

## 喜界島の完新世サンゴ礁段丘形成史の高精度復元

研究代表者：杉原 薫 筑波大学大学院生命環境系地球科学域

共同研究者：佐々木圭一 金沢学院大学経済情報学部経済情報学科

小林雄生 筑波大学大学院生命地球科学研究群地球科学学位プログラム

## 1. はじめに

鹿児島県喜界島は、面積約 57 km<sup>2</sup>・周囲約 50km の小さな島で、琉球列島中北部、奄美大島の東方約 25km (北緯 28°20', 東経 130°00') に位置する (図 1a, 1b)。その沿岸には礁原が未発達な裾礁 (エプロン礁) が発達し、200 種を超える造礁サンゴが生息している (西平・Veron, 1995)。またこの島は、琉球列島の中で最も琉球海溝に近く、フィリピン海プレートの沈み込みに伴い約 2.1m/ka で隆起しているため (Inagaki and Omura, 2006)、陸上には後期更新世～完新世のサンゴ石灰岩・堆積物とそれらから構成されるサンゴ礁段丘が発達する (図 1b)。4 段以上に細分された完新世のサンゴ礁段丘が見られるのは、世界的に見ても喜界島やパプアニューギニアのヒュオン半島などに限られることから、これら 2 地域では完新世サンゴ石灰岩・堆積物の堆積環境の復元とサンゴ礁段丘の形成史、それらに関連する気候・海水準変動の研究が盛んに行われてきた (喜界島: Konishi et al., 1974; 中田ほか, 1978; 太田ほか, 1978; 佐々木ほか, 1998; Webster et al., 1998; 太田ほか, 2000; Sugihara et al., 2003 など、ヒュオン半島: Chappell and Polach, 1976, 1991; Ota et al., 1993; 中森ほか, 1995; Chappell et al., 1996; Pandolfi, 1996 など)。

喜界島の完新世サンゴ礁段丘は、地形的な特徴と造礁サンゴ化石の放射年代の違いから 4 つの段丘面に大別され (太田ほか, 1978; 中田ほか, 1978 など)、陸側の標高が高く形成年代の古いものから順に I 面・II 面・III 面・IV 面とよばれている (太田ほか, 1978; Sugihara et al., 2003)。I 面は、島内に散在するサンゴ石灰岩の露頭、ビーチ堆積物、離水ノッチや波蝕台などから、その標高は約 11.1~7.4m、形成年代は 8.1~6.3 ka と推定されている (Sugihara et al., 2003)。II 面は、標高が低い陸側 (inner area) と標高が高い海側 (outer area) に分けられる。前者は標高約 2.5~1.8m で形成年代 5.3~6.2ka、異地性の造礁サンゴ化石などを多く含む未固結の石灰質砂礫からなる。後者は標高 4.8~4.6m で形成年代 7.3~4.1ka で、現地性造礁サンゴ化石を含むよく固結したサンゴ石灰岩からなる。III 面と IV 面の標高と形成年代はそれぞれ標高 3.1~2.7m・形成年代 5.6~2.9ka、標高約 0.8m・形成年代 8.0~1.4ka で、II 面 outer area と同様にサンゴ石灰岩からなる。各段丘面を形成する造礁サンゴ化石の特徴から、これら 4 つのサンゴ礁段丘は典型的な琉球列島のサンゴ礁斜面の浅海部または礁池に対比することができると考えられている (太田ほか, 2000; Sugihara et al., 2003)。

太田ほか (1978) は、各段丘の分布標高と段丘上の造礁サンゴ化石の放射性炭素 (<sup>14</sup>C) 年代から、4 つの段丘面は 4 回の間欠的な地震隆起で形成されたものの、最上位の I 面については縄文海進時のユースタティックな海面上昇の影響がある可能性を示唆した。一方中田ほか (1978) は、同様の調査を行ったにも関わらず、4 つの段丘面は 4 回の間欠的な地震隆起のみで形成されたと結論づけた。同じ調査地・調査方法で、用いた <sup>14</sup>C 年代もほぼ同じだったにも関わらず、両者の結論が異なった背景には、年代測定に用いた造礁サンゴ化石に基づく相対的海水準の見積り方の違いが大きく関係している (Sugihara et al., 2003)。

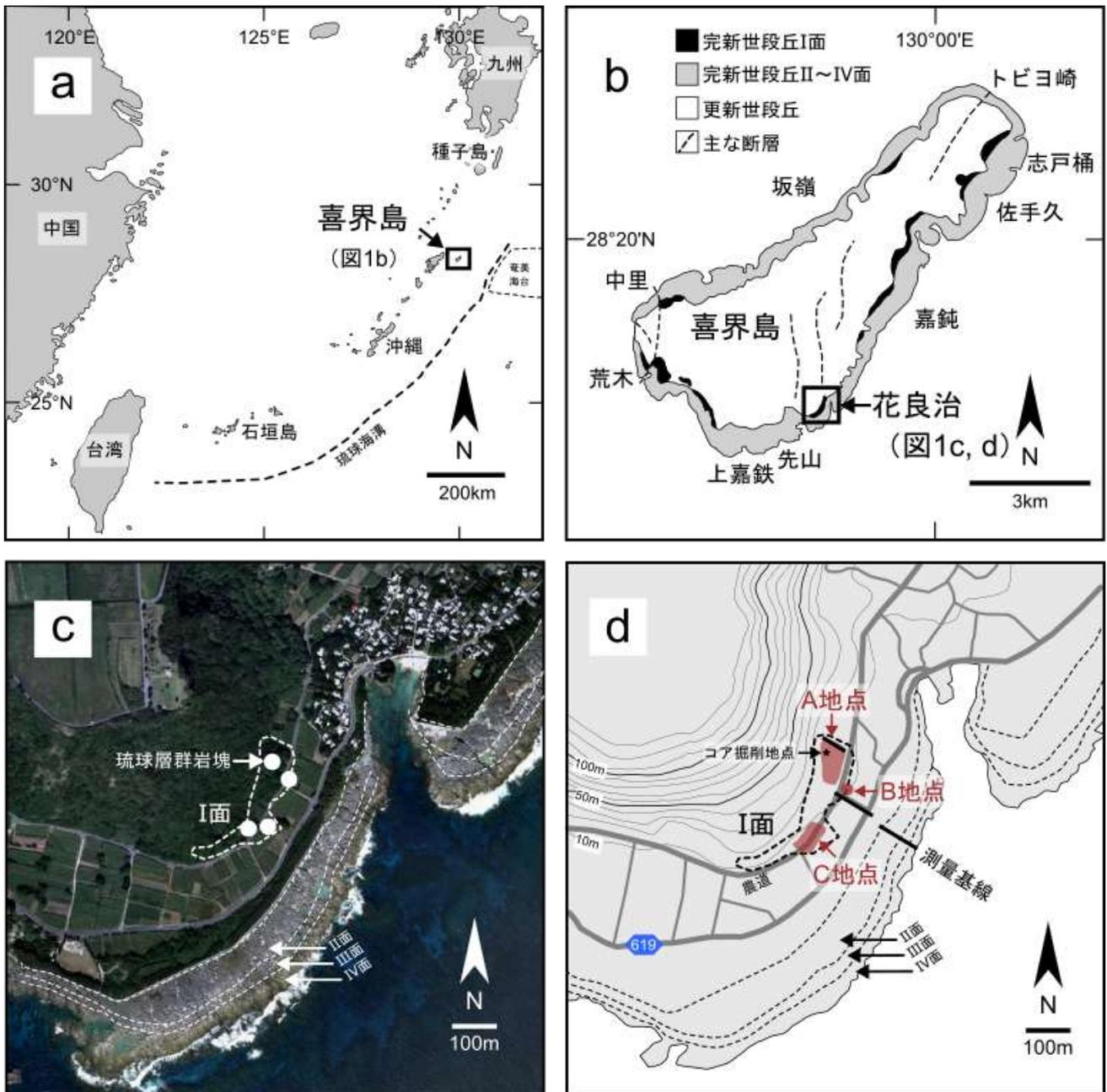


図1 (a) 琉球列島と喜界島の位置図. (b) 喜界島の簡易地質図と本研究の調査地域. 調査地点と完新世サンゴ礁段丘I~IV面の分布を示す (c) 航空写真と (d) 地形図

Sugihara et al. (2003) は、各段丘面に加えて離水ノッチやビーチ堆積物などの標高を光波測量計で測量した。また、各段丘中の造礁サンゴ化石の定量分布調査を行うとともに、それらの  $^{14}\text{C}$  年代測定を行った。さらに、喜界島沿岸の現世サンゴ礁において、水深 5m 以浅の簡易地形測量と造礁サンゴの定量分布調査を行った。そして彼らは、これらの調査結果をもとに各段丘面形成時の相対的海水準と間欠的な地震隆起の規模とタイミングを高精度で復元した。その結果、II 面から IV 面については従来の見解を支持しつつも、I 面が分布標高と形成年代の異なる 2 つの段丘面に細分でき、標高が高く形成年代が新しい段丘面の形成には

約 7~6ka に起きた約 2m のユースタティックな海面上昇が関係していることを示唆した。一方 Shikakura (2014) は、喜界島の GPS 測地データの解析と隆起速度別段丘形成シミュレーションをもとに、I面を含む 4 つの段丘面の成因が 4 回の間欠的地震隆起と一定速度での定常的な隆起で説明できる可能性を示した。このように、一連の完新世離水サンゴ礁段丘の形成史や成因の全容解明には至っておらず (佐々木, 2022)、特に I 面の形成史については未解決のままである。

本研究の目的は、喜界島南東部の完新世サンゴ礁段丘 (特に I 面) の高精度測量、段丘を構成する現地性造礁サンゴ化石の定量調査とそれらの  $^{14}\text{C}$  年代測定を実施し、それらの結果から I 面の形成史を詳細に復元することである。特に、I 面がさらに二つの段丘面に細分されるかどうか、I 面の相対的隆起量とそのタイミングはいつなのか、そして段丘の成因に縄文海進時のユースタティックな海面上昇が影響しているのかどうかを明らかにする。

## 2. 方法

喜界島南東部の I 面は、浦原~花良治をつなぐ農道沿いに約 450m に渡って連続的に分布し、航空写真と地形図からその標高は 10m 前後、幅は 25m 前後と考えられる (図 1c, 1d)。本研究では、花良治側のほぼ南北に走る農道沿いに 3 つの調査地点 (A~C) を設定した。まず、B 地点の南側に起点を設定し、mm 単位での測量が可能な光波測量計 (TOPCON 社製 CS-101F) を設置した。次に、そこから国土地理院発行の 2 万 5 千分の 1 地形図や喜界町作成の土地改良図に記された農道上の標高点を測量し、起点の正確な標高を決定した。さらにこの起点から、A 地点入口の側溝上、Sugihara et al. (2003) も測量している B 地点の露頭最上部と C 地点の調査露頭最下部をそれぞれ測量した。A 地点では、50m 巻尺を用いて側溝上の測量点から北西方向に基線を設定した。次に、A 地点全体を見渡せる場所に光波測量計を再設置し、そこから基線上を 2m おきに測量した。また、岩相記載と造礁サンゴ化石調査を行う露頭最上部の測量も行った。一方 II~IV 面については、起点の南東方向に基線を設定し、この基線に沿って I 面と同様の調査を行った (図 1c, 1d)。ただし、基線の途中には防風林があり、起点から海岸線まで連続して測量することができなかつたため、II 面の最も標高が高い地点に別の起点を設けて測量を行った。

各段丘の岩相記載と現地性造礁サンゴ化石調査には、塩ビパイプとタコ糸で作成した 1m×1m のコドラート (方形枠) を用いた (図 2)。まず、測量調査を行った I 面と II~IV 面の基線沿いで、現地性造礁サンゴ化石を多く含む水平露頭上にコドラートを設置し、Dunham (1962) および Embry & Klován (1971) に従ってコドラート内のサンゴ石灰岩・堆積物の岩相を記録した。次に、造礁サンゴ化石の種同定と現地性・異地性の判別を行うとともに、真上からそれらの輪郭をスケッチした (図 2)。また I 面については、縦断面を観察できる A 地点と C 地点の垂直露頭でも同様の調査を行った。得られたスケッチは、スキャンした後に

TIFF ファイルに変換し、画像解析ソフト Image-J を使って 1 m<sup>2</sup>内で現地性造礁サンゴ化石が占める面積の割合を算出し、造礁サンゴ化石各種の被度 (%) として表した。得られた出現種リストと種ごとの被度データから、各段丘を構成する造礁サンゴ化石群集とその優占種を決定した。造礁サンゴ化石の種同定は、杉原ほか (2015) や西平 (2020) に従い、それらの学名は国際的な海洋生物データベース (World Register of Marine Species) に従って表記した (WoRMS, 2024)。

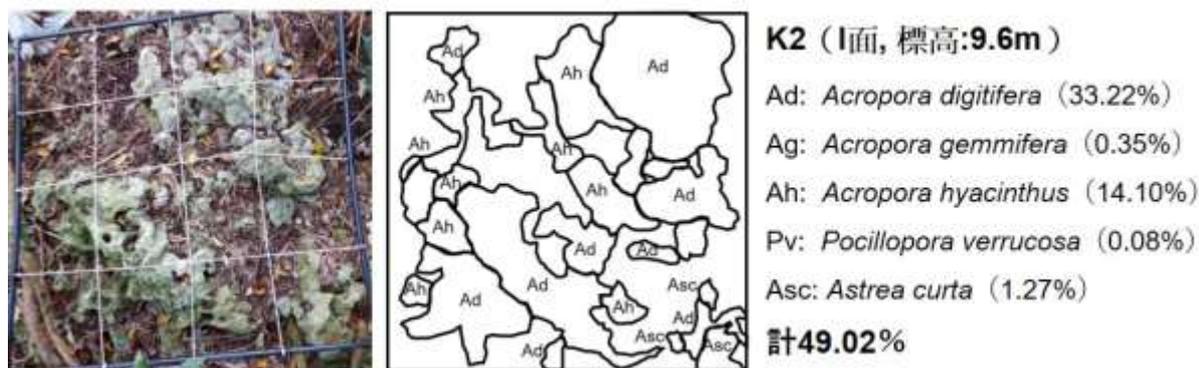


図2 I面 A 地点の水平露頭 (K2) でのコドラート写真とスケッチ、各出現種および全種の被度 (%)

I面の A 地点では、2011 年 9 月にボーリング調査が行われ、標高 9.8m 地点から直径 5cm・全長 470 cmの掘削コアが得られている (図 3)。また、このコアの最上部と最下部の現地性造礁サンゴ化石 2 点については、すでに <sup>14</sup>C 年代測定が行われている (佐々木, 未公表)。本研究では、この掘削コアの岩相記載と、含まれる造礁サンゴ化石の種同定と現地性・異地性の判別を行った。



図3 I面 A 地点から回収された掘削コア写真。コア箱の長辺が約 1m

I面の水平及び垂直露頭から造礁サンゴ化石群体を採取し、<sup>14</sup>C 年代測定を行った。まず、保存状態が良好な造礁サンゴ化石を A 地点で 6 群体、C 地点で 5 群体、また、掘削コアから 4 群体を選定し、その化石骨格の一部をハンマーとタガネを用いて採取した。次に、これらの化石骨格片を肉眼及びルーペで観察し、変質や溶解などの続成変化が認められない部分から、岩石カッターとタガネを用いて一辺 5mm 程度の小片試料を作成した。次に、これらの

試料を双眼実体顕微鏡下で観察し、認識できた変質部や不純物を除去した。さらに、約 1 mol/L の希塩酸を用いて乾燥重量約 20% をエッチングし、その後、蒸留水中で超音波洗浄することで、観察では認識できなかった変質部や現代炭素を含む不純物を可能な限り除去した。

上記の方法で準備した全 15 試料について、山形大学高感度加速器質量分析センターの AMS (加速器質量分析装置) を用いた  $^{14}\text{C}$  年代測定を行った。その際、元素分析計を用いた燃焼により  $\text{CO}_2$  ガス化した。試料中の残存有機物の影響を評価するために、1 試料 (K4-3) については、別の小片試料を用いてリン酸溶解による  $\text{CO}_2$  ガス化を行い  $^{14}\text{C}$  測定し (K4-3B)、燃焼による  $\text{CO}_2$  化した結果 (K4-3A) と比較した。本研究で得られた計 16 個の  $^{14}\text{C}$  年代値と先行研究 (三井・木越, 1996; Konishi et al., 1974; Omoto et al., 1976; Omoto, 1977; Konishi et al., 1983; 太田ほか, 1978; 小西ほか, 1983; Sugihara et al., 2003; 佐々木, 未公表) で得られている計 73 個の  $^{14}\text{C}$  年代について、年代較正プログラム OxCal 4.4 (Bronk Ramsey, 2009) と較正曲線 Marine20 (Heaton et al., 2020) を用いた暦年較正を行った。この際、海洋リザーバー効果の補正には、喜界島南東海域で得られている  $\Delta R = -187 \pm 37$  (Hirabayashi et al., 2017 の結果を Marine20 に基づき再計算; <http://calib.org/marine/>) を用いた。

### 3. 結果

#### 3-1. サンゴ礁段丘の地形・地質

I 面の A 地点では、標高 10m 前後・幅約 11m の明瞭な平坦面があり、この平坦面は現地性造礁サンゴ化石を含むよく固結した石灰岩 (Coral framestone と Coral bindstone) で構成されていた (図 4a)。また、この面上には直径 10m ほどの巨大な岩塊が乗り、岩塊が乗っていない部分は植生や土壌で薄く覆われていた (図 4b)。この岩塊は、更新世の琉球層群を構成する石灰岩 (以下、琉球層群岩塊とよぶ) であることから、西側 (陸側) の崖から崩落してきたものと考えられる。この平坦面の東側 (海側) にあたる前縁部には、標高差約 2~3m の垂直露頭があり、その前方が標高 6.5~6m・幅約 10m の平坦な凹地状になっており、さらにその前方に標高 7.5m・幅約 3m のサンゴ石灰岩からなる地形的な高まりが見られた。B 地点では、農道の東側に標高 9.6~8.0m・露頭の横幅約 3m の垂直露頭があり、その直上には直径 5m ほどの琉球層群岩塊が乗っていた (図 4c)。この露頭は Sugihara et al. (2003) が調査した露頭で、厚さ数十 cm 以上の現地性造礁サンゴ化石が積み重なった Coral framestone であった。C 地点では、標高 9.2~7.1m・露頭の横幅 15m ほどの垂直露頭が農道の両側で見られ、露頭下部は Coral-Algal framestone~bindstone、その上部は直径数~数十 cm の異地性造礁サンゴ化石、琉球層群起源の石灰岩や島尻層群起源の泥岩の垂角~垂円礫を含む未固結~半固結の Coral rudstone~floatstone だった (図 4d)。また、両露頭の直上には直径 5~10m ほどの琉球層群岩塊が乗っており、道路の西側露頭の標高 8.5~8.1m では、Coral rudstone の中に直径 3~10 cm ほどで灰褐色~茶褐色の軽石層が認められた (図 4e)。



図4 (a) 測量起点から見たI面上のA・B地点の位置関係. (b) A地点におけるI面垂直露頭. 左上直上に琉球層群岩塊が乗る. (c) B地点の垂直露頭の様子. (d) C地点の垂直露頭の様子. (e) C地点の垂直露頭内に見られる軽石. (f) 起点南東部でのII~IV面の分布の様子



### 3-2. 造礁サンゴ化石群集

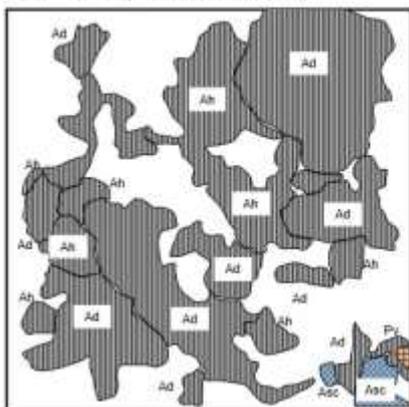
1m×1m のコドラートを用いた現地性造礁サンゴ化石の定量調査は、I 面 A 地点の水平露頭 6 地点 (計 6 m<sup>2</sup>)・垂直露頭 4 地点 (7 m<sup>2</sup>)、同面 C 地点の垂直露頭 3 地点 (計 6.63 m<sup>2</sup>)、II 面外側の水平露頭 3 地点 (計 3 m<sup>2</sup>)、III 面の水平露頭 4 地点 (計 4 m<sup>2</sup>) そして IV 面の水平露頭 3 地点 (計 3 m<sup>2</sup>) で行われた。その結果を図 6・図 7 および表 1 に示す。

まず、I 面 A 地点の水平露頭 (標高 9.8m~8.6m) では、3 科 5 属 9 種の造礁サンゴ化石が出現し、全コドラート内の現地性造礁サンゴ化石の平均被度は 32.3% だった。優占種は太枝状の成長形をもつイボハダハナヤサイサンゴ *Pocillopora verrucosa* (被度 11.8%)、指状~卓状のミドリイシ属 *Acropora* であるコユビミドリイシ *A. digitifera* (被度 7.9%) やクシハダミドリイシ *A. hyacinthus* (被度 7.4%) で、指状~卓状のオヤユビミドリイシ *A. gemmifera* (被度 2.1%)、塊状~被覆状のヒメコモンキクメイシ *Goniastrea minuta* (被度 1.7%) やマルキクメイシ *Astrea curta* (被度 0.2%) などのサザナミサンゴ科 Merulinidae に属するサンゴ (merulinids : merulinid corals) が付随して見られた。また、A 地点の垂直露頭では、6 科 15 属 22 種が出現し、全コドラート内の現地性造礁サンゴ化石の平均被度は 31.8% だった。優占種は指状~卓状の *A. digitifera* (被度 12.3%) や *A. hyacinthus* (被度 8.2%) だったが、露頭下部では塊状~被覆状のフカトゲキクメイシ *Cyphastrea serailia* (被度 2.1%) やカメノコキクメイシ *Favites abdita* (被度 1.8%) などが特徴的に見られた。C 地点の垂直露頭では 4 科 7 属 13 種が出現し、全コドラート内の現地性造礁サンゴ化石の平均被度は 14.5% で、塊状~被覆状のホシキクメイシ *Goniastrea stelligera* (被度 6.2%) が卓越し、次いでヨロンキクメイシ *Coeloseris mayeri* (被度 1.9%)、卓状の *A. hyacinthus* (被度 2.0%) などの被度が高かった。

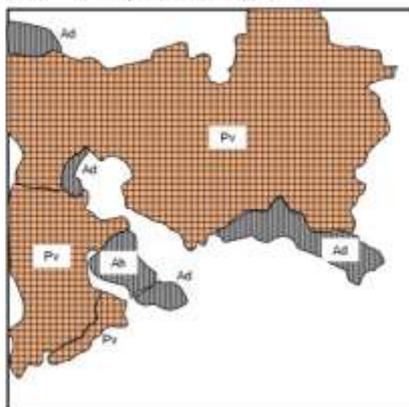
次に、II 面外側の水平露頭 (標高 5.0m~4.7m) では 4 科 5 属 11 種が出現し、全コドラート内の現地性造礁サンゴ化石の平均被度は 26.6% であった。優占種は指状~卓状の成長形をもつ *Acropora digitifera* (被度 11.3%)、*A. hyacinthus* (被度 5.3%) や太枝状のヤスリミドリイシ *A. robusta* で、太枝状のヘラジカハナヤサイサンゴ *Pocillopora grandis* や被覆状~塊状の *Goniastrea stelligera* (ともに被度 0.7%) などが共に見られた。次に III 面の水平露頭 (標高 3.6m~3.3m) では、4 科 9 属 16 種が出現し、全コドラート内の現地性造礁サンゴ化石の平均被度は 35.0% だった。優占種は指状~卓状の *A. digitifera* (被度 13.3%) や *A. hyacinthus* (被度 4.3%) で、被覆状~塊状のナガレサンゴ *Leptoria phrygia* (被度 4.0%) や *G. minuta* (被度 3.4%) などが共に見られた。IV 面の水平露頭 (標高 2.1m~1.2m) では、2 科 4 属 9 種が出現し、全コドラート内の現地性造礁サンゴ化石の平均被度が 46.2%、優占種は被覆状~塊状のコモンキクメイシ *Goniastrea retiformis* (被度 12.9%) や *Favites abdita* (被度 10.0%)、指状~卓状の *A. hyacinthus* (被度 8.2%) や *A. digitifera* (被度 5.2%) や *A. gemmifera* (被度 4.2%) の被度も高かった。

I面 A 地点から得られた掘削コアでは、3科5属10種の造礁サンゴ化石が見られ、下部から上部にかけて指状～卓状または太枝状の成長形をもつミドリイシ属 *Acropora* が卓越していた。下部では、現地性で指状～卓状の *A. hyacinthus* が最も多く含まれており、その他に指状～卓状の *A. monticulosa* や太枝状の *A. robusta*、被覆状～塊状のサザナミサンゴ科サンゴ (merulinids) の1種である *L. phrygia* なども見られた。中部では異地性で指状～卓状の *A. hyacinthus* や *A. digitifera*、太枝状の *A. robusta* や *P. grandis* などの枝が多く含まれていた。上部では現地性で指状～卓状の *A. hyacinthus* や *A. digitifera* や *A. monticulosa* が、最上部では太枝状の *P. verrucosa* が厚く重なっていた。

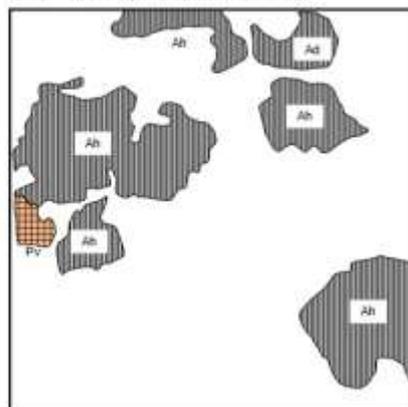
K2 (I面, 標高 9.6m)



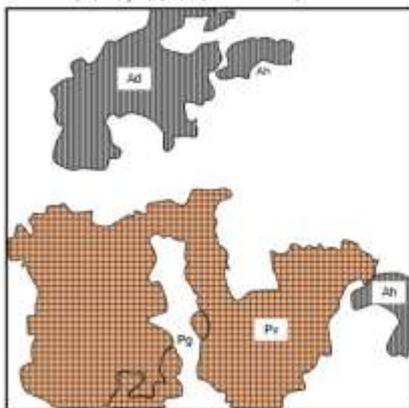
K3 (I面, 標高 9.8m)



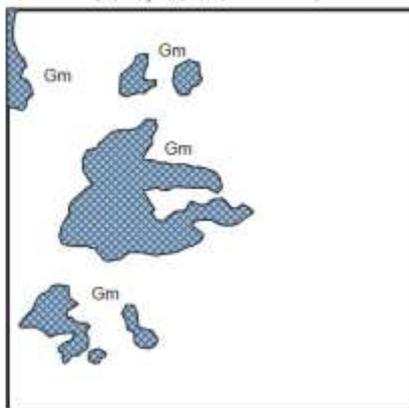
K8 (I面, 標高 9.0m)



K9 (I面, 標高 9.8m)



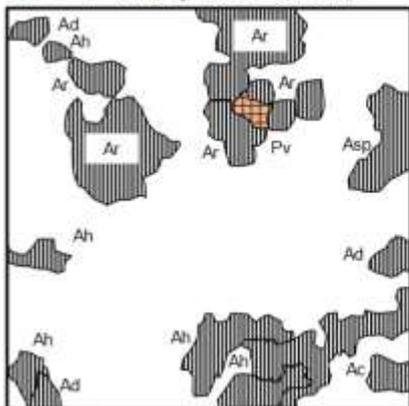
K10 (I面, 標高 9.8m)



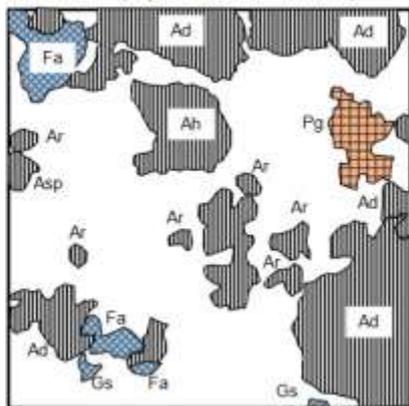
K11 (I面 標高 8.6m)



KII-1 (II面, 標高 5.0m)



KII-2 (II面 標高 4.7m)



KII-3 (II面, 標高 4.8m)

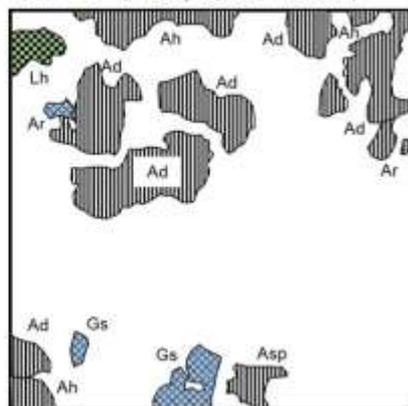
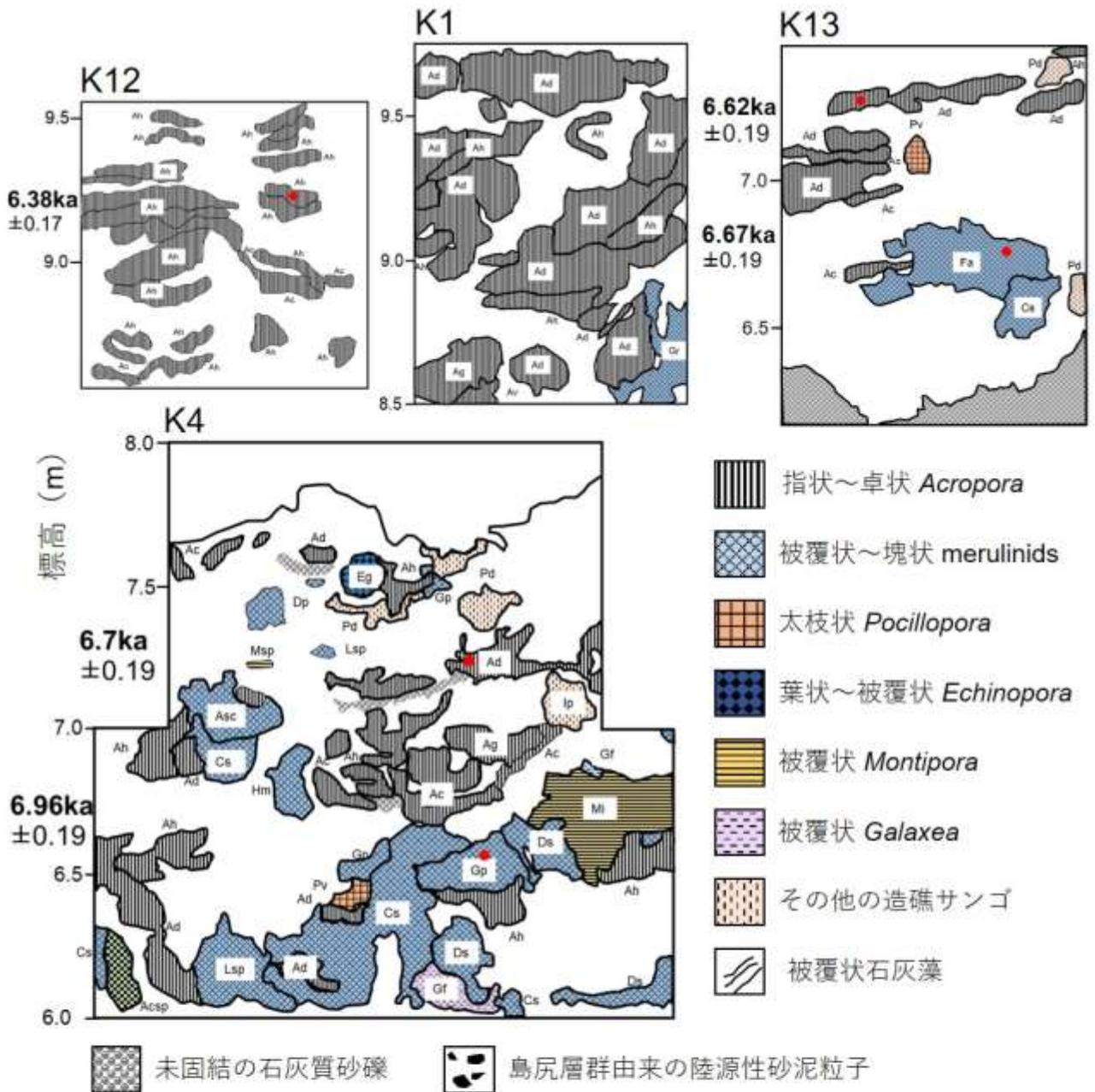




表1 I~IV面の水平・垂直露頭における出現種リストと各種の平均被度(%)

出現種		I面(A)	I面(A)	I面(C)	II面	III面	IV面
科	種	水平	垂直	垂直	水平	水平	水平
Acroporidae	<i>Acropora cytherea</i>		1.41	0.22	0.22		
	<i>Acropora digitifera</i>	7.93	12.29	0.95	11.30	13.32	5.17
	<i>Acropora gemmifera</i>	2.08	1.10	0.65		0.46	4.18
	<i>Acropora hyacinthus</i>	7.42	8.24	1.97	5.33	4.27	8.24
	<i>Acropora monticulosa</i>			0.27	0.75	1.74	
	<i>Acropora papillare</i>						0.05
	<i>Acropora robusta</i>	0.83		0.07	5.22		3.83
	<i>Acropora valida</i>		0.13				
	<i>Acropora sp.</i>			0.40	0.96		
	<i>Isopora palifera</i>			0.15	0.88		0.94
	<i>Montipora informis</i>			0.75			
	<i>Montipora sp.</i>			0.02			
Euphylliidae	<i>Coeloseris mayeri</i>			1.93			
	<i>Galaxea fascicularis</i>		0.15				
Lobophyllidae	<i>Acanthastrea hemprichii</i>		0.14			0.54	
	<i>Lobophyllia hemprichii</i>				0.30		
Agariciidae	<i>Pavona duerdeni</i>		0.48				
Merulinidae	<i>Astrea curta</i>	0.21	0.31			1.26	
	<i>Cyphastrea serailia</i>	0.13	2.05				
	<i>Dipsastraea pallida</i>		0.10				
	<i>Dipsastraea speciosa</i>		0.47				
	<i>Echinopora gemmacea</i>		0.10	0.61		0.08	
	<i>Favites abdita</i>		1.79		1.00	1.85	9.88
	<i>Favites halicora</i>					0.61	
	<i>Goniastrea favulus</i>					0.34	0.11
	<i>Goniastrea minuta</i>	1.68				3.40	12.91
	<i>Goniastrea pectinata</i>		0.43			0.07	
	<i>Goniastrea retiformis</i>		0.84				
	<i>Goniastrea stelligera</i>			6.23	0.71	1.90	
	<i>Hydnophora microconos</i>		0.16				
	<i>Leptoria phrygia</i>		0.43			3.98	1.82
<i>Platygyra daedalea</i>			0.36				
Pocilloporidae	<i>Pocillopora grandis</i>	0.18			0.72		
	<i>Pocillopora verrucosa</i>	11.82	0.20		0.13	0.24	
平均被度(%)		32.3	31.8	14.5	26.6	35.0	46.2



- Ac: *Acropora cytherea*
- Ad: *Acropora digitifera*
- Ag: *Acropora gemmifera*
- Ah: *Acropora hyacinthus*
- Am: *Acropora monticulosa*
- Ar: *Acropora robusta*
- Av: *Acropora valida*
- Asp: *Acropora* sp.
- Ip: *Isopora palifera*
- Mi: *Montipora informis*

- Msp: *Montipora* sp.
- Pv: *Pocillopora verrucosa*
- Ga: *Galaxea fascicularis*
- Pd: *Pavona duerdeni*
- Ach: *Acanthastrea hemprichii*
- Lh: *Lobophyllia hemprichii*
- Asc: *Astrea curta*
- Cs: *Cyphastrea serailia*
- Dp: *Dipsastraea pallida*
- Ds: *Dipsastraea speciosa*

- Eg: *Echinopora gemmacea*
- Fa: *Favites abdita*
- Gp: *Goniastrea pectinata*
- Gr: *Goniastrea retiformis*
- Gs: *Goniastrea stelligera*
- Hm: *Hydnophora microconos*
- Le: *Leptoria phrygia*
- Pld: *Platygyra daedalea*

図7 I面A地点およびC地点の垂直露頭上に設置したコドラート内の岩相、現地性・異地性造礁サンゴ化石のスケッチ。C地点のK16露頭では、標高8.5-8.1mに淘汰の良い軽石の層が見られる

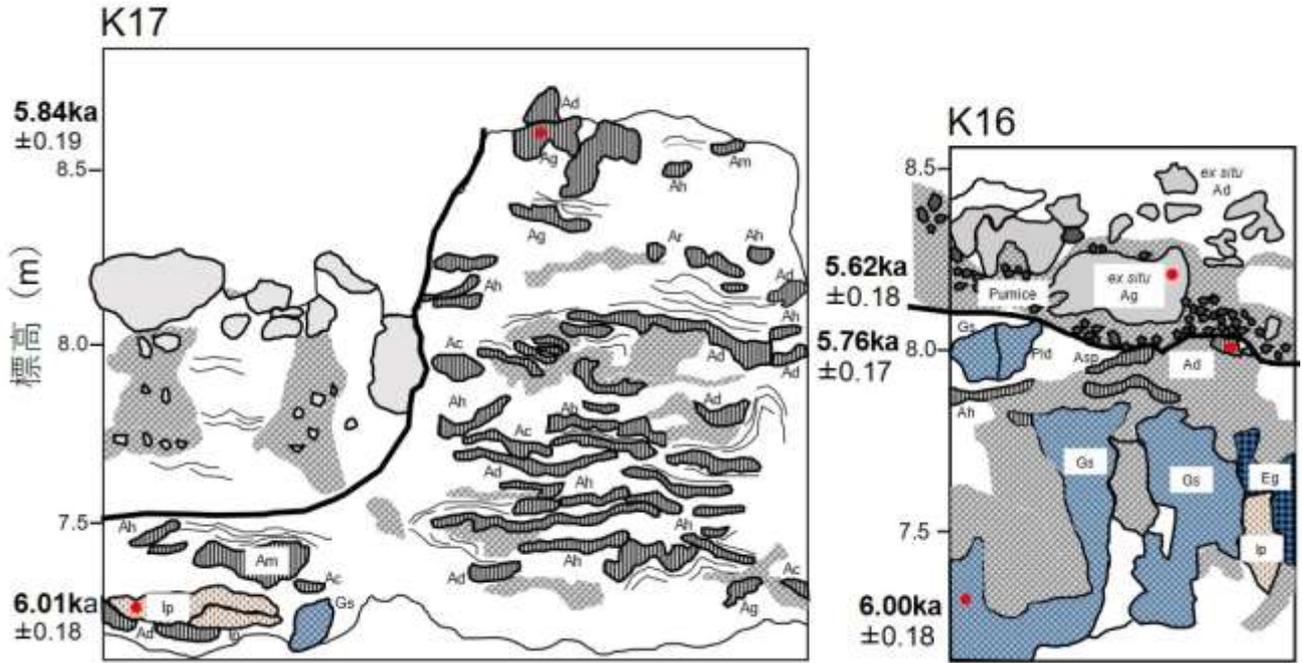


図7 (続き)

### 3-3. 造礁サンゴ化石の $^{14}\text{C}$ 年代

I面の垂直露頭と掘削コアから得られた造礁サンゴ化石15群体(計16個)の $^{14}\text{C}$ 年代測定結果と、それらを暦年較正した結果を表2に示す。同一試料について燃焼とリン酸融解の異なる方法で $\text{CO}_2$ 化したK4-3試料について、得られた年代を比較すると誤差範囲でよく一致している。この結果から、化石骨格中に残存する有機物が誤差範囲を越えて年代に影響を与えないと考え、本研究では燃焼による $\text{CO}_2$ 化で得られた年代に基づき考察を行う。

得られた暦年較正 $^{14}\text{C}$ 年代は、下記の通り誤差を考慮すると全て層序と整合的である。これ以降、本文および図中には、暦年較正年代の $2\sigma$ 範囲(例:5,700–5,500 cal BP)を中央の値 $\pm$ 年代幅の半分(例:5,600 $\pm$ 100 cal BP)の形に直し、年代の単位をkaに統一して記す。

A地点の垂直露頭で得られた最も古い年代値は露頭下部(標高約6.5m)の現地性*Goniastrea pectinata*の約7.0kaで、最も新しい年代値は露頭上部(標高約9.2m)の現地性*Acropora hyacinthus*の約6.4kaだった(図5)。次にA地点の掘削コアでは、コア最下部(標高約5.2m)の現地性*Leptoria phrygia*とコア最上部(標高約9.6m)の現地性*Pocillopora verrucosa*がそれぞれ約7.5kaと約6.7kaだった。次にC地点の垂直露頭では、最下部(標高約6.5m)の現地性*Isopora palifera*(約6.0ka)が最も古く、上部(標高約8.0m)の現地性*Acropora digitifera*とさらにその上部の異地性*A. gemmifera*が下部より新しい約5.8kaと約5.6kaであった(図7)。またB地点の垂直露頭では、下部(標高8.1m)の現地性*A. gemmifera*から約6.1ka、上部(標高約9.4m)の現地性*A. gemmifera*から6.0kaの年代値が得られている。

表2 I面から採取した現地性・異地性造礁サンゴ化石の<sup>14</sup>C年代測定結果

試料 No.	ラボ No.	種名	標高	$\delta^{13}\text{C}$	Conventional <sup>14</sup> C age	Calibrated entional <sup>14</sup> C age (cal BP)	
			(m)	(‰)	(BP)	1 $\sigma$ range	2 $\sigma$ range
K4-2	YU- 18793	<i>Acropora digitifera</i>	7.3	-0.11 ± 0.11	6252 ± 25	6794 – 6609	6886 – 6512
K4-3A* <sup>1</sup>	YU- 18794	<i>Platygyra sinensis</i>	6.5	-2.41 ± 0.13	6468 ± 25	7051 – 6851	7147 – 6773
K4-3B* <sup>1</sup>	YU- 18804			-0.73 ± 0.14	6439 ± 25	7008 – 6812	7122 – 6735
K10-1	YU- 18795	<i>Goniastrea minuta</i>	9.8	-0.81 ± 0.13	6255 ± 25	6797 – 6613	6890 – 6515
K12-1	YU- 18796	<i>Acropora hyacinthus</i>	9.2	-1.18 ± 0.13	5958 ± 24	6450 – 6289	6549 – 6211
K13-1	YU- 18797	<i>Favites abdita</i>	6.8	-0.80 ± 0.12	6222 ± 25	6758 – 6571	6853 – 6480
K13-4	YU- 18798	<i>Acropora digitifera</i>	7.3	-3.56 ± 0.62	6188 ± 26	6722 – 6537	6809 – 6438
K16-1	YU- 18799	<i>Goniastrea stelligera</i>	7.3	-1.96 ± 0.14	5585 ± 24	6078 – 5899	6178 – 5812
K16-2	YU- 18800	<i>Acropora digitifera</i>	8.0	-0.80 ± 0.17	5403 ± 23	5877 – 5702	5930 – 5595
K16-5	YU- 18801	<i>Acropora gemmifera</i>	8.2	0.25 ± 0.71	5245 ± 25	5704 – 5532	5797 – 5441
K17-1	YU- 18802	<i>Isopora palifera</i>	7.3	-1.58 ± 0.15	5600 ± 24	6093 – 5914	6189 – 5835
K17-6	YU- 18803	<i>Acropora gemmifera</i>	8.6	2.12 ± 0.18	5473 ± 24	5932 – 5755	6028 – 5657
KR-1- 150	YU- 19007	<i>Acropora robusta</i>	8.3	-1.46 ± 0.27	6382 ± 25	6940 – 6755	7037 – 6659
KR-1- 190	YU- 19008	<i>Acropora digitifera</i>	7.9	-1.11 ± 0.27	6328 ± 24	6880 – 6696	6976 – 6611
KR-1- 327	YU- 19009	<i>Acropora hyacinthus</i>	6.5	-1.72 ± 0.27	6734 ± 25	7316 – 7159	7406 – 7074
KR-1- 335	YU- 19010	<i>Acropora monticulosa</i>	6.4	0.16 ± 0.30	6704 ± 25	7301 – 7139	7373 – 7023

\*1 K4-3A と K4-3B は同化石群体から得られた試料で、異なる前処理方法で分析した(詳細は本文参照)

#### 4. 考察

従来の研究（太田ほか, 1978; 中田ほか, 1978; 佐々木ほか, 1998）では、I面は海岸近くの更新世石灰岩に刻まれた離水ノッチや波蝕台、未固結の砂礫の堆積面、南西部の中里のみで認められていたサンゴ石灰岩からなる平坦面によってその存在が推定されていた（表 3）。その後、Sugihara et al. (2003) によって北東部の志戸桶、南東部の花良治（浦原）や先山で、I面形成時のものと考えられるサンゴ石灰岩の小露頭が記録されたものの、明瞭な段丘面は見つかっていなかった、しかし本研究によって、サンゴ石灰岩（Coral-Algal framestone～bindstone）からなる標高約 10 m・幅約 30 m の明瞭な平坦面が南東部の花良治で約 450 m にわたり連続的に分布することが明らかになった。よってI面形成時には、島の南西部だけでなく南東部でもその沿岸に明瞭なサンゴ礁地形が発達していたと考えられる。また、I面サンゴ石灰岩表面（水平露頭・垂直露頭）とその内部（掘削コア）で認められた現地性造礁サンゴ化石群集は、琉球列島のサンゴ礁斜面浅海部（水深 5m 以浅）を特徴づける現生造礁サンゴ群集（Nakamori, 1986; Sugihara et al., 2003）に対比することができた。さらに、これらの現地性造礁サンゴ化石の暦年較正  $^{14}\text{C}$  年代から、I面下部は 7.5～6.8 ka、上部は 6.9～6.4 ka、前縁部は 6.0～5.8 ka に形成されたことが明らかになった。

Sugihara et al. (2003) は、喜界島と石垣島の現世造礁サンゴ群集の定量分布調査結果をもとに、太枝状の *Pocillopora verrucosa* が現在のサンゴ礁斜面の水深 1.5m 付近で卓越することを明らかにしている。今回の調査地点では、I面 A 地点の平坦面上（標高 9.6m）で本種化石の被度が高く、この結果は、I面 B 地点の露頭最上部（標高 9.6～9.3m）での過去の調査結果（Sugihara et al., 2003）と非常に調和的である（表 3）。また、これらの *P. verrucosa* の分布標高と本種を含む造礁サンゴ化石の暦年較正  $^{14}\text{C}$  年代から、6.7～6.0ka の I面形成時の相対的海水準は 11.3～10.5m であったと推定される。さらに、I面 C 地点の標高 8.0m で採集された現地性 *Acropora digitifera* 化石からは 5.8ka の暦年較正  $^{14}\text{C}$  年代が得られており、この年代は現地性造礁サンゴ化石から得られた中で最も新しい年代である。また、花良治の西方に位置する先山の I面相当露頭（標高 8.4～6.0m）最下部と最上部では、現地性造礁サンゴ化石の暦年較正  $^{14}\text{C}$  年代は 7.9～7.5ka で、露頭最上位（標高 8.4m）の最も新しい年代（7.5ka）は現地性 *A. digitifera* 化石から得られている（Sugihara et al., 2003）。*A. digitifera* は、現在の琉球列島のサンゴ礁斜面の水深 3m 以浅で卓越する種である（村上ほか, 2023）ことから、7.5ka での相対的海水準は最大 11.4m、5.8ka での同海水準は約 11m だったと推定できる。以上の結果をまとめると、喜界島では少なくとも 7.5ka には相対的海水準が 11m 前後に到達し

ており、その後 5.8ka までは海水準が同標高でほぼ安定していたと考えられる。

I 面前縁部にあたる C 地点の標高 9.2~7.1m では、異地性の造礁サンゴ化石、陸源の石灰岩・泥岩の亜角~亜円礫を含む未固結~半固結堆積物 (Coral rudstone~floatstone) が見られ、特に標高 8.5~8.1 m 付近にはよく淘汰された軽石の層が認められた。この層に含まれる軽石の大きさ、円磨度や層厚などの特徴は、2021 年 8 月の福德岡ノ場での海底火山の噴火後、同年 10 月に琉球列島沿岸 (喜界島を含む) に供給された大量の軽石の大きさや円磨度、堆積場や層厚 (宇佐美・新城, 2022; 成尾ほか, 2023) とよく類似する。このことは、標高 9.2~7.1m に見られる堆積物がビーチ堆積物であり、軽石層が含まれることから潮上帯で形成されたことを示唆する。また、この軽石層と共産し、摩滅があまり進んでいない準異地性造礁サンゴ化石の暦年校正  $^{14}\text{C}$  年代から、5.6ka には、標高 7.3m またはそれより低いところに相対的海水準があったことが推定できる (表 3)。

花良治の II~IV 面に関しては、各段丘上の造礁サンゴ化石の  $^{14}\text{C}$  年代測定を行っていないが、II 面と III 面では標高 5m と 3.4m でそれぞれ現地性 *Pocillopora verrucosa* 化石が卓越していることを確認することができた。これらの結果から、II 面および III 面形成時の相対的海水準は約 6.5m と約 4.9m と推定される (図 8)。一方、同地点の IV 面では現地性 *P. verrucosa* 化石は認められなかったが、同面の最上位 (標高 2.1m) に現地性 *Acropora digitifera* 化石が見られることから、IV 面形成時の相対的海水準は少なくとも標高 2.8m より高いところにあったと推定される。

7.5ka~5.8ka の相対的海水準が標高約 11m、5.6ka の同海水準が約 7.3m だったとすると、5.8~5.6ka に約 3~4m の相対的な海面低下が起きたこととなる (図 8)。また、I 面 A~C 地点の露頭直上には、琉球層群の巨大な岩塊が乗っている。また、同時代に形成されたと考えられる島の北東部の志戸桶の垂直露頭 (Sugihara et al., 2003) の直上にも、同様の岩塊が乗っている。さらに同様の岩塊は、島内の II~IV 面上では全く見られない。これらの特徴を踏まえると、5.8~5.6ka の相対的海面低下は地震隆起によって引き起こされ、その際に内陸側の標高が高いところからこれらの岩塊が崩落してきた可能性が高い。同様に、同時代のビーチ堆積物中に含まれていた琉球層群・島尻層群由来の石灰岩・泥岩の礫も、前述の岩塊とともに当時の海岸~礁斜面浅海部に供給された可能性がある。

表3 I面およびII面のサンゴ石灰岩、造礁サンゴ化石、ビーチ堆積物、離水ノッチや離水波食台の地点別標高(m)と造礁サンゴ化石の年代[ (ka)]および推定される I~II 面形成時の相対的海水準(m)と年代[ (ka)]

南東部	調査地点	花良治 (A)	花良治 (B)	花良治 (C)	先山
	サンゴ石灰岩の標高と[年代]	9.8-6.0 [6.7-5.8] *5	9.6-8.0 [6.1-6.0] *4	8.7-7.0 [6.0-5.8] *5	8.4-6.0 [7.9-7.5] *4
	<i>Pocillopora verrucosa</i> の卓越標高と[年代]	9.6 [6.7] *4	9.6-9.3 *4		
	軽石を含むビーチ堆積物の標高と[年代]			8.5-8.1 [5.6] *5	
	I 面形成時の相対的海水準と[年代]	<b>11.3-10.5</b> [6.7-5.8] *5	<b>10.8-11.1</b> [6.1-6.0] *4	<b>&gt;9.4</b> [6.0-5.8] *5	<b>&gt;9.1</b> [7.9-7.5] *4
	II 面形成時の相対的海水準と[年代]			<b>&lt;7.3</b> [5.6] *5	

西部～北西部	調査地点	荒木	中里	坂嶺	先内
	サンゴ石灰岩の標高と[年代]	8.5 [7.1] *2	9.0-5.3 [6.9-6.4] *1,2		
	離水ノッチの標高	12.9-12.0, 9.0, 6.0 *2		11.0 *2	11.1 *2
	波食台/II 面内縁高度	>10.2, 8.0, 7.0-6.0 *2	6.0 *1	6.0 *2	
	I 面形成時の相対的海水準と[年代]	<b>12.9-12.0 [7.1],</b> <b>9 *2</b>	<b>&gt;9.0</b> [6.9-6.4] *1,2	<b>11.0-8.4 *2</b>	<b>&lt;11.1 *2</b>
	II 面形成時の相対的海水準と[年代]	<b>7.0-6.0 *2</b>	<b>&gt;6.0 *2</b>	<b>&gt;6.0 *2</b>	

東部～北東部	調査地点	志戸桶北	志戸桶	佐手久	嘉鈍
	サンゴ石灰岩の標高と[年代]		7.4-5.5 [7.0-6.7] *4		
	<i>Pocillopora verrucosa</i> の卓越標高と[年代]		7.4-7.0 *4		
	ビーチ堆積物の標高と[年代]			9.1～8.4 [6.9-6.7] *4	
	離水ノッチの標高			9.1～8.4 *4	
	波食台/II 面内縁高度	6.5 *3			6.7 *2
	I 面形成時の相対的海水準と[年代]		<b>8.9～8.5</b> [7.0-6.7] *4	<b>9.1～8.4</b> [6.9-6.7] *4	
	II 面形成時の相対的海水準と[年代]	<b>6.5 *3</b>			<b>6.7 *2</b>

\*1 三位・木越, 1966, \*2 太田ほか, 1978, \*3 佐々木ほか, 1998, \*4 Sugihara et al., 2003, \*5 本研究

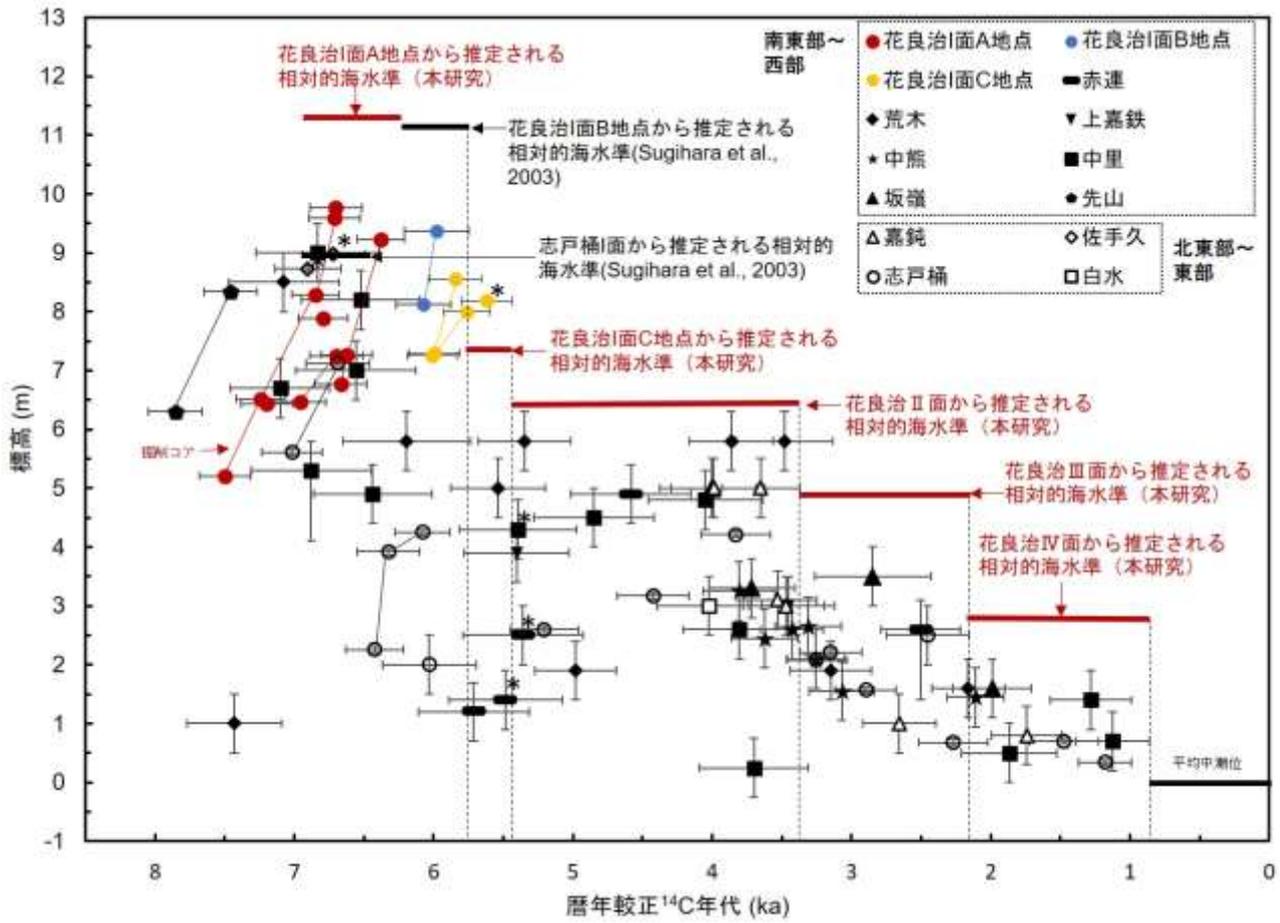


図 8 喜界島の完新世サンゴ礁段丘から得られた造礁サンゴ化石の標高と暦年較正  $^{14}\text{C}$  年代、現地性 *Pocillopora verrucosa*・*Acropora digitifera* 化石の卓越する標高から推定される I～IV 面形成時の相対的海水準の関係

次に、本調査結果と従来の調査結果（三位・木越, 1966; 太田ほか, 1978; 佐々木ほか, 1998; Sugihara et al., 2003）をもとに、島内におけるサンゴ石灰岩、造礁サンゴ化石、ビーチ堆積物、離水ノッチや離水波食台の標高と造礁サンゴ化石の暦年較正  $^{14}\text{C}$  年代から推定される I 面形成時の相対的海水準を比較すると、本研究の調査地点を含む南東部（荒木を除く）や西部では標高 11m 前後であるのに対し、北東部（志戸桶・佐手久）では標高 9m 前後で 2m ほど低いことがわかる（表 3）。一方、II 面形成時の相対的海水準は、どの地域でもほぼ同じ結果になっている。このことは、5.8～5.6ka の地震隆起の際、北東部とそれ以外の場所で隆起量 2m が異なっていたことを示唆している。この隆起量の差を生んだ要因の一つとして、両地域の境界に相当するトビヨ崎断層の動きが考えられる。この断層は、島の最北端のトビヨ崎から南南西に延びる活断層で（図 1b）、この断層が最北端の完新世サンゴ礁段丘の標高を変位させている可能性が指摘されている（活断層研究会, 1980）。よって 5.6～5.6ka に起き

た地震では、この断層およびその延長部の西側では隆起量が大きく、東側では隆起量が小さかった可能性がある。実際に喜界島は、フィリピン海プレートとその表面の奄美海台の沈み込みに伴う島の傾動が示唆されている（大村・太田, 1992 など）。したがって、本研究で見えてきた局所的な隆起量の違いは、今後この傾動を明らかにしていくうえで非常に重要な証拠になることが期待される。

Sugihara et al. (2003) は、北東部の志戸桶・佐手久と南東部の花良治（論文中では浦原と記述）に分布するサンゴ石灰岩露頭最上部の標高、岩相、含まれる現地性・異地性造礁サンゴ化石の種構成とそれらの暦年較正  $^{14}\text{C}$  年代の違いをもとに、I 面が北東部の標高が低く形成年代の古い段丘と南東部の標高が高く形成年代の新しい段丘の二つに細分でき、後者の段丘形成には約 7~6ka に起きた約 2m のユースタティックな海面上昇が関係していることを示唆した。しかし本研究結果は、7.5~5.8ka には海水準が安定しており、北東部と南東部の I 面の形成年代がほぼ同じで、両者の標高の違いが 5.8~5.6ka に起きた地震の際の局所的な隆起量の違いによって生じた可能性を強く示唆している。

## 5. まとめ

1. 喜界島南東部花良治で、従来の研究では認識されていなかった明瞭な I 面地形（標高約 10m・幅約 30m）が農道沿いの約 450m の範囲にわたって分布することを発見した。
2. 花良治の I 面は、主に現地性造礁サンゴ化石を多く含むサンゴ石灰岩で構成されており、水平・垂直露頭および掘削コア内で記録された造礁サンゴ化石群集の種構成と優占種から、この段丘はサンゴ礁斜面の水深 5m 以浅で形成されたと考えられる。
3. I 面から得られた現地性造礁サンゴ化石の暦年較正  $^{14}\text{C}$  年代は、花良治の I 面が下部（7.5~6.8 ka）⇒上部（6.9~6.4 ka）⇒前縁部（6.0~5.8 ka）の順で形成されたことを示す。
4. 太枝状の成長形をもつ *Pocillopora verrucosa* 化石と指状~卓状の *Acropora digitifera* 化石の各段丘上で卓越する標高から、花良治とその周辺での I 面形成時（7.9~5.8ka）の相対的海水準は標高約 11m で安定しており、この期間にユースタティックな海面上昇はなかったと考えられる。
5. I 面前縁部で認められた軽石を含むビーチ堆積物は、5.8~5.6ka の相対的海水準が標高 7.3m より低いところにあったこと、この時期に 3.5m の相対的海水準の低下を引き起こした地震隆起があったことを示唆する。

6. サンゴ石灰岩、造礁サンゴ化石、ビーチ堆積物、離水ノッチや離水波食台の標高と造礁サンゴ化石の年代から推定される I 面形成時の相対的海水準を島内で比較すると、北東部と南東部～西部で約 2m の隆起量の差が認められた。このことは、5.8～5.6ka の地震隆起時、トビヨ崎断層を境にして島内で隆起量が異なっていた可能性を示唆する。

## 引用文献

- Bronk Ramsey C. (2009) Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51(1), 337–360.
- Chappell J., Polach H. A. (1976) Holocene sea-level change and coral-reef growth at Huon Peninsula, Papua New Guinea. *Geological Society of America Bulletin*, 87, 235–240.
- Chappell J., Polach H. (1991) Post-glacial sea-level rise from a coral record at Huon Peninsula, Papua New Guinea. *Nature*, 349 (10), 147–149.
- Chappell J., Ota Y., Berryman K. (1996) Late Quaternary coseismic uplift history of Huon Peninsula, Papua New Guinea. *Quaternary Science Reviews*, 15, 7–22.
- Dunham R. J. (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *In* Ham W. E. ed: *Classification of carbonate Rocks*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Mem. 1, 108–121.
- Embry A. F., Klovan J. E. (1971) A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 19 (4), 730–781.
- 活断層研究会 (1980) 日本の活断層—分布図と資料—。東京大学出版会, 東京, 325 pp.
- Heaton T. J., Köhler P., Butzin M., Bard E., Reimer R. W., Austin W. E. N., Ramsey C. B., Grootes P. M., Hughen K. A., Kromer B., Reimer P. J., Adkins J., Burke A., Cook M. S., Olsen J., Skinner L. C. (2020) Marine20—The marine radiocarbon age calibration curve (0–55,000 cal BP). *Radiocarbon*, 62 (4), 779–820.
- Hirabayashi S., Yokoyama Y., Suzuki A., Miyairi Y., Aze T. (2017) Short-term fluctuations in regional radiocarbon reservoir age recorded in coral skeletons from the Ryukyu Islands in the north-western Pacific. *Journal of Quaternary Science*, 32 (1), 1–6.
- 平林頌子・横山裕典 (2020) 完新統/完新世の細分と気候変動. *第四紀研究*, 59 (6), 129–157.
- Inagaki, M., Omura, A. (2006) Uranium-series Age of the Highest Marine Terrace of the Upper Pleistocene on Kikai Island, Central Ryukyus, Japan. *The Quaternary Research*, 45, 41–48.
- Konishi K., Omura A., Nakamichi O. (1974) Radiometric coral ages and sea level records from the late Quaternary reef complexes of the Ryukyu Islands. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Coral Reef Symposium 2*, Great Barrier Reef Committee, Brisbane, 595–613.
- 小西健二・辻喜弘・後藤十誌朗・田中武雄・二口克人 (1983) サンゴ礁の多孔浅層掘削—喜界島における完新統の例—. *月刊 海洋科学*, 15 (3), 154–164.
- 三井秀夫・木越邦彦 (1966) 奄美群島喜界島の旧汀線堆積物と海岸砂丘との <sup>14</sup>C 年代—日本の第四紀層の <sup>14</sup>C 年代 XXVIII—. *地球科学*, 82, 43–45.
- 村上智一・小林雄生・伊藤芳英・下川信也・杉原薫・山田吉彦 (2023) 種同定に基づく 2022 年西表島網取湾の礁斜面 40m までのサンゴ被度および白化評価. *土木学会論文集特集号 (海洋開発)*, 79 (18), 8pp.

- 中田高・高橋達郎・木庭元晴 (1978) 琉球列島の完新世離水サンゴ礁地形と海水準変動. 地理学評論, 51, 87–108.
- Nakamori T. (1986) Community structures of recent and Pleistocene hermatypic corals in the Ryukyu Islands, Japan. *Sci. Rep. Tohoku Univ., 2<sup>nd</sup> Ser. (Geol.)*, 56, 71–133.
- 中森亨・松田伸也・大村明雄・太田陽子 (1995) 造礁サンゴ群集に基づくパプアニューギニア, ヒュオン半島の更新世石灰岩の堆積環境. 地学雑誌, 104 (5), 725–742.
- 成尾英二・木尾竜也・若松齊昭 (2023) 鹿児島県における 2021 年福徳岡ノ場軽石の漂着状況. 鹿児島県立博物館研究報告, 42, 75–84.
- 西平守孝・Veron, J. E. N. (1995) 日本の造礁サンゴ類. 海游舎, 東京, 439pp.
- 西平守孝 (2020) 有藻性サンゴ類 属の同定練習帳 (第 2 版). 沖縄美ら島財団, 名護, 140pp.
- 及川輝樹・石塚治・鈴木克明・草野有紀・岩橋くるみ・池上郁彦・Christopher Conway・山崎誠子・東宮昭彦 (2022) 福徳岡ノ場火山 2021 年噴火と軽石の漂流. *GSI 地質ニュース*, 11 (3), 65–72.
- Omoto K., Nakata T., Koba M. (1976) Tohoku University Radiocarbon Measurements IV. *Sci. Rep. Tohoku Univ., 7<sup>th</sup> Ser.*, 26, 299–310.
- Omoto K. (1977) Tohoku University Radiocarbon Measurements V. *Sci. Rep. Tohoku Univ., 7<sup>th</sup> Ser.*, 27, 63–68.
- 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, 313–327.
- Ota Y., Chappell J., Kelley R., Yonekura N., Matsumoto E., Nishimura T., Head J. (1993) Holocene coral reef terraces and coseismic uplift of Huon Peninsula, Papua New Guinea. *Quaternary Research*, 40, 177–188.
- 太田陽子・町田洋・堀信行・小西健二・大村明雄 (1978) 琉球列島喜界島の完新世段丘 完新世海面変化研究へのアプローチ. 地理学評論, 51, 109–130.
- 太田陽子・佐々木圭一・大村明雄・野沢香代 (2000) 喜界島東岸, 志戸桶付近の完新世サンゴ礁段丘の形成と離水過程—ボーリング資料に基づく再検討. 第四紀研究, 39 (1), 81–95.
- Pandofi J. M. (1996) Limited membership in Pleistocene reef coral assemblages from the Huon Peninsula, Papua New Guinea: constancy during global change. *Paleobiology*, 22 (2), 152–176.
- Bronk Ramsey C. (2009) Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon*, 51(1), 337–360.
- 佐々木圭一・大村明雄・太田陽子・村瀬隆・吾妻崇・小林真弓・伊倉久美子 (1998) 南西諸島喜界島の志戸桶における完新世海退性サンゴ礁段丘の形成過程. 第四紀研究, 37, 349–360.
- 佐々木圭一 (2016) 喜界島のサンゴ礁段丘 1998 年以降の成果と今後の課題. 月刊海洋/号外, 1–7.
- 佐々木圭一 (2022) 喜界島の完新世サンゴ礁段丘: 2 つの成因と古地形変遷. 月刊海洋, 54, 460–467.
- Shikakura Y. (2014) Marine terraces caused by fast steady uplift and small coseismic uplift and the time-predictable model: Case of Kikai Island, Ryukyu Islands, Japan. *Earth and Planetary Science Letters*, 404, 232–237.
- Sugihara K., Nakamori T., Iryu Y., Sasaki K., Blanchon P. (2003) Holocene sea-level change and tectonic uplift deduced from raised reef terraces, Kikai-jima, Ryukyu Islands, Japan. *Sedimentary Geology*, 159, 5–25.
- 杉原薫・野村恵一・横地洋之・下地和幸・梶原健次・鈴木豪・座安佑奈・出羽尚子・深見裕伸・北見裕子・松本尚・目崎拓真・永田俊輔・立川浩之・木村匡 (2015) 日本の有藻性イシサンゴ類～種子島編～. 国立環境研究所生物・生態系環境研究センター, つくば, 198pp.
- 宇佐美賢・新城竜一 (2022) 福徳岡ノ場 2021 年 8 月噴火による沖縄県における漂着軽石の記録. 沖縄県

立博物館・美術館，博物館紀要，15，1–16.

Webster J. M., Davis P. J., Konishi K. (1998) Model of fringing reef development in response to progressive sea level fall over the last 7000 years – (Kikai-jima, Ryukyu Islands, Japan). *Coral Reefs*, 17, 289–308.

WoRMs World Register of Marine Species (2024): <https://www.marinespecies.org> (閲覧 2024/01/29)