

南大東島におけるカルスト化過程の一考察

漆原和子*

要旨

南大東島は大東石灰岩を基盤として長期にわたり、カルスト化を受けたサンゴ島である。島の周辺はハグ上とよばれ、約 40~50m a.s.l. の高地になっていて、ライムストーンウォールが 2 - 4 列分布する。中央部はハグ上より速度の早い溶食作用を受けたと考えられる。ライムストーンウォールの最高地点は 75.1m a.s.l. である。中央凹地には多数のドリーネが分布し、ドリーネ湖も存在する。この現在のハグ下の凹地と、ハグ上の台地を形成するまでに、約 160 万年が必要であったと算出した。フィリピン海プレートの上に位置する南大東島は隆起率が低い島であり、5e のサンゴ石灰岩の年代測定値から島の隆起率は 0.05m/ka と報告されている。この島の東側の海軍棒に分布する完新世ベンチと背後の海岸地形における溶食作用に注目し、その計測を行った。

海軍棒の完新世における高海水準時に形成されたと推定できるベンチは約 3.5m a.s.l. であり、幅は約 20m で良く発達している。このベンチの上は極めて平坦である。基盤は更新世以前に形成された緻密なドロマイト化した大東石灰岩である。しかし、ベンチの前面には幅の狭い、プラットフォームが 2~3m a.s.l. に発達する。このベンチとプラットフォームでは、海食凹地であるカメニツアの発達が異なる。ベンチの上のカメニツアでは直径が 50cm を越えるが、深さは 20~25cm のものが発達する。しかし、その分布密度は少ない。

前面のプラットフォームには直径 20~30m で、深さが 20~50cm のカメニツアが密度高く形成されている。このベンチとプラットフォームの溶食地形の差と密度から、プラットフォームには、極めて溶けやすい若いサンゴ石灰岩を混じえた礫岩質石灰岩が大東苦石灰岩を薄く覆っている。

海軍棒の海岸には、開口部 10m a.s.l.、洞窟の奥が 12m a.s.l. の海食洞が分布する。海食洞相当レベルには、幅の狭いベンチが約 12m a.s.l. に発達する。これは太田等の最終間氷期の 5e 相当面である。この 5e のベンチには、土壌化が進行した場所があり、樹木（ガジュマル：*Ficus microcarpa* とモンパノキ：*Argusia argentea*）が進入している。

さらに背後のハグ上にかけて、約 20m a.s.l. から 30m a.s.l. では、溶食し残されたサボテンと地元で呼ぶピナクルが発達する。標高約 20m a.s.l. より上位には更新世のドロマイト化した大東石灰岩が更新世以前のドロマイト化した大東石灰岩を不整合で覆っている。この両層の間の不整合面には、島の北西海岸に、古土壌が化石化したレインボーストーンが分布する。このレインボーストーンの示す不整合面は長期にわたるカルスト化がこの時に起ったことを示していると考えた。両不整合面でカルスト化が長期にわたり発生した理由は、長期にわたる海水準の低下があったためと考えた。

キーワード：南大東島、大東石灰岩、カルスト化作用、海軍棒、カメニツア、ピナクル

I はじめに

フィリピン海プレート上に位置する南大東島、北大東島は隆起サンゴ礁がドロマイト化していることから地質学的にはそのドロマイト化の原因と

時代に興味を持たれてきた。また島の隆起率についても 5e のサンゴの分布高度から、隆起率の算出が試みられた。結果的に極めて隆起率の低い島であることが判明している。すでに、ドロマイト化した時代が報告された基盤があり、あたかも隆起環礁であるかのような地形を呈している。しか

所属

*法政大学文学部地理学科

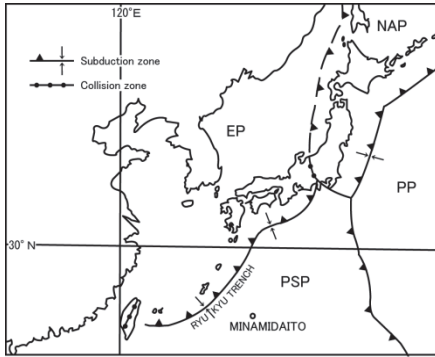


図1 南大東島の位置

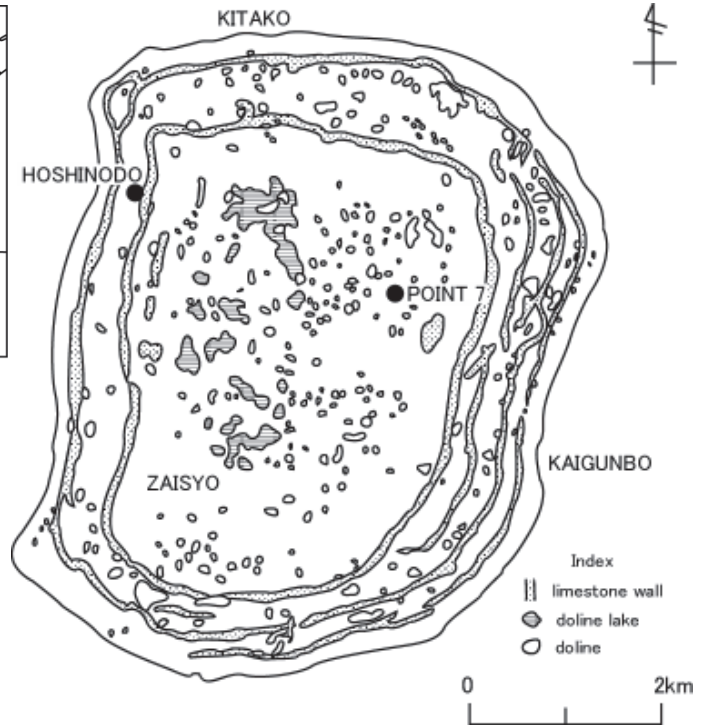


図2 南大東島におけるカルスト地形

し、この島は隆起をしつつ長期にわたるカルスト化をうけた地形でもある。本論文では、南大東島をカルスト地形としてとらえた場合、どれだけ長期にわたる溶食をうけて今日の南大東島の形態になったか、考察をすすめた。また、最終間氷期以降の海岸部における溶食地形がドロマイト化した大東石灰岩の下部層と、上部層で異なることに注目して、岩石の違いが溶食地形の差を引き起こす可能性を考察することを研究目的とした。

II 調査地域の概要

南大東島は、フィリピン海プレート上の大東海嶺の上に位置し、北大東島、沖ノ島と合わせて大東諸島と呼ばれている。沖縄本島から約360kmの位置にあり、沖縄海溝（琉球海溝）の東方、フィリピン海プレート上に位置する。南大東島は年

に約4~5cmの速度で琉球海溝に向かって動いていることが計測されている。島の位置は図1に示した。

南大東島の中心は北緯25°50'47"、東経131°14'24"に位置し、隆起環礁がカルスト化を受けた島である。東西5.78km、南北6.54km、周囲20.86km、総面積30.57km²の島である。この島は1820年ロシア艦隊によってポロジノ諸島と名付けられ、英国海軍水路部出版の海図には「北ポロジノ島、南ポロジノ島」と記載された（中井ほか、2009）。

南大東島は、1885年に沖縄県庁によって国標がたてられた。1892年には軍艦海門が採検・測量した。島の東部の海軍棒はこの時の基点を示す棒に由来するといわれている。1899年、玉置半右衛門が八丈島から23名を連れて上陸し、開拓を始めた。この島の2010年の人口は1,447人である。島の



(2003年3月6日漆原撮影)

写真1 西港における現成のサーフベンチとカメニツア

産業は主としてサトウキビ農業である。

島の周縁は環状に高く、最高地点は標高 75.1m である。さらに、2~4 列のライムストーンウォールが島をとりまいている (図 2)。ライムストーンウォール列の分布する島の周囲の台地はハグと呼ばれており、高度は約 30m~50m の高みとなっている。一方、島の中央は凹地状の低地をなし、中央部には多くの淡水湖が分布する。これはカルスト地形であるドリーネの底部に淡水が溜まり、湖をなしていると考えられ、ドリーネ湖であるとされている。現地ではこの低地を幕下(ハグシタ)と呼んでいる。ドリーネ底は湖となっていないものも多く分布するが、その中でドリーネ底のすい込み穴が洞窟となっていて、洞内に地下水面があるものがある。これらの洞内の地下水は若干の塩分を含むが、淡水である。海水位の日変動とともに地下水の水位面も日変動をする。この洞窟の断面図は漆原ほか (2004) を参照されたい。ハグ上にも洞窟は存在し、ほとんどが水平洞ではなく垂直に近い洞窟であり、鍾乳石は豊富に発達している。その一例の星野洞では、入洞できる深さには地下水面はない。

Ⅲ 南大東島、北大東島の石灰岩に関するこれまでの研究

南大東島の北東に位置するカルスト化をうけた隆起環礁である北大東島では、1934 年から 1936 年にボーリング調査が行われた。その結果、基盤のサンゴ石灰岩は 431.67m の厚さまで確認する事が出来き、少なくとも中新世初期までさかのぼるとされている (杉山, 1934, 1936 ; Hanzawa, 1940)。そして上部 100m はドロマイト化をうけているが、その下部はすべて炭酸塩岩であることを示した。最上部は鮮新統から第四紀更新統に対比されると報告された。また、青木 (1934) は基盤は初期更新世以前に形成された大東苦灰岩からなるとした。すなわち、南・北大東島は赤道付近から移動し、約 100 万年前に海溝周縁隆起帯に到達した。そこで、沈降から隆起に転じたと推定された。

Ohde, Kitano (1982) は南大東島にけるドロマイトの分布について述べ、その生成過程について説明した。島の北西部の西港付近にはドロマイトは分布していない。しかし、北港や塩谷、亀池付近にはドロマイトが分布する。プロトドロマイトはビキニの環礁で Von Arx (1954) が報告したように、環礁であった時に浅いラグーンで形成されたと考えた。西海岸は風陰にあるため、リーフ(礁)はあまりよく発達しなかった。そのことが、西海岸にプロトドロマイトが生成されなかった理由であるとしている。

Ohde (1987) は南・北大東島のドロマイトはラグーンの海水が蒸発して生じた高塩分水が堆積体中を流下し、ドロマイト化を起こしたと推定した。

太田ほか (1991) は、南・北大東島のサンゴ礁段丘について考察し、5e の隆起サンゴ化石から、南と北大東島は平均隆起速度は 0.03~0.05m/ka 以下であり、極めて小さいとしている。

河名ほか (1991) は南大東島での更新世石灰岩

のサンゴ化石 15 点と北大東島で 3 点のサンゴ化石の年代測定をした。γ線法による $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 年代測定をした結果、両島の平均値は $128 \pm 27\text{ka}$ であると報告している。そして、 $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 年代と $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 年代とは全体として対応していると述べている。即ち、これは太田ほか (1991) の $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ の $123 \pm 1\text{ka}$ と同じであり、小西 (1980) の 6 件の海軍棒の $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ の年代測定値である $98 \pm 5 \sim 128 \pm 14\text{ka}$ とほぼ一致する。

Ohde, Elderfield (1992) はストロンチウムによるドロマイト化の年代測定を北大東島でおこなった。その結果、ドロマイト化は 2Ma と 5Ma で発生したことを示した。南大東島でも 22~55m の掘削をして、1.8~2.6Ma と 5.0Ma にドロマイト化が起こったと述べている。また、標高 0~10m では 5Ma を示し、10~64m では 2Ma を示したと報告されている。

大村、太田 (1992) は、琉球列島の喜界島、波照間、与那国島と、南大東島、北大東島の更新世サンゴ段丘のウラン系列 ($^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$) の年代測定値を総括した。その際、南大東島の海軍棒でステージ 5e の年代を示すサンゴ石灰岩が標高約 12m に存在することを示した。この論文では基盤を Daito Dolostone として表示している。

稲垣、井龍 (1999) は、北大東島のドロマイト化について報告し、1934、1936 に杉山によって報告された -432m の掘削サンプルに基づき、北大東島の 2500 万年間のサンゴの堆積、続成史を編んだ。C1 は深度 0~50m でドロマイト化し、C2 はドロマイト化していて、50~103m であり、その上部はカルスト化をうけている。C3 は 103~209m でドロマイト化は一部認められているが、低 Mg 方解石から成る。C4 は 209m から最下部の 432m であり、全くドロマイト化していない。北大東島のドロマイト化は 5.5Ma に起こり、その時の水深は約 100m で、島は約 280km 南にあった。2.0Ma にもドロマイト化したが、その時の位置は約 100km 南にあったとしている。そして、ドロマイト化作用の可能性を算出した結果、Ohde

(1987) のモデル化に反論した。5.5Ma には Ohde が推定したラグーン的环境は成り立ち得ず、水深は -100m の位置にあったとしている。そして、北大東のドロマイトは Ohde (1987) のラグーンの海水が蒸発して生じた高塩分水が堆積体中を流下して、ドロマイト化を起こしたと推定したが、稲垣、井龍は、5.5Ma には北大東のユニット C2 最上部は水深 100m の位置にあり、同堆積体を周囲の海水が大規模に通過していて、間隙水によってドロマイト化した。即ち、海水ドロマイト化作用により形成されたドロマイトであるとしている。そして、深さ 50m の位置に C1 (2.0Ma) と C2 (5.5Ma) の境界があり、C2 上部でカルスト化がおこったと述べている。

南部ほか (2003) は北大東島の礫性堆積物の再検討を行った。論文中でこれまでの研究史を以下のようにまとめている。杉山 (1934, 1936) は北大東の 431.67m の試料はすべて炭酸塩岩であり、上部約 100m はドロマイト化を被っていると述べている。Hanzawa (1938, 1940) は最下部は第三系漸新統に、最上部は鮮新統~第四系更新統に対比されると報告されている。その後 1990 年代に再度この試料の再検討が行われた。そして、Ohde, Kitano (1981), Ohde (1987) の述べる南・北大東島のドロマイト化は高塩分水を母液として抽出したモデルを提唱した。それに対して、Inagawa, Iryu (1998), 稲垣、井龍 (1999) 鈴木ほか (2002) らはドロマイト化は海水ドロマイト化作用によるものであると反論したと紹介している。北大東の地表地質は島の主体を占める大東層と、それにアバットする小規模な新規石灰岩体である海軍棒層よりなるとしている。層序的に小西 (1980) は大東石灰岩を南大東ドロマイト層と、北大東ドロマイト層と呼び、古川 (1985) は古大東石灰岩 (漸新世~更新世)、新大東石灰岩 (更新世)、新規石灰岩 (最終間氷期) に分けた。そして、新大東石灰岩は標高 20m 以上の部分を占め下位の古大東石灰岩とは不整合で接すると述べている。

南部ほか (2003) では「地形的には隆起環礁で

あるとする荒川, 三浦 (1990) の見解は支持されない。北大東の地形はサブユニット 2a の堆積時の環礁地形を基本として, その後の溶解, 侵食による中央低地の深化や石灰岩堤などのカルスト地形が上書きされて形成されたものであり, 単なる隆起環礁ではない。」と結論付けている。南部らは北大東の大東層を 3 つのユニットに区分した。そのうえで, ドロマイト化の Sr 同位体を用いた年代測定をした。50 点に及ぶ測定結果は 4.9~2.1Ma の中に入ることを述べている。ユニット 1 は島全体に分布し, 主に coral framestone から成る。ユニット 2 はユニット 1 を不整合に覆う。ユニット 3 は北大東海岸付近に点在して分布し, ユニット 2 の上に不整合に重なる。ユニット 3 はドロマイト化は行われていない。南大東の海軍棒層に相当するとしている。

北大東島の地層の断面は南大東島と必ずしも一致するものではないが, 南部論文のユニット 1 としているものが, 南大東島で本論文が, 下位大東層 (Lower Daito Layer) と呼んだものに相当し, ユニット 2 が上部大東層 (Upper Daito Layer) と呼んだ層に相当するであろうと考えた。

Suzuki et al. (2006) は, 北大東島のドロマイト化は, -100m までの層, 即ちユニット C1 とユニット C2 で起きていて, 2.0Ma~5.5Ma の間で起こっている。表層のドロマイト化は 1.6Ma~2.0Ma に発生している。酸素同位体からこの島の表層もボーリングデータのサンプルもドロマイト化は海水ドロマイト化作用によるものであること, そして, 氷河性の低海面のときの低温な海水温によるものであると述べている。

高柳ら (2010) は北大東島のドロマイト化作用の年代を 50 地点の Sr 同位体比から換算して求めた。その結果は 4.9~2.1Ma であると述べている。前出の河名・大出 (1993) は南・北大東島のドロマイトの Sr 同位体年代比を 2.0~1.6Ma と報告している。前述の Suzuki et. al (2006) によると, 北大東島の地表のドロマイトが複数回のドロマイト化作用によって形成された。そして, 北大東島

の地表のドロマイト化を 4 つの時期に分けている。従って, それぞれの 4 つの時期ごとの年代測定を出すべきであったと述べている。

これらの年代測定は南大東島の溶食地形を知る上で極めて示唆に富んでいる。南大東島の東側の海軍棒側と, 北西の北港付近の海岸において, 明らかに 2 つの異なった, 下部の大東苦灰質石灰岩と, 上部の大東苦灰質石灰岩に分かれるが, 本論文で述べた 2 つの苦灰質石灰岩の年代を示しているように思われる。即ち, 200 万年土の数値を示すのは, 上部に位置する大東苦灰質石灰岩であり, 下部の大東苦灰質石灰岩は 400 万年を越える年代を示すと推定できる。但し, 前出の Ohde, Elderfield (1992) は北大東の炭酸塩岩の推定年代を地表下約 50~103m までが 5.5Ma, 地表から 50m までを約 2.0Ma であると述べている。

IV 南大東島におけるカルスト化作用

南大東島はその層序について, 北大東島の様に細分され, 示された論文は少ない。しかし, 島の位置から南大東島も北大東島と同様なサンゴ島としての形成史を有したと考えることが出来る。南部ほか (2003) は北大東島において, 約 500 年から 200 万年までの間にドロマイトが形成されたことを示した。南大東島でも大東石灰岩又は, ドロマイトと呼ばれる地層はほぼ同時代に形成されたと考える。

南大東島は, 標高約 0m~20m までに分布する, 極めて緻密なドロマイト化した石灰岩が基盤となっている。その基盤の上のり, 島のハグ上を構成しているドロマイト化した石灰岩の 2 層がこの島の海面上のおよそのベースを成している。本論文ではこの 2 層を便宜的に下部大東石灰岩 (下部大東層), 上部大東石灰岩 (上部大東層) と呼ぶこととした。海軍棒で報告されているように約 12m のベンチに極めて薄い裾礫性のサンゴ石灰岩が分布する。太田等はこのサンゴ石灰岩のウラニウム系列の年代測定から, ほぼ 12.5 万年 (5e) と推

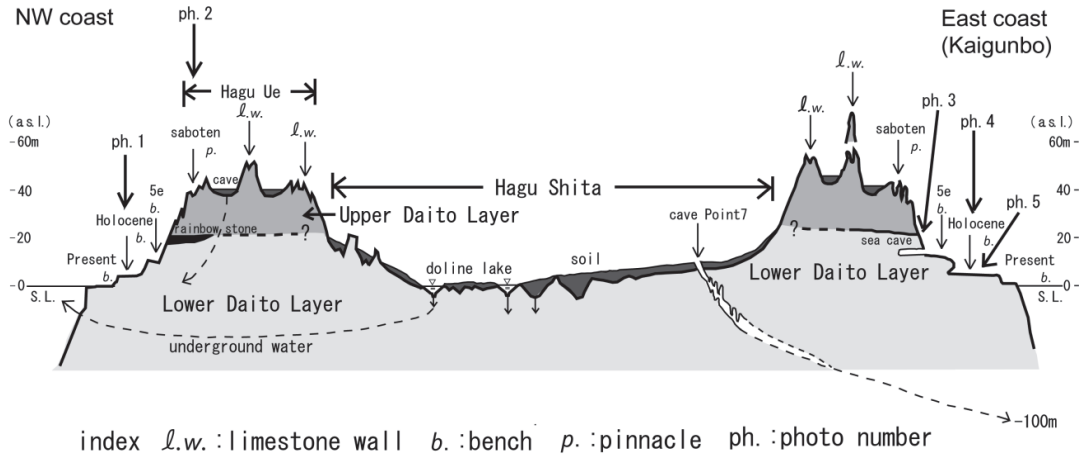
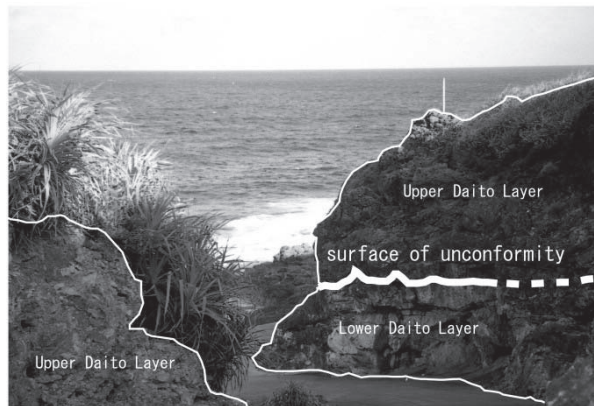


図3 東西断面のカルスト地形のモデル図



(2002年2月25日漆原撮影)

写真2 海軍棒におけるドロマイト化した大東石灰岩の下部と上部の不整合面

定した。

これらの炭酸塩岩が溶食をうけたカルスト地形からこの島の地形史を考察した。但し、洞窟系については本報告に含めず、地表に残る溶食小凹地カメニツアを手掛かりにその地形史を編んだ。

1. 第三紀～初期更新世のカルスト化作用

南大東島には北の海岸にレインボーストーンと呼ぶ赤色～黒褐色の縞目状の層が固い緻密なドロ

マイト質石灰岩（下部大東層）の上を覆う。レインボーストーンの厚さは約 20cm±である。このレインボーストーンを含む不整合面は凹凸があり、必ずしも平坦ではない。不整合面は揺れるが、標高は北港で約 15m である。東海岸の海軍棒においてはドロマイト質石灰岩の緻密な層の上に不整合面で接し、さらに上に空隙に富んだ、サンゴ化石や貝の化石も見られる層（上部大東層）がのる。東海岸でも不整合面の標高は約 15～20m である。

太田等が 5e とした段丘面の標高が東と西海岸でほとんど変わらないことから、この島には傾動がみられないとしている。この東海岸と北海岸で観察できる不整合面は標高には大きな差がないので、5e と同じようにドロマイト化を受けた下部と上部大東ドロマイト質石灰岩は第三紀末から傾動していないと言ってよいであろう。

この不整合面は図 3 と写真 2 に示した。北と東海岸で観察するように、必ずしも平坦ではなく化石土壌を挟んだり挟まなかったりすることから、陸域において溶食が進む環境にあり、土壌化が進行したところでは、それを当時の凹地に残したものが今日のレインボーストーンである。明らかにこの島は一度海面上にあらわれ、地表で長期にわたり、カルスト化が起こった根拠であるとする事が出来る。

北大東島には前述の南部ほか (2003) や、稲垣ほか (1999) によって大東石灰岩の層位別の記述がされ、ドロマイト化の年代も示されている。北大東島の地層区分が南大東島のどの地層に相当するのか不明であり、現時点での正確な対比は難しい。本論文では便宜的に約標高 20m の不整合面を境にして、それより下部を下部大東石灰岩とし、それより上部でハグの地表に出ている部分を上部大東石灰岩と呼ぶ。但し、大東石灰岩は上部も下部もドロマイト化されており、ドロマイト質石灰岩である。どのような理由で土壌化が行われる程、長期間地表にさらされ、カルスト化を受けたのかは不明であるが、次のように考えた。下部石灰岩の時代にはフィリピン海プレートの上ののり、移動しつつ、一方的に島が沈降傾向にあったため、厚い石灰岩の堆積が行われた。しかし、一転して長い時間的なギャップがあり、地表化したことがあると考えなければならない。プレートの動きが沈降から上昇に転化した広い海域があったと考えるより、5Ma から 2Ma の間に地球の冷涼化に伴って海水面が低下したためと考える方が現実的であるように思われる。

2. 第四紀のカルスト化作用

南大東島は隆起環礁である (荒川・三浦, 1990) とする考えに対して、南部ほか (2003) は環礁が隆起した地形とは考えられないとしている。原型は環礁であったかもしれないが、現在の様に、ハグ上は平均標高 40m 以上の環状の台地をしめし、その台地上にはライムストーンウォールが 2~4 列形成されている。島のライムストーンウォールは Flint et al. (1959) によって、溶食により取り残されたものであると報告された。ライムストーンウォールのそれぞれの間には低地があり、土壌層が発達している。ハグ上には多くのドリーネや洞窟が分布していた。しかし、1980 年代の土地改良事業により、多くのドリーネが埋め立てられて、平坦地化されてしまった。北西のハグ上には星野洞がある。この洞窟は豊富な鍾乳石を残すが、基本的には垂直洞であり、水平洞は発達していない。

この島の中心の低地部は地元の人々はハグ下と呼ぶが、標高は 2m~8m である。中央にはドリーネ湖が多く分布し、洞窟も発達するが、複数の洞窟の洞内には地下水位を見ることができる。一部の鍾乳石は現在の地下水面下に没している。

ハグ上とハグ下の標高差は単純に環礁が隆起してできる比高ではない。隆起したサンゴ島が明らかに長期にわたり溶食を受けた結果の地形であり、カルスト化作用を受ける上で、ハグ上とハグ下の溶食速度が異なっていることを示す。Urushibara-Yoshino (2009) は、ハグ上、ハグ下の溶食の差を算出し、現在のようなライムストーンウォールに囲まれ、盆地状の凹地を持つ地形に至るまでの溶食の年代試算の結果を示した。およその年代は約 160 万年である。

3. 海岸に分布するカルスト地形

ハグ上は少なくとも上部大東石灰岩の溶食を受けた地形であると言ってよい。北西では上部大東石灰岩での海岸の溶食は著しく、アダンの林に覆われているとはいえ、最もピナクルの密度が高く、1~1.5m 土のピナクルが良く発達する。地元では

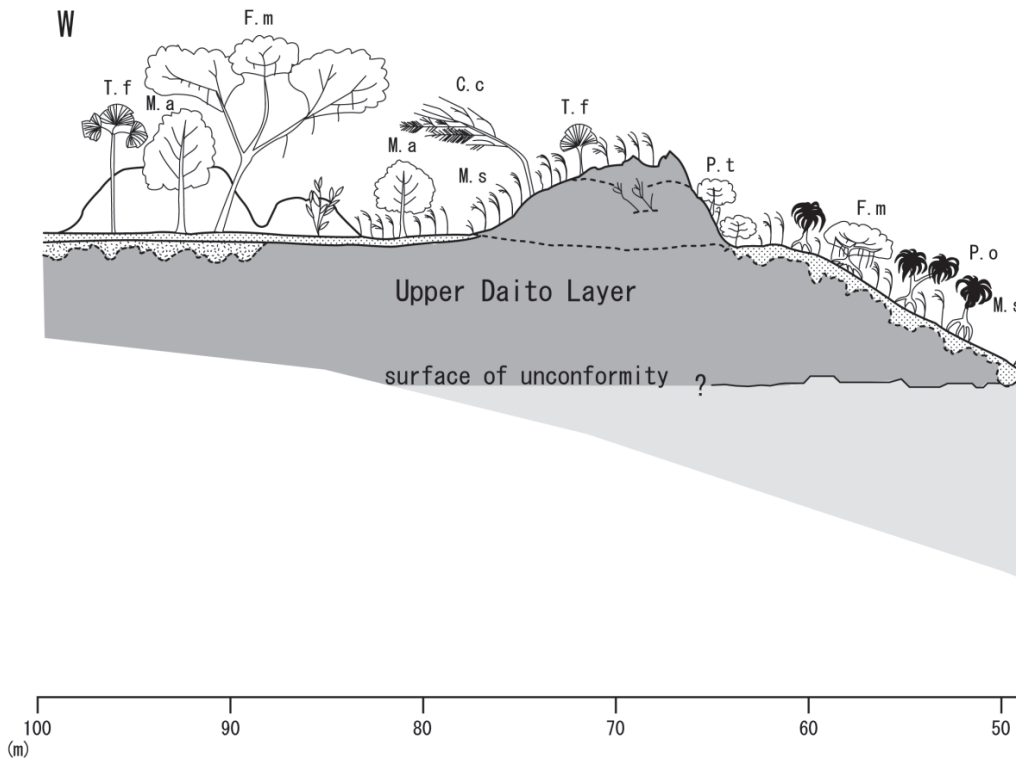


図4 海軍棒の地形断面と植生

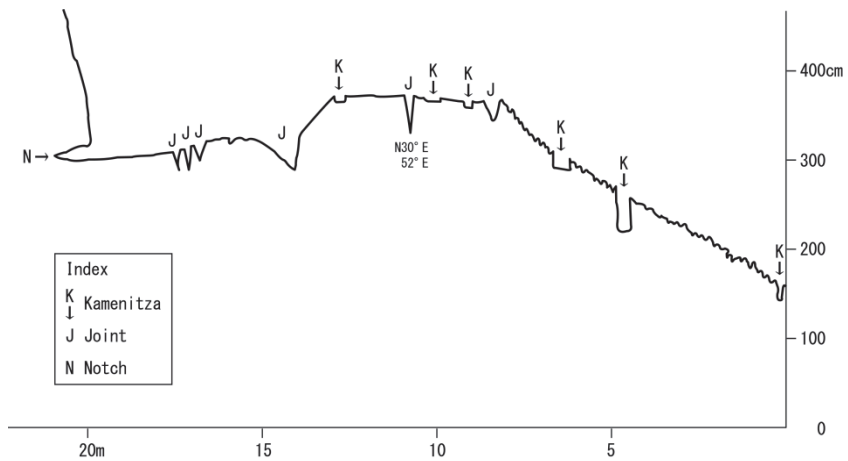
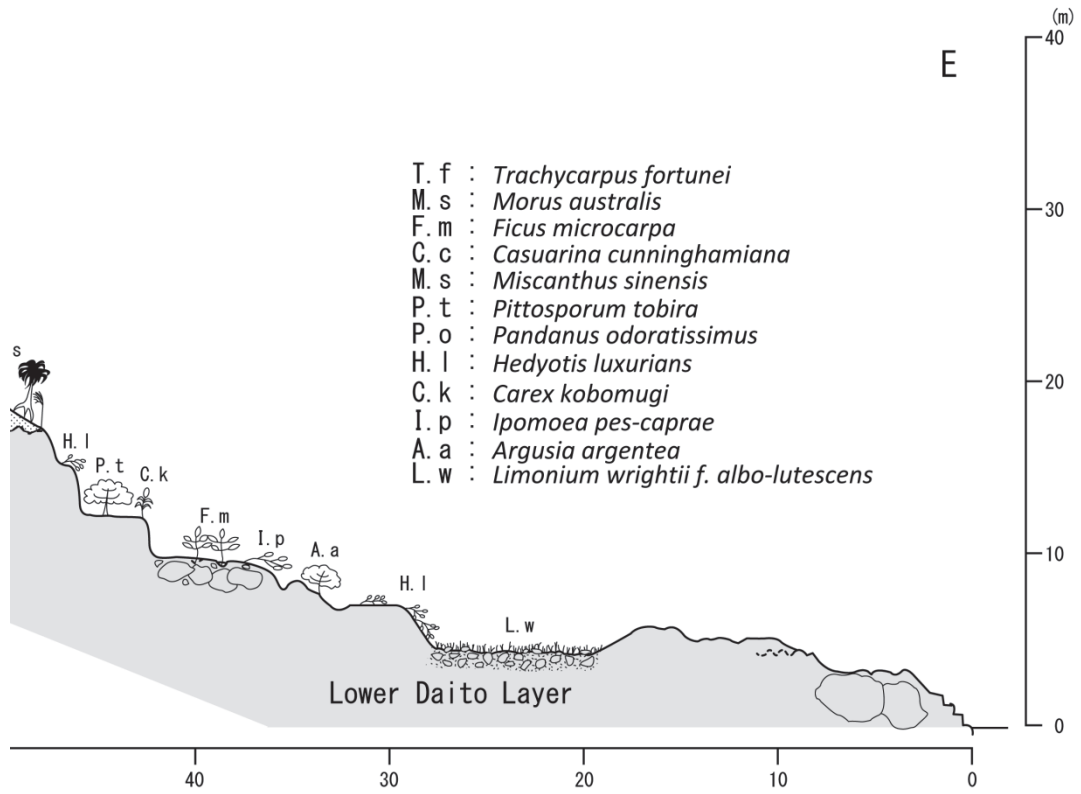


図5 海軍棒における完新世のサーフベンチ

これをサボテンと呼ぶ(写真3)。しかし、下部大東石灰岩は海岸では約10~12mの位置に海食洞

を伴い、幅の狭いノッチ状の段丘面が発達しているが、その上を巨大な海浜礫が覆っている。海軍



(2004年 1月7日 漆原撮影)

写真3 溶食されているピナクル。サボテンと呼ばれる

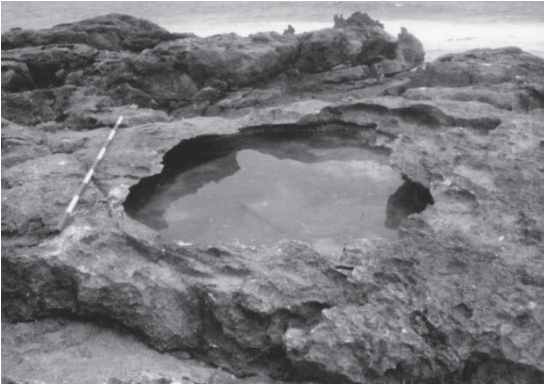


(2006年 7月23日 漆原撮影)

写真4 海軍棒における完新世のサーフベンチと現成のサーフベンチ

棒の展望台直下では、巨大礫が取り除かれ、標高3~4mのサーフベンチが良く発達し、標高5mに

満たない高度にノッチが発達する。これは武永(1966)の最下位のDaly面に相当する。南大東



(2006年7月23日漆原撮影)

写真5 海軍棒における完新世のサーフベンチ上に発達するカメニツァ

島では武永(1966)は、ハグ上から現海面に至る平坦面群を5面に分類した。最下位のDaly面(高度約3m)を完新世海進極大時の海水準を示すものと考えた。海軍棒における海洋側の、最も外側のライムストーンウォールに至るまでの地形断面と植生の図を図4に示した。ハグ上は土壌層の発達がよく大木が生育する。海軍棒の海岸の地形断面の一例は図5と写真4に示す。このサーフベンチは幅が約20mあり、良く発達しているが、基本的に海食によって形成された面である。この平坦なサーフベンチは、6,000年前の古海面を3mとするならば、太田等の5eの隆起率をそのまま用いて計算するとおよそ6,000年前の完新世の高海水時のものと想定できる。これは前述の武永(1966)の論文と一致する。

このサーフベンチ(3~4m)の上には深さ20cmで大きな径(50cmを越える)のカメニツァが発達する(写真5)。ノッチに近い海から遠のいた位置では石灰岩の割目の中に塩に強い植物がわずかに定着している。

サーフベンチ前面の当時のプラットフォーム相当面は急斜面で現在のベンチに続く。このプラットフォーム相当面には、小規模で高さが20cm~30cm大のカメニツァの発達密度は高く、その深さも50cmに近いものまである。この溶食の差に

は単に海水飛沫の溶食量の差によって形成されただけでなく、6,000年前に形成された溶食されやすいサンゴを混じえた礫岩質の石灰岩が付着しているためである。

V. 考察

南大東島のカルスト化作用をまとめると、次の通りである。

1. 南大東島には本論文で下部大東層とよんだドロマイト化した石灰岩が基盤として分布する。標高20m前後まで下部大東層である。この層は、北大東島で500万年~400万年のドロマイト化を受けた年代の層に対比される可能性を有する。南大東島では、さらにその上に不整合面で上部大東層と便宜上呼ぶことにした層がある。上部大東層はハグ上を構成する。この層のドロマイト化は、北大東島では約200万年を示すとされる層と対比されるであろう。両者間の間の不整合面には、レインボーストーンと地元の人々が呼ぶ化石土壌が分布する。この化石土壌の生成のためには、長期にわたる地表でのカルスト化作用が必要である。その原因は、海底のプレートの動きが島の隆起を助けるか、又は長期にわたる気候変化(冷涼化)によって海面が低下し、サンゴ礁が海面上に露出し続け、溶食作用を受けたと考えねばならない。筆者は地球規模での冷涼化が発生したことにより、海面低下が起こったであろう後者の可能性が高いと考える。
2. 南大東島の中央に分布する凹地は平均標高は約8mである。しかし、最も低いドリーネ底に相当する場所には、複数の淡水湖(ドリーネ湖)がある。ハグ上の平均高度は40m~50mであり、2列~4列のライムストーンウォールが発達する。最高高度は75.1m a.s.l.である。この地形を、石灰岩片のタブレットの測定結果を用いて算出すると、約160万年前の溶食の結果であると推定できる。

3. ハグの外壁に相当する島の外縁には標高約 12m に 5e のベンチ状の段丘が発達し、太田ほかは基盤を海軍棒石灰岩が覆うと報告した。この面は、植生の発達しているところが散在し、土壌層が良く発達しているところがある。
4. 標高約 3~4m の位置には基盤（下部大東層）を侵食したサーフベンチが見られ、直径は大きいのが浅いカメニツァが発達する。カメニツァの分布密度は低い。基盤の割れ目にそってわずかに植生がみられる。この僅かに隆起をしたサーフベンチは完新世の高海水準時のものと考えた。
5. 約 2m 前後のプラットホーム面には、小さいピナクルが高密度で発達し、凹地の深さも約 50cm にも達するものがある。下部大東層の基盤そのものの溶食よりも速い速度で溶食がおこなわれていることを示唆する。単に海水飛沫を受けやすいばかりでなく、溶食されやすい完新世のサンゴを混じえた礫岩質の石灰岩が基盤を覆っている。この島に発達する洞窟系を含むカルスト化については、今後の報告とする。

謝辞

この研究は平成 23 年度科学研究費、基盤 C 課題番号 23501250 「南大東島におけるカルスト化過程のモデル化の構築」、代表者吉野和子（漆原和子）に基づいて現地調査をおこなったものである。南大東島の調査は南大東村役場教育委員会教育長の照屋林伸氏と島まるごと館の東和明氏の協力によって実施したものである。また、現地調査は共同研究者であるスロベニア共和国科学アカデミー、ポストイナのカルスト研究所（ポストイナ）、所長 Dr. Tadaž Slabe と研究員 Dr. Martin Knez とともにおこなった。また現地調査には北海道土幌町ひがし大雪博物館研究員乙幡康之氏の協力をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 青木廉二郎(1934)：南大東島の地質学的ならびに地形学的研究. 地質学雑誌, 41, 341-343.
- 荒川達彦・三浦肇 (1990)：『熱い自然—サンゴ礁の環境誌』溶かされたサンゴ礁—カルスト地形. サンゴ礁地域研究グループ, 古今書院, 215-229.
- Flint, D.E., Saplis, R. A. and Crowin, G. (1959) : Military geology of Okinawa-jima, Ryukyuretto (5). Geol. Surv. Branch, Intell. Div. Office Eng. Hq. U. S. Army Forces, Far East, Personnel of U. S. G. S., 88p.
- 古川博恭(1985):琉球弧の地質誌. 大東諸島. 木崎甲子朗 (編), 沖縄タイムズ社, 那覇, 137-143.
- Hanzawa, S. (1938) : Studies on the foraminifera fauna found in the bore cores from the deep well in the Kita-Daito-zima. Proc. Imp. Acad. Japan, 14, 384-390.
- Hanzawa, S. (1940) : Micropaleontological studies of drill cores from a deep well in Kita-Daito Zima (North Borodino Island). Jubil. Publ. Comm, Prof. H. Yabe Sixtieth Birthday, 2, 755-802.
- Inagaki, S. and Iryu, Y. (1998) : Sedimentology and oxygen and carbon isotope stratigraphy for Kita-daito-jima Bore Hole. 15th Int. Sed. Congr. (Alicante, Spain), Abstracts, 441.
- 稲垣静江・井龍康文 (1999)：北大東島試錐試料に記録された過去 2,500 万年の堆積・続成史. 月刊地球, 21, 718-723.
- 河名俊男・平良初男・棚原朗・青木大茂・太田陽子・大村明雄・木庭元晴 (1991)：南・北大東島の後期更新世サンゴ化石の非破壊 γ 線測定による $^{226}\text{Ra}/^{238}\text{U}$ 年代. 地学雑誌, 100(3), 367-377.
- 河名俊夫・大出茂(1993)：沖大東島(隆起準卓礁)の第四紀地殻変動に関する一考察. 琉球大学

- 教育学部紀要 第一部・第二部 43, 57-69.
- 小西健二(1980) : 隆起サンゴ礁からみた最終間氷期以降のアジア・フィリピン海プレート境界付近の地史. 第四紀研究, 18, 241-250.
- 中井精一・東和明・ダニエル=ロング (2009) : 南大東の人と自然. 南方新社, 243p.
- 南部暁生・稲垣静枝・小澤伸介・鈴木由香・井龍康文(2003) : 沖縄県北大東島に分布する礫性堆積物の層序. 地質学雑誌, 109(11), 617-634.
- Ohde, S. (1987) : Geochemistry of Sedimentary Protodolomite. The Journal of earth sciences, Nagoya University 35(2), 167-180.
- Ohde, S. and Kitano, Y. (1981) : Protodolomite in Daito-jima, Okinawa. Geochem. Jour., 15, 199-205.
- Ohde, S. and Kitano, Y.(1982) : Distribution of Protodolomite in Minami-daito-jima, Okinawa. 琉球大学理学部紀要, 33, 81-87.
- Ohde, S. and Elderfield, H. (1992) : Strontium isotope stratigraphy of Kita-daito-jima Atoll, North Phillipine Sea : implications for Neogene sea-level change and tectonic history. 113, 473-486.
- 太田陽子・大村明雄・木庭元晴・河名俊男・宮内崇裕(1991) : 南・北大東島のサンゴ礁段丘からみた第四紀後期の地殻変動. 地学雑誌, 100(3), 317-336.
- 大村明雄・太田陽子(1992) : サンゴ礁段丘の地形層序と構成層の $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 年代測定からみた過去 30 万年間の古海面変化. 第四紀研究, 31(5), 313-327.
- 杉内敏郎(1934) : 北大東試錐に就いて. 東北帝大地古研邦報, (11), 1-44.
- 杉内敏郎(1936) : 第 2 回北大東試錐に就いて. 東北帝大地古研邦報, (25), 1-34.
- 鈴木由香・井龍康文・山田努(2002) : 沖縄県北大東島の地表に分布するドロマイトの形成過程—ニウエ島産ドロマイトとの比較から. 日本地質学会第 109 年学術大会要旨, 259.
- Suzuki, Y., Iryu, Y., Inagaki, S., Yamada, T., Aizawa, S., and Budd, D. A. (2006) : Origin of atoll dolomites distinguished by geochemistry and crystal chemistry: Kita-daito-jima, northern Philippine Sea. Sedimentary Geology, 183, 181-202.
- 高柳栄子・中山裕樹・石川剛志・永石一弥・井龍康文(2010) : 北大東島の地表に分布するドロマイトの Sr 同位体組成. 地質学雑誌, 116(4), 237-240.
- 武永健一郎(1966) : 沖縄南大東の Shore Feature. 地理科学, (5), 1-22.
- 漆原和子・神谷振一郎・楠浩之・羽田麻美・廣井真理子・岩永博之・池村公伯・高野浩一(2004) : 南大東島のカルスト地形に関する一考察. 法政地理, (36), 29-40.
- Urushibara-Yoshino, K. (2009) : Solution Rate of Limestone and Karst Terrain in Japan. 7th International conference on Geomorphology in Melbourne, 2009.7.10.
- Von Arx, W, S. (1954) : Circulation systems of Bikini and Rongelap lagoons. U. S, geol, Surv, Prot. Papers. 260-B, 265-273.

Karstification Processes on Minamidaito Island in the Nansei Archipelago, Southwest Japan

Kazuko URUSHIBARA–YOSHINO*

Abstract

Minamidaito Island is a karstified uplift coral island, located on the Philippine Sea Plate. The karstification periods can be divided into three. The first period was at the end of Tertiary Pleiocene, the second period during the Pleistocene, and the third period during the Holocene. The first period of karstification can be observed as an unconformity border with fossil soil layers called rainbow stone in the lower Daito layers composed of dolomitized limestone. The ages of the dolomite have been analysed as 5 Ma and 4 Ma. The long karstification seems to have occurred as a result of sea level change caused by the cooler period of the palaeoclimatic conditions.

After that period of karstification processes, the island subsided again and dolomitized limestone accumulated until about 2 Ma. This is found in the upper Daito Layers. After that, the island underwent karstification continuously, because of its location in the uplifted zone of the plate. The time of karstification which formed the higher land, Hagu, characterized by limestone walls, and the basin-shaped lowland, Hagu Shita, is calculated as 1.6 Ma according to a previous study by the present author in 2009. The limestone walls and the basin-shaped lowland together with the doline lakes were formed during Pleistocene.

The coast of the island is formed by coral limestone dated as 5e, and has an altitude about 12 m a.s.l. Based on this value, the rate of uplift was calculated as 0.05 m/ka by Ota et al. This island has been uplifted without tilting. In the present study, the corrosional terrain was measured on the Kaigunbo coast. It was found that, on landforms of the same age, different corrosional terrains could be observed on the bench and platform, which were formed during the period with high sea levels during the Holocene. However, the bench had been formed in the lower Daito Layer. On the bench are found kamenitzas at a height of about 3.5–4 m a.s.l. The depth of the kamenitzas is usually 20–25 cm, and their diameter is about 50 cm on the bench. On the platform at about 2 to 3 m a.s.l., the kamenitzas have a depth of 20–50 cm, and diameter of 20–30 cm. The density of these kamenitzas is very high, and the sizes of the pinnacles are 20–30 cm. The solution rate is very fast on the platform. This phenomenon supports the different lithologies of the two terrains. On the platform, conglomerate with young coral limestone cover the lower Daito Layer well.

Keywords: Minamidaito Island, Daito limestone, Karstification, Kaigunbo, kamenitza, pinnacle

* Department of Geography, Hosei University