (NUTA2-15502)および1065±45 BP (NU-2139)を示し、貝化石のエダカラ (*Cypraea teles*)からは1812±28 BP (NUTA2-15838)の年代が得られた。しかしビーチロック状堆積物の表面に一部が露出していたシャコ貝 (*Tridacna sq.*: NU-2140:写真-5)や化石サンゴ (NU-2141)の年代はいずれも“super modern”であった。

Geyh and Schlericher (1990; p.166)はtravertineの

$\delta^{13}\text{C}$ 値について+10~-10‰の数値を報告している。今回測定した石灰華段丘堆積物の $\delta^{13}\text{C}$ はすべてこの範囲に入っている。石灰華段丘堆積物の多くの $\delta^{13}\text{C}$ はマイナスの値となっているが、ビーチロック状堆積物に含まれていた貝化石や化石サンゴ試料の $\delta^{13}\text{C}$ はいずれもプラスで0.0~2.44‰の範囲にある (第2表)。これらの数値もほぼGeyh and Schlericher (上掲)の海洋生物の $\delta^{13}\text{C}$ の範囲に入っている。

IV 考察

1. ビーチロック状堆積物と石灰華段丘の層序および年代

2009年8月以降の野外調査により、前報 (小元, 2010)のように石灰華段丘のすべてがビーチロックより下位に形成されているとは限らないことが明らかになった。すなわちビーチロックの上部にも形成されている石灰華段丘が確認された (写真-5および写真-8の右中央)。さらにビーチロックは各所で波浪により破壊されており、下位の島尻層が観察される深さ約1mに達する侵食谷が発達している場所 (写真-8の右下方)も中央よりやや東側

で確認された。このため前報で考えたようにすべての石灰華段丘の形成年代がビーチロックの年代より古いと断定することは困難になった。

さらにビーチロックとして前報で記載した堆積物は大小の砂礫、貝化石、化石サンゴなどが混在する物質が膠結した状態を示していた。しかしこの堆積物について次のような疑問点があった。第1点はビーチロック状堆積物が標高約2.5mまで分布することである。ビーチロックであるとすれば上限高度2.5mは異常に高すぎ、明らかに離水している。しかし宮古島南東部において過去3,000年間に顕著な海水準変動や地殻変動の記録は存在しないため、高位海水準でその形成を説明することは不可能である。また第2の問題点はビーチロック状堆積物が非常に堅固で、一つ東隣のマイバーバマの潮間帯に分布する軟弱なビーチロックとは対照的なことである。このビーチロック状堆積物の年代は“modern”や“super modern”となった試料も存在するが、信頼できる試料と判断したエダカラ (*Cypraea teles* : NUTA2-15838) の年代は1,321cal BPである。この年代はマイバーバマのビーチロックの年代 (1,200~1,300cal BP) と調和的である。

これらの疑問を解決するため関西大学の木庭元晴教授に前報でビーチロックとしていた石灰質礫岩試料について顕微鏡による鑑定を依頼した。その結果、「試料は全部再結晶しており、“*Marginopora*”という薄い礁原でも生きている底棲有孔虫が観察され、この底棲有孔虫が破壊されていないことからビーチそのものの堆積物ではなく、丸い石灰碎屑物も多いため“リーフギャップ沖海底”の海底扇状地の堆積物の可能性がもっとも高い」という指摘を受けた。この結果は石灰華段丘付近のビーチロック状堆積物は後背の琉球石灰岩の延長であることを示唆している。また木庭教授は「aragoniteからcalciteに変質した試料を測定した場合、その年代は新しくなる」という河名・中田 (1994) の主張と正反対の見解を示した。平良ほか (1988) は石垣島から採取した津波石と石灰岩についてAMSを使用して測定した結果を報告している。それによれば、石垣島大浜から採取した2件の*Favoidal* 試料のうちcalciteが0%の試料は1,830 ± 130y BPを示し、一方calcite率7.7%の試料は2,520 ± 240y BPの年代を示した。calciteが100%の*Favoidal* 試料1個と5個のlimestoneについて測定した結果、22,600y BPから27,070y BPの年代が得られたことを報告している。おそらくlimestoneとした試料は琉球石灰岩であろうから、本来ならばバックグラウンドの計数率となり有意の年代とはならない筈である。したがってこの試料は汚染され

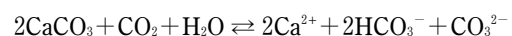
ていたと解釈すべきであろう。

ビーチロック状堆積物の再結晶が何時生じたかは問題であるが、その時期は特定できず、またその影響が中に入った貝化石まで及んでいたかどうかまでは確認できない。貝化石が含まれていた堆積物が琉球石灰岩層の一部であれば、既述のように本来ならば¹⁴C法による年代決定は不可能である。再結晶した物質中にあった貝化石の年代が東隣のマイバーバマのビーチロックの年代と整合的であったのは、真の年代を示さないと解釈すべきなのであるか？一方標高約2.5mという高度までビーチロックが存在する理由について小元は、琉球石灰岩層下部からの湧水のため炭酸カルシウムを多く含むため膠結作用がほかの地域の湧水よりも大きいと解釈していた。このような事例はこれまでも南西諸島において存在する (小元, 2000; 2003; 小元ほか, 2003; 小元, 2004; 2005)。しかし前述のように宮渡崎のビーチロック状堆積物は、固結状態からは到底1,300年前程度の堆積物には見えないほど堅固である。このためビーチロック状堆積物は、琉球石灰岩層の一部であり、沖合にリーフが形成される以前に波浪によって侵食されて形成されたベンチ状の地形であり、これを侵食した谷沿いや、その上部に石灰華段丘が形成されたと解釈した方が観察事項と整合しているように思われる。

2. 炭酸カルシウムの起源と析出

次に石灰華段丘を構成する炭酸カルシウムの起源と、その析出過程について記載する。海成段丘上の降雨は第四紀琉球石灰岩層を透過し下位の島尻層上部から湧水となって流出している。石灰華段丘堆積物は析出沈殿した炭酸カルシウムが海食崖からの崩落物質や、降雨によって運搬された物質などと共に固結して形成されている。石灰華段丘の形成に関わった炭酸カルシウムの起源がすべて地下水に溶解した琉球石灰岩であれば、溶解物質はいわゆる“dead carbon”であるから¹⁴C法による年代決定は不可能である。

二酸化炭素が水に溶解し石灰岩を溶解する反応は下記の左辺の化学式で示される。



正反応の結果、電離したカルシウムと炭酸塩などが生ずる (右辺)。そしてこの逆反応により炭酸カルシウムが析出すると考えられている (Ford and Williams 2007)。

上記の正反応時には水中の二酸化炭素の濃度が大きなるほど溶食力は大きくなり、また水量が大であれば溶食力も

大となる。一方逆反応時には飽和水溶液中から水分が蒸発し、石灰岩の成分である炭酸カルシウムの濃度が高まって析出・沈殿が開始される。可逆反応時には石灰岩から生じた二酸化炭素は大気中の二酸化炭素と入れ替わる。しかしながら水中の炭酸が100%置換しなければ、これらの地下水や湧水を試料として¹⁴C年代測定を行った場合、その年代は“modern”とはならず、ある年代 (reservoir age) を示すことになる。今回測定した湧水試料 (A-6) の年代である 224±30 BP、あるいは rim stone pool の停滞水 (F-2) の年代である 251±19 BP は、宮古島の湧水の年代として水文学的に計算された数年 (高村・河野 2008) という数値に比べて桁違いに大きい。この結果は降雨が琉球石灰岩層を透過する際に溶解した炭酸カルシウムや炭酸塩の残存¹⁴C濃度を示すと解釈できる。

3. 地形図の表現限界

今回 3D レーザ・スキャナーを使用して収集したデータにもとづき地形図を作製するにあたり地形図の縮尺と高度の表現限界について考察した。その結果は以下の通りである。

地形図の縮尺を仮に 1/100 とすれば、直径 1m の石灰華段丘は地形図上では 1cm で表現できる。しかし石灰華段丘は汀線にそって約 70m の長さに渡り分布するため、地形図の横幅は 70cm となる。このような縮尺の地形図は作業図としてはきわめて有効であるが、本誌には到底掲載できない。本誌に掲載可能な図は見開きでも A3 版よりやや小さい図に限定される。すなわち本誌に掲載可能な地形図の限界は 1/200~1/300 程度の縮尺となる。この場合、直径 1m の石灰華段丘は地形図上では 5mm~3mm となり、地形図上で判読可能な限界となる。よってこれより小さな石灰華段丘を図上で判読することはできなくなる。

次に等高線間隔は使用した 3D レーザ・スキャナー VZ-400 の測定精度が ±5mm であるため、理論上は等高線間隔 1cm 程度から任意の等高線間隔まで設定可能である。現地調査により石灰華段丘の rim stone pool の高度差は数 mm から約 1m まで様々である。このような微細な地形を表現するには、通常の平板測量などでは不可能であり、ステレオ写真測量でも準備等で課題が多い。石灰華段丘地形について、その平面形が判読可能な等高線の間隔について 3D レーザ・スキャナーで収集したデータにもとづき各種の等高線間隔で試行錯誤しながら PC 上で地形図を作製し検討した。石灰華段丘の高度は標高約 4m から平均潮位下 1m までの範囲に分布するため、1cm の等高線間隔で描画すれば等高線の総数は 500 本と

なる。rim stone は急傾斜しているため等高線が密になり、場合によってはその比高 (rim stone の高さ) を地形図上で測定しようとしても、等高線が輻輳し真っ黒となり判読不能になる (第 3 図の E4-5, F4-5 ほか)。しかし等高線間隔を 0.5m や 1m にすれば粗すぎて小さな段差を有する石灰華段丘の特徴を十分に表現できない。

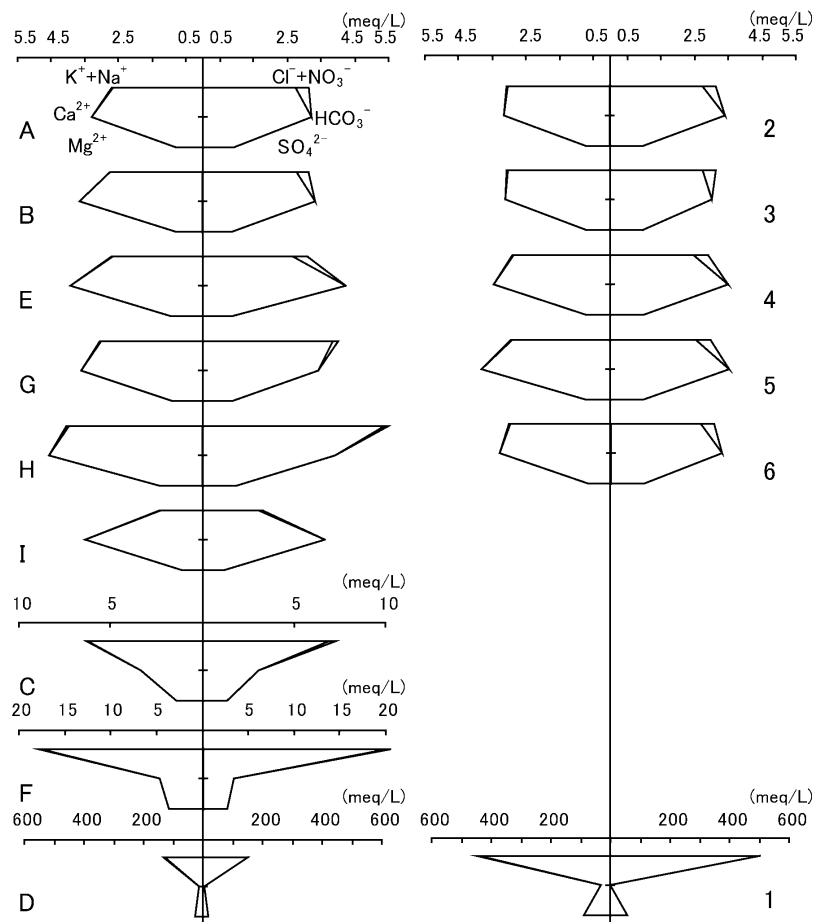
以上述べた事項を考慮し最終的に等高線間隔 2.5cm で作成した地形図を本誌に掲載することにした。この地形図上では写真-5 に見られるような段差の小さな rim stone pool (第 3 図の A7, B7 など) は表現されないが、写真-2 や写真-4, 6, 7, 8 のように段差が 5cm 以上ある rim stone pool は地形図上で十分判読可能である。今後このような地形図と写真にもとづき石灰華段丘の形状についてフラクタル分析を行うことにより、石灰華段丘地形の形成を支配した原地形の勾配や、流速、堆積物の供給状況など相互の関係を解析できるかもしれない。

4. 地形判読

3D レーザ・スキャナーを使用して作製した等高線間隔 2.5cm、縮尺約 1/300 の精密地形図 (第 3 図) は、石灰華段丘のほぼ 80% 以上の rim stone pool を表現している。精密地形図の標高 1m の等高線付近までは高潮位に海水が浸入する。精密地形図のほぼ中央 (B6-C6)²⁾ とその東側 (A7-D7) は前述したビーチロック状堆積物があり、等高線はやや蜜になっている。魚鱗状石灰華段丘 (写真-5) の A7-D7 (第 3 図) には小さな rim stone pool を読み取ることが出来る。

第 3 図の F7-F8 は低位の石灰華段丘でポットホールと一体化した rim stone pool が見える。先にこの地域での「典型的な石灰華段丘」と紹介したものは、B5-C5, D5-D6 で rim stone pool が扇状に並んでいる。またその西側の C2-D2 に描かれているのは、「白を並べたような」と表現した石灰華段丘で rim stone pool 間に等高線がいくつも入っている。E4-E5, F4-F5 に非常に密な等高線で描かれているのは津波石である。

第 4 図は南北方向の地形断面図である。BP のラインでは標高約 2m のノッチが描かれている。5 および 6 ラインの左側の高まりは津波石である。BP~6 ラインまでは低位の石灰華段丘の rim stone pool 縁の背後に rim stone pool がつづき pool の陸側縁から津波石が屹立している。6~8 ラインでは中心線から陸側に約 10m の位置に高さ約 2m の中位面が見られる。特に 7 ラインでは中心線から約 13m の所に標高約 4m の高位面が読み取れる。中位面までの勾配は 11~14°、汀線から標高 5m までの低位面の勾配は約 4° である。10~12 ラインの中心付近には比



第5図 宮古島から採取した湧水・地下水・海水の水質分析結果（ヘキサダイアグラム）。図中のA～6は第1表参照。

Figure 5 Hexane-diagram showing results of chemical analyses of spring, underground and sea water samples collected from Miyako Island. Index letters from A to 6 are the same as expressed in Table 1.

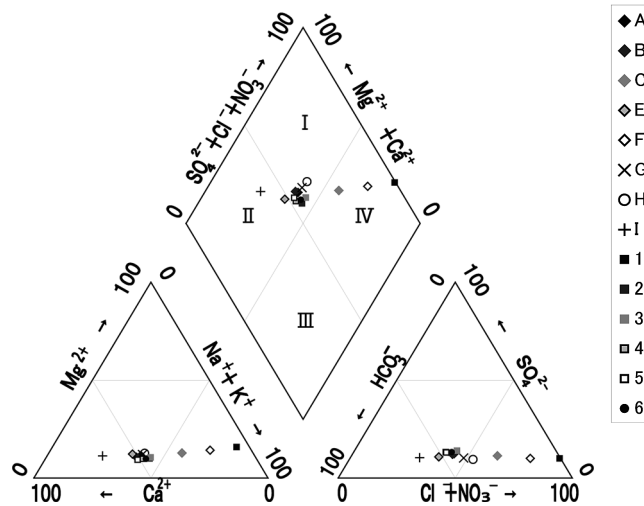
較的長い平坦面があるが、これは大きな rim stone pool で、よく表現されている。13～EPラインまでは大小の岩塊が散在する所でそれらがよく表現されている。

3D レーザ・スキャナー測定の良いところは第2図のような3次元点群画像が出力できることである。3次元点群画像は色の情報をもっており水は電磁波を吸収するので青く表示されることから rim stone pool が容易に判別できる。第3図の等高線図と3次元点群画像を併用することで地形解析の精度を上げることができる。一方、3次元点群画像はレーザーが照射された面の情報であり、背後の面についてはデータが取得できずに陰となる。F4の津波石の海側は、データが取得できていないので青く表示されているが、実はデータがないので3次元の立体表示にすると空洞のように見える。解析にあたってはこうした特性を知っておく必要がある。

5. 石灰華段丘の形成過程

石灰華段丘の形成過程を詳細に記述した文献を発見することは出来なかった。僅かに1件だけ、Mas-Pla *et al.* (1992) らの論文には石灰華段丘が下流側から上流側へ形成されたことを年代測定結果にもとづき記載していた。宮渡崎太陽泉でみられる石灰華段丘の形成過程を現地調査にもとづき次のように考察した。

宮渡崎では中潮位から低潮位にかけてベンチが発達しており、その表面にはポットホールが見られる。このポットホールが拡大し近接するポットホール同士が相互に連結して、さらに大きな窪みを形成している所が多数観察された。このようなポットホールに上流から炭酸カルシウムを含む湧水が流入し、低潮位時に低下した海面と分離されたポットホールでは亜熱帯下の強い日射により水分が蒸発し、やがて高濃度となった炭酸カルシウムの析出が開始される。このようにして最初の石灰華段丘が形成されたのではないかと考えられる。



第6図 宮古島から採取した湧水・地下水・海水の水質分析結果（キーダイアグラム）。凡例のA～6は第1表参照。図中のIはアルカリ土類非炭酸塩、IIはアルカリ土類炭酸塩（浅層地下水関連）、IIIはアルカリ炭酸塩（深層地下水関連）、そしてIVはアルカリ非炭酸塩（海水関連）を示す。

Figure 6 Key diagram showing results of chemical analyses of spring, underground and sea water samples collected from Miyako Island. Index letters from A to 6 are the same as expressed in Table 1.

ひとたびrim stone（石灰華段丘の堰堤）が形成されると、湧水とともに上流から運搬された第四系琉球石灰岩層の細粒物質はrim stone poolに流入した際に流速が0となるため沈殿堆積（三角洲の頂置層や前置層に相当）する。より細粒の物質はさらに前方低位のrim stone底に（三角洲で言えば底置層に相当）堆積する。これらの堆積物に湧水中の炭酸カルシウムが付着して新たなrim stone（石灰華段丘の堰堤）が形成される。このようにして湧水量・細粒物質・日射量などの短時間変動、日変化、季節変化、年変化などにより、長い時間の経過により汀線付近から順次標高の高い位置まで石灰華段丘が形成されていったと推定される。

これを裏付ける証拠として、石灰華段丘中央部の年代が3,702 BPであったのに対して、最上流部の石灰華段丘の年代は2,802 BPであったことを指摘できる。もちろん現在でもrim stone上を越流して湧水が流下している石灰華段丘では、新しい炭酸カルシウムが少しずつ沈着している。このため、その表面は成長を続けており、またrim stoneの年代も“現世”であることは多くの年代測定結果（第2表）から明らかである。

6. 湧水・地下水・海水の水質

第1表に示した水質分析の結果にもとづき作成した15地点の水質組成を第5図（ヘキサダイアグラム）、および第6図（キーダイアグラム・三角図）にそれぞれ示し

た。なお、検水の溶存成分濃度に著しい差異が認められるため、第5図に示すヘキサダイアグラムの濃度の目盛については、4種類の異なる尺度が用いられている。

主要溶存成分の濃度と組成から、海水の影響については以下のように考察する。検水結果は、わが国の陸水の平均値と比較しCa²⁺の濃度が高い値を示している。水質組成は、石灰岩地域に特有のCa-HCO₃型を示す検水（A・B・E・G・I・2・4・5・6）がもっとも多くを占め、中でも検水Iは典型的である。

上記の水質組成の特徴に加え、Na-Cl型を示すグループの存在も指摘され（検水C・D・F・1）、特に検水Dと1については電気伝導度の値（16,000 μS/cm、47,200 μS/cm）、および第6図に示すキーダイアグラムから判断し、海水の影響を強く受けていることが考えられる。検水CとFについては、電気伝導度の値がそれぞれ1,206 μS/cm、2,810 μS/cmとさほど高くないにも拘わらず、水質組成が上記のとおりNa-Cl型を示し、海水の影響が示唆される。さらに、これら4地点の検水については、SO₄²⁻濃度が最低でも63.4mg/L検出されることから、現海水の直接的な浸透による塩水化が生じていると判断される。

15地点のNO₃⁻濃度は7.5～26.1mg/Lの範囲内にあり、20mg/Lを超える検水が10地点を占める事実は施肥等による地下水への人為的影響が示唆され、今後の検討課題である。また石灰華段丘の発達している秋芳洞をはじめ、

国内外の他地点の水質分析結果と宮古島の分析結果とを比較検討することも今後の課題である。

7. 石灰華段丘の形成年代

(1) rim stoneの年代

石灰華段丘の地形形成過程を考察するため、まず石灰華段丘中央の年代を決定し、その後に低位や高位の石灰華段丘の年代を決定しようと考えた。このため中央部の石灰華段丘から rim stone の堆積物（第2表の NUTA2-14764~14766, 15497, NU-1994, NU-2114）を採取し年代測定を行った結果、“modern” または “super modern” となった（第2表）。rim stone 試料のほとんどは、AMS ^{14}C 年代測定により 14.5~49.8‰の ^{14}C 濃度 ($D^{14}\text{C}$) を、 β 線法ではこれより高い ^{14}C 濃度を示した。これは、核実験起源 ^{14}C の影響を受けた濃度に相当し、標準の ^{14}C 濃度よりも高い。

さらに低位（NU-2114）や高位（NUTA2-15496, NU-2142）の rim stone 堆積物について年代測定を行ったが、AMS 法でも β 線法でもやはり測定結果は “modern” または “super modern”（14.4~421.9‰；第2表）であった。これらの試料の測定値は、現在の大気中や海水中の ^{14}C 濃度（中村ほか 2008）とほぼ同じか、核実験起源による影響で ^{14}C 濃度が高かったときの値を示している。いずれにせよ石灰華段丘がごく最近形成されたことを意味する。一方ビーチロック状堆積物の表面に一部が露出していたシャコ貝（NU-2140）や化石サンゴ（NU-2141）の年代は、やはり “modern” または “super modern” であり（480‰ modern；第2表）、この解釈を支持するように思われる。しかしながらこれらの測定値はビーチロック状堆積物の年代としてもっとも信頼性の高い、完全にビーチロック状堆積物中にあった試料（NU-2139 および NUTA2-15502）の年代（1065±45 BP および 966±25 BP）と矛盾する。

試料の年代が “modern” または “super modern” となった原因として、古い炭酸イオンが大気中や湧水あるいは海水中の炭酸イオンと置換された際に、大気圏内で行われた原水爆実験によって放出された ^{14}C が海水や大気中を通して供給された可能性が考えられる。すなわち大気中や海水中の ^{14}C 濃度は現在でも基準値である 1950 年の大気中の ^{14}C 濃度よりも高い（中村ほか2008）。この可能性を実証するため海水（NUTA2-15951）の ^{14}C 濃度を新たに測定したところ、18.5±2.5‰となり、上記の推察が正しかったことが実証された。以上の結果、rim stone の年代としては、高位の rim stone（NU-1995）から得られた 2805±52 BP の1件だけしか有意の年代は得

られなかった。

(2) 簡易ボーリング・コアの年代

AMS 法により測定した簡易ボーリング・コアの中で東部の石灰華段丘から採取した試料（NUTA2-15482, NUTA2-15495）の年代は 1500±29 BP および 2021±25 BP であり、中部の石灰華段丘から採取した試料（NUTA2-15496 および NUTA2-15843）の年代は 17433±52 BP および 1722±29 BP であった。また西部の急斜面に形成された石灰華段丘下方の垂直壁（内側約 10cm）から採取した試料（NUTA2-15841）の年代は 1190±28 BP であった。

一方 β 線法で測定した東部の石灰華段丘から採取した試料（NU-2119）および中部の石灰華段丘から採取した試料（NU-2120）の年代は、それぞれ 3594±47 BP および 3702±48 BP であった。また西部の石灰華段丘から採取した試料（NU-2108）の年代は 1189±57 BP であった。このような結果、西部の石灰華段丘から採取した試料を除き同一層準の試料であっても AMS 法で測定した試料には大きな年代差が生じており、また β 線法と比較しても大きな年代差が生じている。これらの原因について考察する。

はじめに AMS 法で測定した東部の石灰華段丘から採取した試料（NUTA2-15496）および中部の石灰華段丘から採取した試料（NUTA2-15482）の年代差が大きかったため、再度同一試料について年代測定を実施した。その結果、東部の石灰華段丘から採取した試料（NUTA2-15843）および中部の石灰華段丘から採取した試料（NUTA2-15843）の年代差は 222 年と小さくなったが（第2表）、前回の測定値と誤差範囲を考慮しても同一年代とは容認できない年代差が生じている。一方 β 線法で測定した東部の石灰華段丘から採取した試料（NU-2119）および中部の石灰華段丘から採取した試料（NU-2120）の年代差は 108 年である。 β 線法で測定した年代測定試料の一つは細粒の年縞状細粒堆積物ではなくボーリング時に切断された枝サンゴであった。枝サンゴが死亡後、海岸まで運搬されて打ち上げられ、湧水や海水中の炭酸カルシウムによりほかの細粒堆積物と一緒に固結したと考えた場合、100 年程度の時間差は β 線測定の誤差から十分容認できる。

AMS 法はピンポイントの測定が可能であるという特徴を有する。このため堆積物を測定した場合に測定値そのものは決して誤りではないが、堆積物に含まれる炭素の起源によっては研究目的と整合しない結果が出ることが考えられる。これに対して β 線法は、微細な試料の年代決定は不可能であるが、平均的な年代—今回のように

ボーリング・コアを薄く裁断した場合には年輪と同様の解釈が可能のため、目的とする年代を結果的に与えてくれると解釈できる。まさに今回の測定は後者の考え方や結果を支持しているように解釈される。このことは、西部の石灰華段丘から採取した試料の年代がAMS法 (NUTA1-15841) とβ線法 (NU-2108) で完全に一致していることから明白である。このように考えた場合、ボーリング・コアの堆積物は、核実験が行われたよりもはるかに早い時期に堆積しているため、年代が新しくなるという核実験の影響を考慮する必要はない。

(3) 1万年前をこえる¹⁴C年代を示す travertine

中部の石灰華段丘から採取したボーリング・コア堆積物 (NUTA2-15496) からは17433±52 BPの¹⁴C年代が得られたが、この年代は他の試料に比べて著しく古い値である。宮古島は、元々海水中で棲息していたサンゴや有孔虫の堆積物 (琉球石灰岩) で構成されている。ティダガーでは大雨の際に海成段丘や段丘崖から琉球石灰岩の細粒物質が運搬されて石灰華段丘に堆積することも十分に考えられる。したがってAMS法では、微細な試料を用いて¹⁴C年代が可能であるため、細粒堆積物を試料として年代測定すれば¹⁴C年代が2万年前程度の古い年代が得られることも可能であろう。一方、同じ中部の石灰華段丘から採取した試料 (NUTA2-15843) からは1722±29 BPと若い年代が得られている。宮渡崎の石灰華段丘堆積物は、琉球石灰岩層、湧水、海水など様々な起源の炭素成分から構成されている。このため感度の優れたAMS法で年代測定を行った場合、β線法とは異なった年代が得られることは十分に考えられる。しかし1個の試料でなく複数個の試料について年代測定を行えば、今回得られた結果のように研究目的と整合しない年代を識別することが可能である。

(4) AMS法とβ線法の年代のずれ

今回年代測定の対象とした石灰華段丘は、永い年月をかけて成長し形成されたものであり、現在でも成長し続けている。しかしその堆積物は樹木年輪のような規則正しい年縞の層になっているとは限らない。石灰華段丘の成長速度は、湧水の起源となっている海成段丘面上の降水量や湧水量などにより変化する。したがって石灰華段丘のごく近くの部位から採取された travertine の¹⁴C年代が全く同じになることはなく、むしろ幾分異なってもおかしくない。今回初めて、このような試料より¹⁴C年代が異なることが初めて確認されたといえよう。

一般にAMSでは、微量の炭素試料で年代測定が可能であることから、小領域の試料の年代を測ることになる。一方β線法では最低でも1g程度の炭素試料が必要であ

り、その重量は大きくなる。今回の試料の中で、前述のように西部の石灰華段丘から採取した同一部位のボーリング・コア試料から、β線法で1189±57 BP (NU-2108)、AMS法では1190±28 BP (NUTA2-15841) とよく一致した年代が得られている。一方東部の石灰華段丘から採取したボーリング・コア試料からは、β線法で3594±47 BP (NU-2119)、AMS法では1500±29 BP (NUTA2-15842) および2021±25 BP (NUTA2-15495) と、また同じ中部の石灰華段丘から採取したボーリング・コア試料では、β線法で3702±48 BP (NU-2120)、AMS法では1722±29 BP (NUTA2-15843) および17433±52 BP (NUTA2-15496) と異なった年代が得られた。このようなAMS法とβ線法により測定された¹⁴C年代のずれは、測定試料と、その選別方法の違いによる。今回の石灰華段丘堆積物のように起源の異なる炭素が集積して形成された試料では、比較的大きな集合体として測定するβ線法の方が平均的な堆積年代を求めるためには有効であると考えられる。

(5) 石灰華段丘の較正年代

石灰華段丘堆積物から得られた年代値のうち、古い年代にもとづいて石灰華段丘の形成年代を推定した。簡易ボーリング・コアから得られた石灰華段丘堆積物の conventional age で約3,600 BP 当時、大気中の¹⁴C濃度が1950年代の大気中の¹⁴C濃度と同等であったとした場合、当時の湧水の¹⁴C年代は現在の湧水 (NUTA2-14672) の年代である224±30 BPより古い年代となる。なぜなら現在の湧水の年代は1960年代に大気圏内で活発に行われた核実験による影響を受けて、より新しい年代を示していると解釈されるからである。

以上述べた解釈が成立する場合、石灰華段丘の形成年代はCALIB 04やCALIB 09で暦年代に較正した3900 cal BPから石灰華段丘を涵養している湧水の補正年代である300年を差し引いた3,600 cal BPとなる。ただし試料を採取した位置が石灰華段丘のほぼ中央に近いことと、地学事典 (1976) に記載されているように石灰華段丘が低位から高位に形成されるということを公理とするならば、石灰華段丘の形成年代は上記の年代よりもさらに若干古くなる可能性がある。そして高位の石灰華段丘の年代が2,844 cal BP (NU-1995) であり、またrim stoneの年代が“modern”や“super modern”であったことから、石灰華段丘は現在でもなお成長を続けている。

V 結論

以上記載してきた内容を要約すれば次のとおりである。

(1) 石灰華段丘は海拔約30mの海成段丘崖下の斜面上、

海拔約5mから低潮位までの間に幅約30m、長さ約70mにわたり発達している。石灰華段丘は長径10mから数cmまで様々な平面形態を呈する。またその上下の水面の高度差は5mmから約1mまであり、総数は300以上である。

- (2) 石灰華段丘の高位から採水した湧水の ^{14}C 年代は 224 ± 30 BP (NUTA2-14672)、また最高位の石灰華段丘の停滞水の ^{14}C 年代は 251 ± 19 BP (NUTA2-15952)であった(第2表)。宮古島における地下水の滞留時間は理論的には数年～数十年であり、本来ならその ^{14}C 年代は、“modern”または“super modern”の数値となるはずである。しかし低い ^{14}C 濃度を示した理由として、琉球石灰岩層の一部が地下水に溶解している可能性が示唆される。湧水の化学成分分析結果(第1表、第5図および第6図)は、上記の推定が正しかったことを実証している。
- (3) 石灰華段丘堆積物のうちrim stoneから採取した試料は、現在の大気中や海水の ^{14}C 濃度とほぼ同じ ^{14}C 濃度を示している。一方簡易ボーリング・コア最下部(基盤岩直上)から採取した試料からは有意の年代が得られた。しかし両者の年代には β 線法とAMS法で測定値に大きな開きがみられた。
- (4) 東部の石灰華段丘の簡易ボーリング・コア(B-1)下部に破断されて挟まっていた枝サンゴの年代と石灰華段丘中央部の簡易ボーリング・コア(B-2)下部の堆積物の年代差は100年前後であった。よって石灰華段丘堆積物の堆積開始はconventional ageでは約3,600年以前、CALIB 04 (09)では約3,900年前にさかのぼると推定される。
- (5) 湧水(NUTA2-14672)の年代が 224 ± 30 BPであったことと、現在でも大気中や海水中の ^{14}C 濃度が大気圏内で行われた核実験の影響を受けており、1950年当時の ^{14}C 濃度に戻っていないことから3,600 BPの湧水の補正年代は約300年程度と推定される。
- (6) 以上の結果から石灰華段丘の形成開始年代は、中部の石灰華段丘から採取した簡易ボーリング・コア堆積物(NU-2119)の較正年代3,900 cal BPから湧水の補正年代300年を差し引いた3,600 cal BPとなる。ただしこの年代は試料採取地点が石灰華段丘のほぼ中央であることを考慮すれば、今後これより古い年代が出ることも十分に予測される。
- (7) ボーリング・コアを薄く輪切りにし、複数の堆積物を試料としてAMS法で年代測定を行った場合、堆積物に含まれる炭素の起源により年代差が生ずる場合がある。 β 線法ではAMS法のような微量炭素量

では測定できない。しかし試料を厚めにスライスした場合に堆積間隙が存在しなければ、コアのどの平面位置から試料を採取して β 線法で年代を測定しても年代そのものには大きな差異は生じない。

- (8) ティダガーの湧水について成分分析した結果、透過層である琉球石灰岩の成分と、サトウキビ栽培に使用された肥料の成分を検出した。前者は湧水の年代測定結果にも表れている。また後者は、地下ダムの水を飲料水とする場合、将来問題となる恐れがある。
- (9) 石灰華段丘のような微地形を描写する上で、3Dレーザ・スキャナーによる地形図作製の効果は絶大である。地形図と3次元点群画像を併用することにより地形判読の精度を向上することができる。このような手法を取り入れることにより、従来不可能であった新たな地形解析や、地形営力の考察が可能になる見通しを得ることができた。

今後の問題

ティダガーの石灰華段丘堆積物についてAMS法および β 線法により ^{14}C 年代測定を行って石灰華段丘の形成年代を推定した。石灰華段丘のrim stoneを年代測定試料として測定して得られた ^{14}C 年代は“modern”や“super modern”となった。石灰華段丘の形成年代を確認する意味で、 ^{14}C 年代測定法と異なる年代測定法により決定した年代と比較することは有意義であろう。また石灰華段丘堆積物について、秋芳洞などの石灰華段丘堆積物の化学成分や水質と比較検討する必要がある。さらに関西大学の木庭元晴教授から指摘を受けたビーチロック状堆積物について、ビーチロックか琉球石灰岩層なのかについて現地で詳細な地質調査を行う必要がある。

謝辞

本論文は2010年10月3日に名古屋市で開催された日本地理学会秋季学術大会において発表した内容にもとづいている。現地調査にあたり宮古島市教育委員会は、宮渡崎の石灰華段丘について学術的に貴重な意義を理解し便宜をはかってくださった。日本大学文理学部化学科の浅地哲夫教授には、石灰岩地域の溶食作用と析出沈殿過程でおこる可逆反応について教えていただいた。また関西大学の木庭元晴教授には当初ビーチロックと思われた堆積物について鑑定していただき、貴重なアドバイスをいただいた。上記の機関および方々に厚く御礼を申し上げます。小元が行った ^{14}C 年代測定や安定同位体比($\delta^{13}\text{C}$)の測定には、平成21年度日本大学文理学部個人研究費を使用した。長年にわたり日本大学年代測定室の維持管理に対し、ご理解とご支援をいただいた日本大学文理学部の歴代の学部長および事務局長、研究所事務課ならびに管財課の関係者の皆様方に厚く御礼を申し上げます。

脚注

1) 本研究における役割分担は次の通りである。小元および田中は野外調査により石灰華段丘の分布範囲を確認し、石灰華段丘の形状、段差、流水路とともに石灰華段丘周辺の地形や地質について調査し試料を採取した。また田中および小元は精密地形図を作成するためレーザレベルやトータルステーションによる基準点測量を行い、松田は地上型3Dレーザ・スキャナーを使用しデジタル・レーザ計測を行った。小元および中村はβ線法およびAMS法

により、各試料の¹⁴C年代測定を行った。森および大八木は小元らが採水した試料について化学成分等の分析を行った。安谷屋・久貝・新城らは、測量時および試料採取時に小元・田中・松田と共同で作業を行った。本論文は上記の各担当者がそれぞれ分担執筆した内容を小元がとりまとめた。

2) 第3図の右端および下端の符号により表示される座標。

参考文献

- 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科 102p.
- 小元久仁夫 2000. 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 2003. 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 2004. 久米島、奥武島およびハテナ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 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 2009. 宮古島から採取したビーチロック試料の較正年代と後期完新世の海水準変動. 日本地理学会発表要旨集 76, 70.
- 小元久仁夫 2010. 宮古島で観察された石灰華段丘、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「研究紀要」, 45, 83-94.
- 高村弘毅・河野 忠. 2008. 名水を尋ねて (80) 宮古島の名水. 地下水学会誌. 50(1), 33-42.
- 地学団体研究会 編 (1996): 「石灰華段丘」. 新版 地学事典. 平凡社. 685.
- 中村俊夫. 2003. 加速器質量分析 (AMS) による環境中およびトレーサ放射性同位体の高感度測定. *Radioisotopes*, 52(3), 145-71.
- 中村俊夫・渡邊隆広・松中哲也・西村弥亜・朱 立平・太田友子・南 雅代. 2008. 標高5000mのチベット高原に生育する植物は低地の植物より¹⁴C濃度が高いのか? 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, XIX, p.100-116.
- 平良初男・上地裕光・中井信之・中村俊夫. 1988. 加速器質量分析計利用による沖縄県石垣島「津波石」の年代測定. 名古屋大学加速器質量分析計業績報告書, (1) 72-75..
- APHA-AWWA-WEF (1989): *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 17th Ed.* Washington D.C., American Public Health Association, 2-35~39.
- Bates, J.A. and Jackson, R.L. (Eds.) 1980. *Glossary of Geology* (Second Edition). American Geological Institute, Falls Church, Virginia, 663p.
- Ford, D. and William, P. 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, Ltd. 562p.
- Geyh, M.A. and Schleicher, H. 1990. *Absolute Age Determination*. Springer-Verlag, 503p.
- Hideshima, S., Matsumoto, E., Abe, O. and Kitagawa, H. 2001. Northwest Pacific marine reservoir correction estimated from annually banded coral from Ishigaki Island, southern Japan. *Radiocarbon*, 43(2A), 473-76.
- Hughen, K.A., Baillie, M.G.L., Bard, E., Beck, J.W., Bertrand, C.J.H., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T.P., Kromer, B., MacCormac, G., Manning, S., Ramsey, C.B., Reimer, P.J., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J.R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C.E. 2004. Marine04 marine radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon*, 46(3), 1059-86.
- Mas-Pla, J., Trilla, J. and Valls, M.L. 1992. Radiocarbon dating of travertines precipitated from freshwater. *Radiocarbon*, 34(3), 677-85.
- Mook.W.G., and van der Plicht, J. 1999. Reporting ¹⁴C activities and concentrations. *Radiocarbon*, 41, 227-39.
- Omoto, K. 2004. Radiocarbon ages and isotope fractionations of beachrock samples collected from the Nansei Islands, southwestern part of Japan. *Radiocarbon*, 46, 539-550.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Bertrand, C.J.H., Blackwell, P.G., Buck, C.E., Burr, G.S., Cutler, K.B., Dallon, P.E., Edwards, R.L., Fairbanks, R.G., Friedrich, M., Guilderson, T., Hogg, A., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Ramsey, C.B., Reimer, R.W., Remmele, S., Southon, J. and Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F.W., van der Plicht, J., Weyhenmeyer, C.E. 2004. INTCAL04 Terrestrial radiocarbon Age Calibration, 0-26 Cal KYR BP. *Radiocarbon*, 46(3), 1029-58.
- Reimer, P.J., Baillie, M.G.L., Bard, E., Bayliss, A., Beck, J.W., Blackwell, P.G., Ramsey, B.C., Buck, C.E., Burr, G.S., Edwards, R.L., Friedrich, M., Grootes, P.M., Guilderson, T.P., Hajdas, I., Heaton, T.J., Hogg, A.G., Hughen, K.A., Kaiser, K.F., Kromer, B., McCormac, F.G., Manning, S.W., Reimer, R.W., Richards, D.A., Southon, J.R., Talamo, S., Turney, C.S.M., van der Plicht, J. and Weyhenmeyer, C.E. 2009. IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon*, 51(4), 1111-50.
- Stuiver, M., Reimer, P.J. and Reimer, R.W. 2005. CALIB 5.0 [WWW program and documentation]