

更新世隆起サンゴ礁に記録された礁の

成長と第四紀後期の気候変動

課題番号 08304031

平成8年度～平成9年度科学研究費補助金（基盤研究(B)(1)）研究成果報告書

平成10年3月31日

研究代表者 中森 亨  
(東北大学大学院理学研究科)

平成8, 9年度科学研究費補助金 (基盤研究(B)(1))

研究成果報告書

は し が き

課題番号

08304031

研究課題

更新世隆起サンゴ礁に記録された礁の成長と第四紀後期の  
気候変動

研究組織

研究代表者：中森 亨 (東北大学大学院理学研究科助教授)

研究分担者：太田陽子 (専修大学文学部教授)

研究分担者：大村明雄 (金沢大学理学部教授)

研究分担者：松田伸也 (琉球大学教育学部助教授)

研究分担者：井龍康文 (東北大学大学院理学研究科)

研究経費

平成8年度	2,800	千円
平成9年度	2,200	千円
計	5,000	千円

研究発表

(1)学会誌等

蛭沼紀江・中森 亨, シャコガイに記録された環境変動の解析,  
月刊地球, vol.17, 1995年6月25日

中森 亨, サンゴ・シャコガイ骨格による古環境の解析,  
地質ニュース, 印刷中

(2)口頭発表

蛭沼紀江・山田 努・中森 亨, シャコガイ骨格と海水の同位体組成,  
第13回炭酸塩コロキウム, 1997年2月

中森 亨・木山 修・山田 努, 造礁サンゴPoritesに記録された完新世  
初期の酸素・炭素同位体比, 日本第四紀学会ミニシンポジウム,  
1998年2月14日

東北大学図書



00010134205

附属図書館

## 研究成果

平成8, 9年度の科学研究費補助金の交付を受け, 平成8年9月に鹿児島県大島郡喜界島北部の志戸桶付近の隆起サンゴ礁で野外調査を行い, 平成9年9月にハンドボーリング装置を用いてサンゴ礁堆積物と分析用化石サンゴ試料を掘削した. その際に志戸桶沖の現成サンゴ礁でスキューバを用いて造礁サンゴと海水を採取した. また, 共同研究者の太田および大村が平成8年度に隆起サンゴ礁で掘削したコア試料のサンゴ化石の酸素・炭素同位体比を測定し, 完新世初期の海水温を復元した. ここにその成果を報告する.

### 研究調査項目

1. 完新世サンゴ礁堆積物と化石試料の掘削
2. コア試料の岩相記載 (同報告書, 井龍康文担当ページ参照)
3. 化石サンゴ群集の記載
4. 化石サンゴモ群落の記載 (同報告書, 松田伸也担当ページ参照)
5. 現生サンゴと海水の採取
6. 酸素・炭素同位体比の測定と古水温の推定

#### 1. 完新世サンゴ礁堆積物と化石試料の掘削

1997年9月25日から30日にかけて鹿児島県大島郡喜界島北部の志戸桶付近の隆起サンゴ礁でジオアクト社製のハンドボーリング装置KT-2・S型を用いて, T-1~6の6本のコア試料を掘削した (写真1, 2). 掘削位置はおもに杉原(1996MS)の1-E1を基点とする測線Shi-E上であり, 太田他(1998)のボーリング地点1, 3, 4が位置する測線とほぼ一致する (図1). これらの中でT-4はII面の礁斜面縁脚上で, T-2とT-3はIII面の礁斜面縁脚上で, T-1とT-6はIV面の礁斜面縁脚上で, T-5はIV面の縁溝上で掘削された (表1). コア径はすべて50mmで, コア長は2.44~3.99mの範囲にある. T-6は化石造礁サンゴ*Porites* sp.の大群体を掘抜いたものであり, 同位体比と化学成分の分析に使用する.

図1. 鹿兒島県大島郡喜界島志戸桶付近のボーリング掘削地点

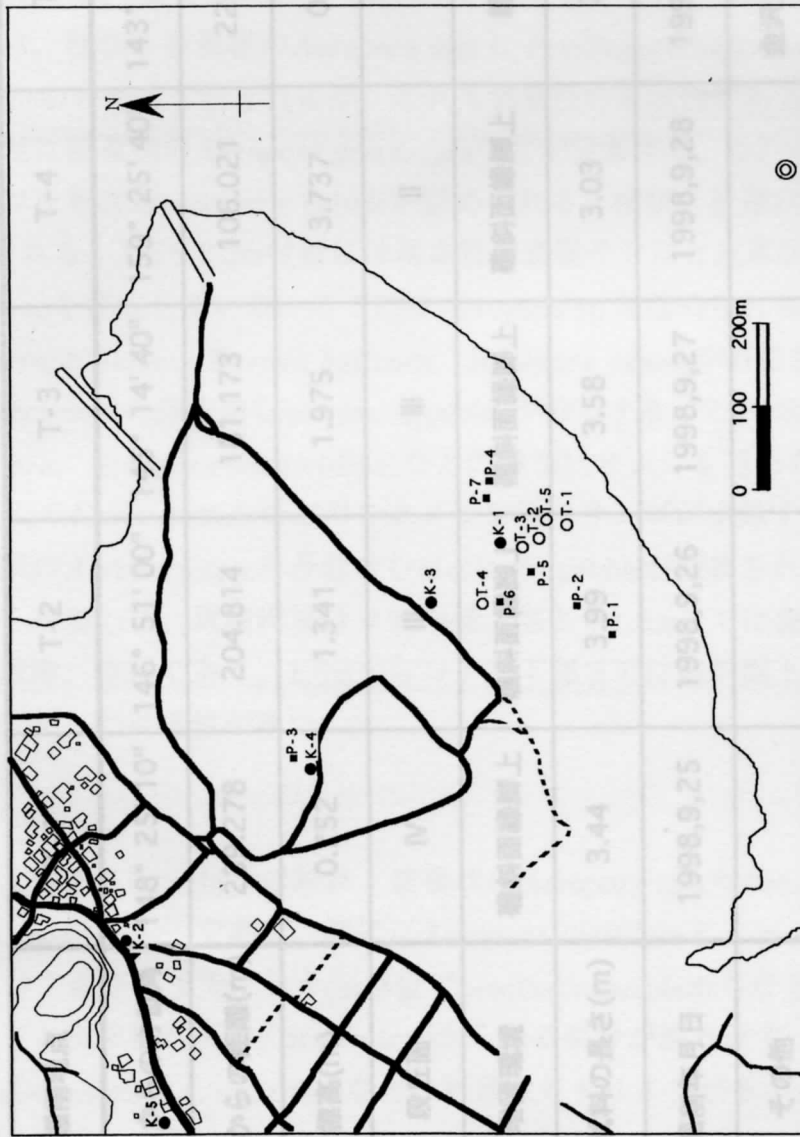


図1. 鹿兒島県大島郡喜界島志戸桶付近の地形図. 黒丸 (●) は太田他によって平成8年に掘削されたコアの位置を, 白丸 (○) はこの研究によって平成9年に掘削されたコアT-1~T-6の位置を, 黒四角 (■) はこの研究によって平成9年に掘削された化石試料の位置を示す. 二重丸 (◎) はスキューバによって現生造礁サンゴと海水を採取した位置を表わす.



表1. 喜界島志戸桶付近のボーリング掘削地点

掘削地点	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6
1-E1からの方位角	148° 25' 10"	146° 51' 00"	145° 14' 40"	159° 25' 40"	143° 59' 20"	172° 36' 50"
1-E1からの距離(m)	239.278	204.814	181.173	106.021	224.869	212.363
標高(m)	0.752	1.341	1.975	3.737	0.635	1.128
段丘面	IV	III	III	II	IV	IV
堆積環境	礁斜面縁脚上	礁斜面縁脚上	礁斜面縁脚上	礁斜面縁脚上	縁溝上	礁斜面縁脚上
コア試料の長さ(m)	3.44	3.99	3.58	3.03	3.50	2.44
掘削年月日	1998,9,25	1998,9,26	1998,9,27	1998,9,28	1998,9,29	1998,9,30
その他					金沢大学所蔵	Porites sp. 同位体比分析用

### 3. 化石サンゴ群集の記載

掘削したコアの中で東北大学に保管しているT-1~T-4, T-6について, そこに含まれる造礁サンゴを同定し, 群集を記載した. 造礁サンゴ群集から推定される堆積環境を考察した(図2~6).

#### (1)T-1 (図2, 写真3)

コアの最上部から0.4mまでは礫状の造礁サンゴ片を含むbioclastic pebbleが分布する. 礫の一部は, 枝状・被覆状の*Acropora* spp.と*Pocillopora damicornis*?である.*Favites pentagona*?の群体も含まれるが, これも異地性の可能性がある. 0.4~0.7mにかけては, 現地性被覆状の*Acropora gemmifera*などが分布する. 0.7~1.6mでは異地性の造礁サンゴ片を含むbioclastic pebbleが認められる. 枝状と被覆状の*Acropora* spp.の礫が含まれる. 1.6~2.2m付近には現地性の造礁サンゴと皮革状石灰藻が認められ, framestoneを形成している. ここには*Acropora* sp.も認められるが, *Cyphastrea microphthalma*, *Favites halicora*, *Millepora exaesa*が特に多い. 2.2~2.4mでは*P. verrucosa*?の礫を含むbioclastic pebbleが分布する. 2.4~3.3mでは*Acropora palifera*, *Acropora monticulosa*?などの被覆状サンゴも認められるが, *Leptoria phrygia*や*Favia pallida*などのキクメイシ科のサンゴが卓越する. 3.3m~コア最下部は枝状の*Acropora* spp.を多数含むbioclastic pebbleが観察される. これらのサンゴ群集から判断して, 堆積環境はコアの最上部より1.6mまでは礁斜面最上部(水深0~5m)の縁溝, 縁脚であり, 1.6mからコア最下部までは礁斜面上部(水深5~10m)の縁脚であった可能性が高い.

#### (2)T-2 (図3, 写真4)

コア試料最上部から0.9m付近は枝状・被覆状の*Acropora* spp.や*Pocillopora* sp.の礫を多数含むbioclastic pebbleである. 特に, *Acropora digitifera*と*A. monticulosa*が多い. 0.9mからコア最下部までは数十cm単位でbioclastic pebbleからなる部分と被覆状の現地性サンゴと皮革状石灰藻のframestoneからなる部分が繰り返す. bioclastic pebbleには*A. gemmifera*や*A. digitifera*などの被覆状ミドリイシが多い. framestoneにはコア最上部より1.0, 1.2, 1.7, 3.8, 3.9mに*Montipora* sp.が, 1.9mに*Porites* sp.が, 1.1mに*A. palifera*が, 3.6mに*A. monticulosa*などの被覆状サンゴが観察された.*Favites halicora*?や*Favia speciosa*などのキクメイシ科のサンゴも認められるが, そ

図2. コア試料T-1の化石産出状況とそこに認められる造礁サンゴの種類



m

# T-2



Acropora sp. branching

Pocillopora sp.

Acropora sp. branching

Acropora digitifera

Acropora digitifera?

Pocillopora damicornis Acropora monticulosa?

Montipora sp. encrusting

Acropora palifera

Acropora gemmifera? Pocillopora sp.

Montipora sp. encrusting Acropora sp. branching

Acropora palifera

Acropora gemmifera?

Favites halicora? Acropora sp. encrusting

Montipora sp. encrusting

Acropora sp. Pocillopora sp.

Porites sp. encrusting

Pocillopora sp.

Favia speciosa

Acropora gemmifera

Acropora digitifera

Acropora sp. encrusting

Acropora sp. encrusting

Acropora sp. encrusting

Acropora sp. encrusting

Acropora sp. encrusting

Acropora monticulosa

Acropora monticulosa

Porites sp. encrusting Montipora sp. encrusting

Acropora palifera

Montipora sp. encrusting

図3. コア試料T-2の化石産出状況とそこに認められる造礁サンゴの属種

の頻度は低い。これらの群集から推定される堆積環境は、コア試料全体を通して礁斜面最上部から上部にかけて（水深0～10m）の縁脚あるいは縁溝部の可能性が高い。

### (3)T-3 (図4, 写真5)

最上部から0.8mまでは*A. digitifera*, *A. gemmifera*, *Acropora hyacinthus*などの被覆状から卓状のミドリイシが卓越する。0.8～2.0mでは厚さ数十cm単位でbioclastic pebbleからなる部分と被覆状の現地性サンゴと皮革状石灰藻のframestoneからなる部分が繰り返す。pebbleには枝状の*Acropora* sp.や*Pocillopora damicornis*が多数含まれる。礫の一部はサンゴモによって覆われる。現地性サンゴとしては被覆状の*Acropora* sp.と*A. digitifera*が卓越する。2.0～2.9m付近では塊状の*Gardineroseris planulata*の大群体が認められる。2.9～3.4mでは再びbioclastic pebbleからなる部分と被覆状の現地性サンゴと皮革状石灰藻のframestoneからなる部分が繰り返す。現地性のサンゴとしては被覆状の*Acropora* sp.と*A. digitifera*が卓越する。3.4m～コア最下部には現地性の塊状*Favia stelligera*が認められる。以上の群集から判断すると、堆積環境はコアの最上部より2.0mまでは礁斜面最上部（水深0～5m）の縁脚であり、2.0mからコア最下部までは礁斜面上部（水深5～10m）の縁脚であった可能性が高い。

### (4)T-4 (図5, 写真6)

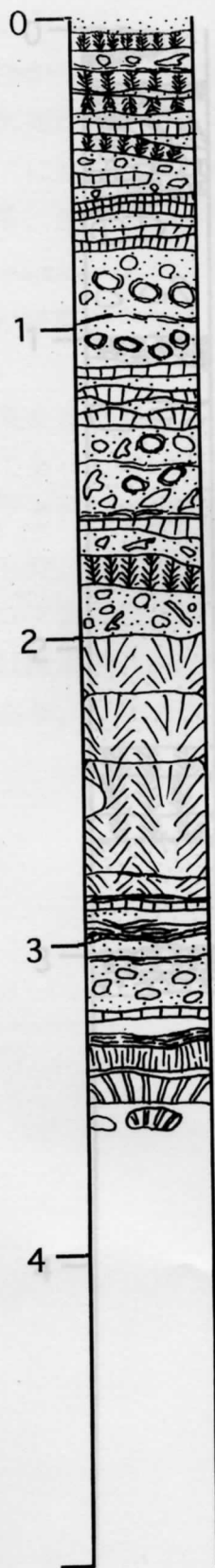
コア試料最上部から0.3mには皮革状石灰藻と*Montipora* sp.などの被覆状のサンゴからなるframestoneが分布する。一部では枝状の*Pocillopora* sp.も認められる。0.3～1.1m近傍では被覆状の*A. digitifera*が多いが、被覆状の*Favites* sp.も観察された。1.2～2.3mでは塊状のbioclastic sandが広く分布する。この最上部に*Pocillopora?* sp.の礫が含まれるが、その他には顕著なサンゴ片は含まれない。2.3～2.7mでは被覆状のミドリイシ*A. monticulosa*の大きな群体が認められる。2.7～3.0mは、再び塊状のbioclastic sandであり、造礁サンゴ片は含まれない。3.0m～コア最下部では皮革状石灰藻と被覆状*Acropora* sp.と*Echinopora gemmacea*が認められた。記録された造礁サンゴの属種より、礁斜面最上部（水深0～5m）の縁脚で堆積した可能性が高い。一方、コアの下部に認められるbioclastic sandは波の影響の少ない礁池や礁斜面深部で堆積した可能性がある。志戸桶沖の現成サンゴ礁でもbioclastic sandは通常縁脚には分布しない。したがって、造礁サンゴと堆積物から推定される堆積環境は矛盾する。

図4. コア試料T-3の化石産出状況とそこに認められる造礁サンゴの属種



m

# T-3

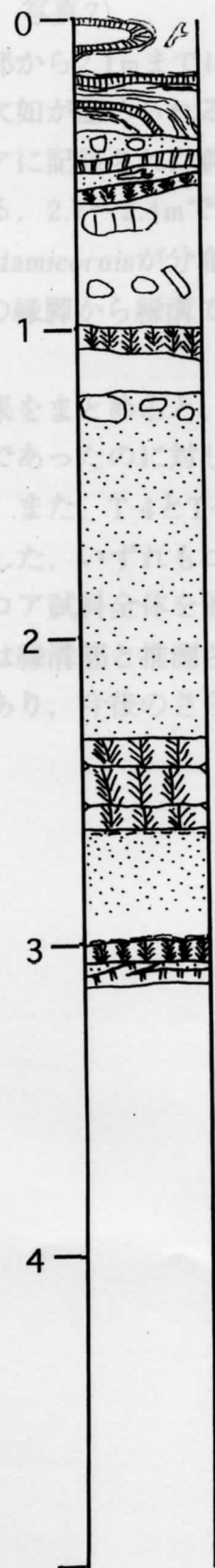


- Acropora digitifera
- Acropora sp. branching
- Acropora digitifera
- Acropora gemmifera
- Acropora digitifera
- Acropora digitifera
- Acropora sp. encrusting
- Acropora hyacinthus
- Acropora hyacinthus
- Acropora digitifera?
- Acropora hyacinthus
- Acropora sp. encrusting?
- algal crusts
- Acropora sp. encrusting
- Acropora sp.
- Acropora sp. branching
- Pocillopora damicornis
- Acropora sp. encrusting
- Acropora sp. encrusting
- Acropora sp. branching
- Acropora digitifera
- Acropora sp. branching
- Gardineroseris planulata
- Acropora masticulosa
- Gardineroseris planulata
- Gardineroseris planulata
- Acropora sp. encrusting
- Acropora? sp.
- Acropora digitifera
- Astreopora sp.
- Acropora sp. encrusting
- Favia stelligera
- Favia stelligera

図4. コア試料T-3の化石産出状況とそこに認められる造礁サンゴの属種

m

# T-4



Pocillopora sp. branching  
 Montipora sp. encrusting  
 algal crusts  
 Goniopora sp.  
 Montipora sp. encrusting  
 Acropora sp.  
 Favites sp.  
 Acropora digitifera?  
 Acropora sp. encrusting

Acropora sp. branching

Acropora sp. branching  
 Acropora sp. encrusting  
 Acropora digitifera

Pocillopora? sp.

Acropora monticulosa

algal crusts  
 Acropora sp. encrusting  
 Echinopora gemmacea

図5. コア試料T-4の化石産出状況とそこに認められる造礁サンゴの属種

(5)T-6 (図6, 写真7)

コア最上部から2.1mまでは塊状の *Porites* sp. の巨大な群体である。0.9mと1.6m付近に骨格の欠如が認められるが、形態の類似性からいずれの部分も同じ群体と推定される。コアに記録された群体の厚さから判断すると、直径は2m以上に達したものと考えられる。2.1~2.4mでは被覆状の *Acropora digitifera* と枝状の *Acropora* sp., *Pocillopora damicornis* が分布する。これらのサンゴ群集は、T-6が礁斜面最上部（水深0~5m）の縁脚から縁溝で堆積したことを示唆する。

以上の結果をまとめると、T-1とT-3ではコア試料下部で礁斜面上部（水深5~10m）の堆積環境であったのに対して、コア試料上部では礁斜面最上部（水深0~5m）が推定された。また、T-4とT-6はコア全体が礁斜面最上部（水深0~5m）で堆積したことが判明した。いずれもコア長が短いことと関連している可能性がある。T-2の堆積環境は、コア試料全体を通して礁斜面最上部から上部にかけて（水深0~10m）の縁脚あるいは縁溝部と推測されているが、これは詳細な環境を特定できなかったことと同義であり、今後のさらなる研究が期待される。

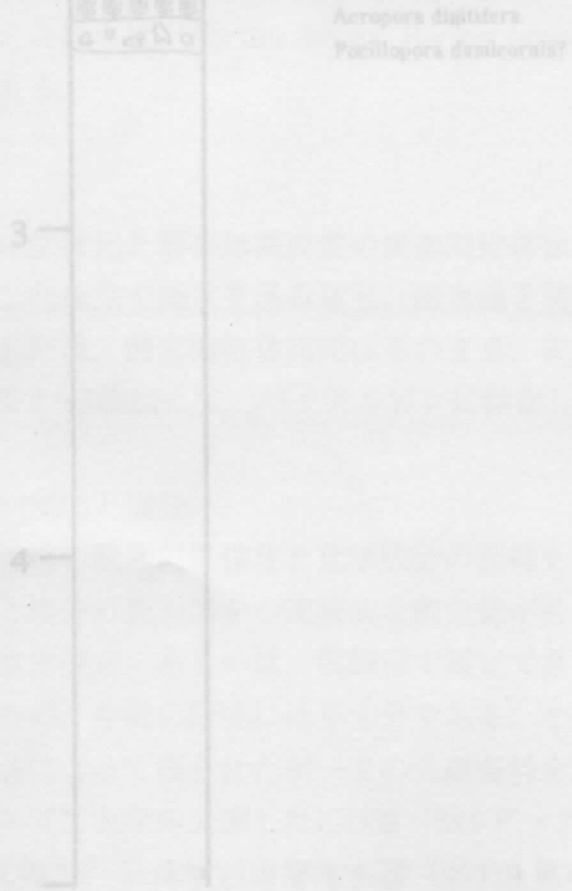
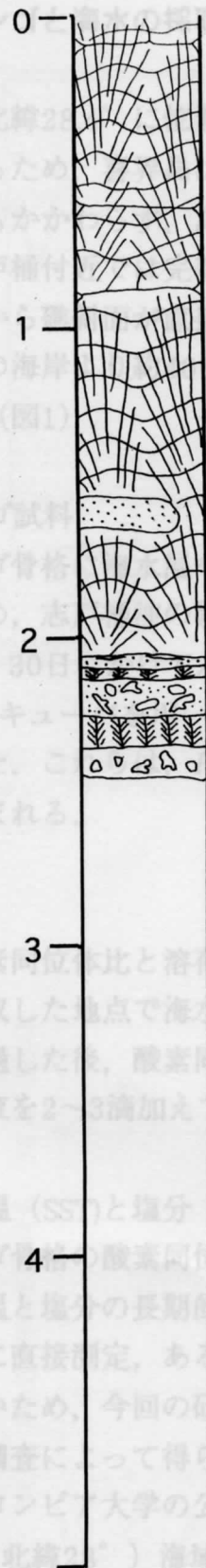


図6. コア試料T-6の化石産出状況とそこに認められる造礁サンゴの属種

m

T-6



Porites sp. massive

Porites sp. massive

Porites sp. massive

Porites sp. massive

Acropora digitifera?  
Acropora sp. branching

Acropora digitifera  
Pocillopora damicornis?

3

4

図6. コア試料T-6の化石産出状況とそこに認められる造礁サンゴの属種

## 5. 現生サンゴと海水の採取

喜界島は北緯 $28.4^{\circ}$ に位置し、亜熱帯に属する。黒潮が奄美大島とトカラ列島の間を北上するため、喜界島は黒潮本流から南側に少し外れる。サンゴ礁の分布の北限に近いにもかかわらず、島の周囲には完新世および現世のサンゴ礁が発達する。島北部の志戸桶付近では完新世サンゴ礁が礁池を持つ裾礁であるのに対して、現生の礁は海岸から礁斜面が直接発達するタイプの裾礁である。ボーリングを行った測線の延長上の海岸より約400m沖に位置するサンゴ礁で、水深10~30mの礁斜面の調査を行った(図1)。

### (1) 現生サンゴ試料

造礁サンゴ骨格に海水温や塩分などの環境がどの程度正確に記録されているかを検討するため、志戸桶沖の礁斜面で現生造礁サンゴ *Porites* spp. を採取した。1997年9月26, 27, 30日にかけて水深10~30mの範囲で5m毎に直径20cm前後の群体を3~5個体ずつスキューバを用いて集めた。また、水深0~5mではシュノーケリングによって採集した。これらは、*Porites lobata*, *Porites lutea*, *Porites australiensis*のいずれかの種に含まれる。

### (2) 海水

海水の酸素同位体比と溶存無機炭素の炭素同位体比を測定するため、造礁サンゴの群体を採取した地点で海水を汲み取り、海水温を測定した。海水はミリポアフィルターで濾過した後、酸素同位体比用はそのまま、炭素同位体比用には飽和塩化第二水銀の溶液を2~3滴加えて、バイアルビンに保存した。

### (3) 表層海水温 (SST) と塩分

造礁サンゴ骨格の酸素同位体比と化学成分の記録を海水温と比較するためには、正確な海水温と塩分の長期的かつ連続的な測定値が必要である。海水温や塩分は試料採集の際に直接測定、あるいは、実験室で測定できるが、年間数回のデータしか集められないため、今回の研究には不十分である。そこで、以下のリモートセンシングと船舶調査によって得られたデータの公開資料を利用した。

海水温：コロンビア大学の公開したIGOSS SSTデータから過去16年間の喜界島周辺(東経 $130^{\circ}$  北緯 $28^{\circ}$ ) 海域の表層海水温 (SST) を集めた(図7)。このデータから

図8. 喜界島周辺海域の塩分の年周変化。日本海洋データセンターの塩分月別平年値より作成。



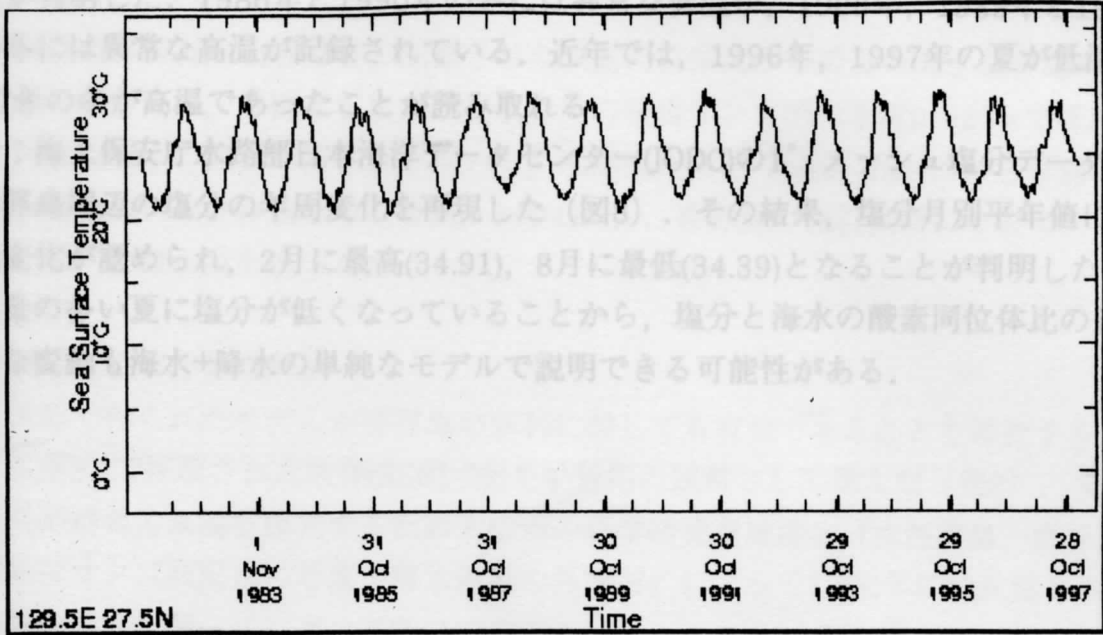


図7. 喜界島近海（東経129.5，北緯27.5）を中心とする海域の表層海水温(SST). コロンビア大学のIGOSS SSTデータに基づき1981から1997年12月までの期間について作成した.

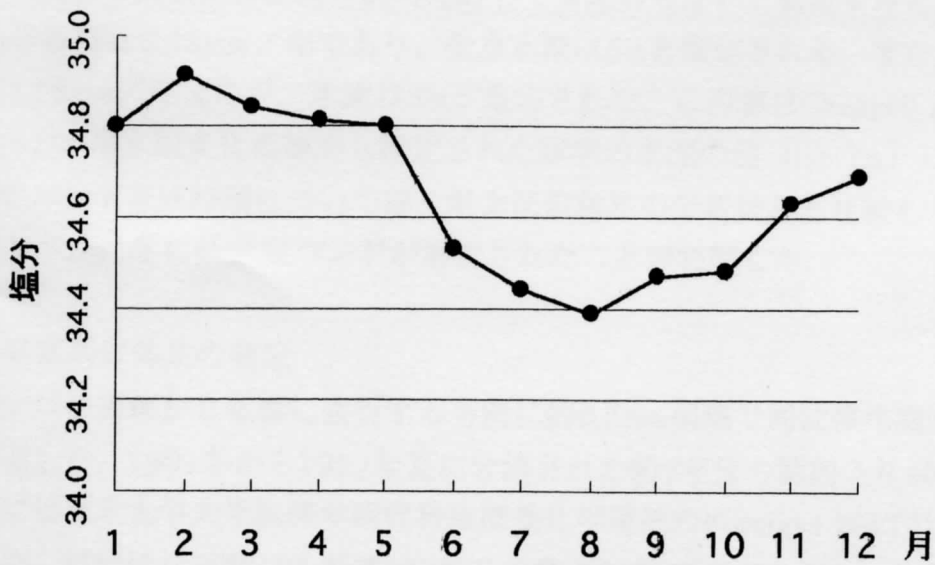


図8. 喜界島周辺海域の塩分の年周変化. 日本海洋データセンターの塩分月別平年値より作成.

喜界島周辺海域の夏期の最高海水温は約29℃で、冬期の最低海水温は約22℃であることが判明した。1986年と1990年の冬には異常な低温が、1988年、1989年と1991年の冬には異常な高温が記録されている。近年では、1996年、1997年の夏が低温で、1997年の冬が高温であったことが読み取れる。

塩分：海上保安庁水路部日本海洋データセンター(JODC)の1°メッシュ塩分データから喜界島周辺の塩分の年周変化を再現した(図8)。その結果、塩分月別平年値には年周変化が認められ、2月に最高(34.91)、8月に最低(34.39)となることが判明した。降水量の多い夏に塩分が低くなっていることから、塩分と海水の酸素同位体比の長期的な変動も海水+降水の単純なモデルで説明できる可能性がある。

石垣島で作られたモデルが喜界島の試料に対しても有効であることを確認するため、水深9mで採取された群体(KS01-09)を解析用の試料として選んだ(表2)。また、完新世初期の古水温を復元するため太田他の科学研究費補助金「南西諸島、喜界島の完新世サンゴ礁段丘の形成・隆起過程の再検討」によって1996年に段丘面Ⅱの礁盤で掘削されたボーリングコアNo.4の化石*Porites* sp.(1805)を選んだ(表2)。1805のウラン系列年代は9.2kaである。

水深変化によるvital effectの大きさを検討するために、化石試料の水深を推定する必要がある。石垣島の現生造礁サンゴの年輪幅は水深が深くなるのに伴って狭くなることが知られている(香川, 1994MS)。そこで、喜界島の試料についても、年輪の解析を行った。現生および完新世*Porites* spp.の群体から厚さ約5mmの薄板を群体表面に対して垂直方向に切り出し、そのソフトX線写真を撮影した。

水深と年輪幅の関数が喜界島の試料に対しても変わらないと仮定すると、KS01-09の平均年輪幅は6.98mm/年であり、生息水深は6mと推定される。また、1805の年輪幅は8.15mm/年であり、水深は5mと推定された。この値はChappell and Polach(1991)の海水面変化曲線から推定された試料の水深の値(6~7m)に近い。

KS01-09のバンド形成時期については、酸素同位体比の分析結果と比較して、夏に高密度バンドが、冬に低密度バンドが形成されたことが判明した。

## (2) 酸素・炭素同位体比の測定

造礁サンゴの薄板から年輪に直行する方向に約0.5mm間隔で同位体比測定用の試料を削り出した。1991冬から1997年夏に分泌された約7年分の範囲より40試料を得た。分析には東北大学大学院理学研究科地圏進化化学講座のFinnigan MAT社製DeltaSを使用した。試料はリン酸バス中で103%リン酸と70℃で反応させた。作業用標準

## 6. 酸素・炭素同位体比の測定と古水温の推定

造礁サンゴ *Porites* spp. 骨格に記録された酸素同位体比から過去の海水温を高い精度で復元するため、沖縄県石垣島北部米原沖の現世サンゴ礁の水深0~25mで採取された *Porites* spp. の酸素同位体比を用いて、水深変化に伴う vital effect による分別の効果も含めたモデルを作成した (香川, 1994MS). 喜界島の化石試料にそのモデルを適用して、古海水温を復元した.

### (1) 試料の採取と年輪の解析

石垣島で作られたモデルが喜界島の試料に対しても有効であることを確認するため、水深9mで採取された群体(KS01-09)を解析用の試料として選んだ (表2). また、完新世初期の古水温を復元するため太田他の科学研究費補助金『南西諸島、喜界島の完新世サンゴ礁段丘の形成・離水過程の再検討』によって1996年に段丘面Ⅱの礁池で掘削されたボーリングコアNo.4の化石 *Porites* sp.(1805)を選んだ (表2). 1805のウラン系列年代は9.2kaである.

水深変化による vital effect の大きさを検討するために、化石試料の水深を推定する必要がある. 石垣島の現生造礁サンゴの年輪幅は水深が深くなるのに伴って狭くなることが知られている (香川, 1994MS). そこで、喜界島の試料についても、年輪の解析を行った. 現生および完新世 *Porites* spp. の群体から厚さ約5mmの薄板を群体表面に対して垂直方向に切り出し、そのソフトX線写真を撮影した.

水深と年輪幅の関数が喜界島の試料に対しても変わらないと仮定すると、KS01-09の平均年輪幅は5.98mm/年であり、生息水深は6mと推定される. また、1805の年輪幅は8.15mm/年であり、水深は5mと推定された. この値はChappell and Polach(1991)の海水面変化曲線から推定された試料の水深の値 (6~7m) に近い. KS01-09のバンド形成時期については、酸素同位体比の分析結果と比較して、夏に高密度バンドが、冬に低密度バンドが形成されたことが判明した.

### (2) 酸素・炭素同位体比の測定

造礁サンゴの薄板から年輪に直行する方向に約0.5mm間隔で同位体比測定用の試料を削り出した. 1991冬から1997年夏に分泌された約7年分の範囲より40試料を得た. 分析には東北大学大学院理学研究科地圏進化学講座のFinnigan MAT社製 DeltaSを使用した. 試料はリン酸バス中で103%リン酸と70℃で反応させた. 作業用標準

試料としてMACSIを用い、PDBを標準とした $\delta$ 値に換算した。

#### 2. 酸素同位体比

現生の*Porites* sp.の酸素同位体比は明瞭な年周変化を示し、7月に低い値を、2月に高い値を示す(図9)。また、夏の最も低い値は-5.2‰で1991年に、冬の最も高い値は-3.4‰で1993年に記録された。 $\delta$ 値は海水温と以下のような負の相関関係をもつ、

表2. 分析に使用した造礁サンゴ試料

	属種名	U/Th年代(ka)	生息水深(m)	年輪幅(mm)	標高(m)
現生造礁サンゴ (KS01-09)	<i>Porites</i> sp.	(0)	9	8.15	-
化石造礁サンゴ (1805)	<i>Porites</i> sp.	9.2	?	5.98	-16

#### 試料採集地点

現生造礁サンゴ：鹿児島県大島郡喜界町志戸桶沖礁斜面

化石造礁サンゴ：鹿児島県大島郡喜界町志戸桶東方Ⅱ面礁池上(コア掘削地点4)

#### 3. 酸素同位体比

酸素同位体比と同様に年周変化を示すが、明瞭ではない。現生試料の同位体比は-3.2～-1.0‰の範囲で、化石試料のものは-2.6～-0.5‰の範囲で変化する。一般に、冬季に最も低い値に、夏の終わり頃に高い値となり、酸素同位体比の位相と一致しない。

#### 4. モデル

第四紀の化石試料の酸素同位体比と海水温・塩分の関係を記述するためには、現在の

表3. モデルより推定された喜界島周辺の現在および完新世(9.2ka)の水温

	年平均水温推定値(°C)	年平均水温実測値(°C)	年格差推定値(°C)	年格差実測値(°C)
現生サンゴ(KS01-09) (水深9m)	21.9	24.55	6.6	7.5
化石サンゴ(1805) (水深5m)	22.0	-	8.2	-

ただし、 $\Delta$ 塩分は水床量の変化に伴うものではなく、年周変化に由来するものである。これらの項のなかで水床量、塩分、vital effectの値が定めれば、温度変化を再現できる。また、水床量、温度、vital effect分が決まれば、塩分を推定することができる。可能であれば、骨格のSr温度計(Sr/Ca比)を用いて水温を復元し、それと酸素同位体比から塩分を推定する分析アルゴリズムが最も適当と考えられるが、今回はそ

試料としてMACS1を用い、PDBを標準とした $\delta$ 値に換算した。

#### a. 酸素同位体比

現生の *Porites* sp. の酸素同位体比は明瞭な年周変化を示し、7月に低い値を、2月に高い値を示す (図9)。また、夏の最も低い値は-5.2‰で1991年に、冬の最も高い値は-3.4‰で1993年に記録された。 $\delta$ 値は海水温と以下のような負の相関関係をもつ。

$$\delta c = -0.160 t - 0.176$$

ただし、 $\delta c$ は骨格の酸素同位体比で $t$  (°C) は海水温である。相関係数は $R=0.923$ で、両者の相関は非常に高い。両者の直線回帰式の傾きは-0.160で同位体平衡下でのアラレイシの値と誤差の範囲で一致する (Tarutani et al. 1969)。一方、海水と骨格の酸素同位体比の差を補正していないが、この直線の $y$ 切片は約3‰軽く、造礁サンゴの生体効果が大きいことが推測される。

化石試料の酸素同位体比も明らかな周期的変化を示し (図10)、-1.48~-3.85‰の間で変動している。年輪と同位体比から約5年分の変化が認められ、秋に高密度バンドが形成されたことが読み取れる。

#### b. 炭素同位体比

酸素同位体比と同様に年周変化を示すが、明瞭ではない。現生試料の同位体比は-3.2~-1.0‰の範囲で、化石試料のものは-2.6~-0.5‰の範囲で変化する。一般に、春先に最も低い値に、夏の終わり頃に高い値となり、酸素同位体比の位相と一致しない。

### (3)モデル

第四紀の化石試料の酸素同位体比と海水温・塩分の関係を記述するためには、現在のモデルに氷床量の変化分を加味する必要がある。また、vital effectをモデルに加えるため、石垣島で得られた水深と平均酸素同位体比の関係式を採用した (香川, 1994MS)。本研究では完新世化石試料の酸素同位体比の変化分 ( $\Delta \delta^{18}O$ ) に関して、以下のモデルを検討した。

$$\Delta \delta^{18}O = \Delta \text{氷床量} + \Delta \text{水温} + \Delta \text{塩分} + \text{vital effect}$$

ただし、 $\Delta$ 塩分は氷床量の変化に伴うものではなく、年周変化に由来するものである。これらの項のなかで氷床量、塩分、vital effectの値が定めれば、温度変化を再現できる。また、氷床量、温度、vital effect分が決まれば、塩分を推定することができる。可能であれば、骨格のSr温度計 (Sr/Ca比) を用いて水温を復元し、それと酸素同位体比から塩分を推定する分析アルゴリズムが最も適切と考えられるが、今回はそ



KS01-09

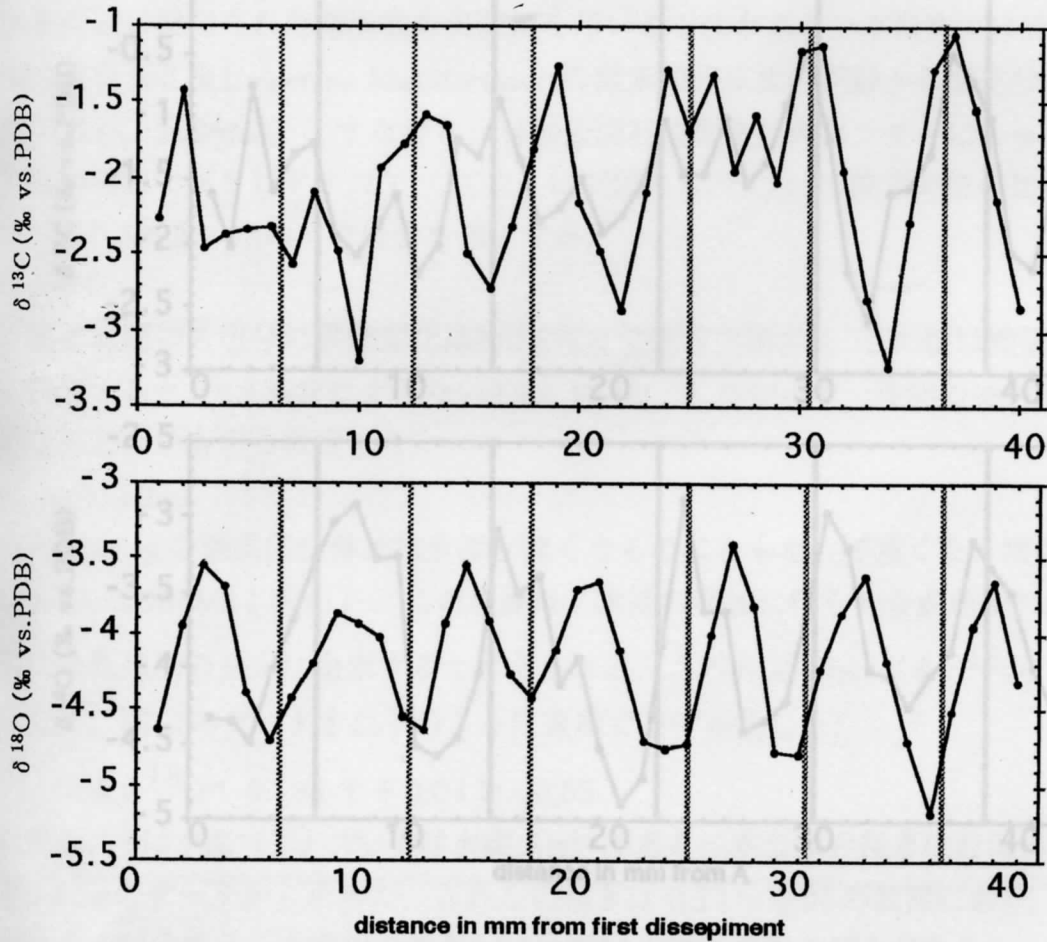


図9. 喜界島志戸桶沖の現生サンゴ礁より採取したPorites sp. (KS01-09)に記録された酸素・炭素同位体比.

1805

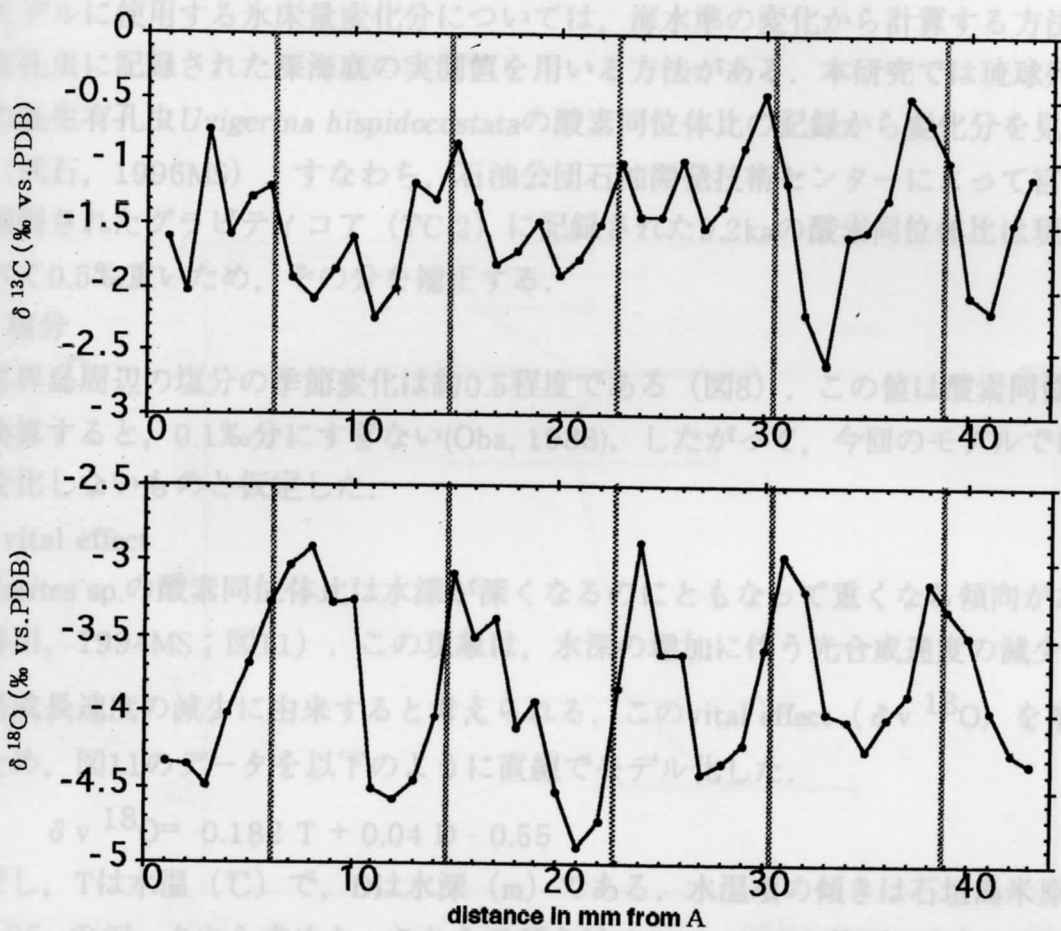


図10. 喜界島志戸桶付近の完新世隆起サンゴ礁より採取した *Porites* sp. (1805) に記録された酸素・炭素同位体比。

先に求めたモデルを用いて喜界島の現生および化石試料に付いて水温を復元した (表3)、化石試料の水深については年輪幅より推定した。その結果、現生試料の年平均水温推定値は21.9℃で、年格差推定値は6.6℃となった。現在の喜界島周辺の平均海水温は24.55℃であり、モデルからの推定値は2.6℃低く見積もられた。また、年平均格差の実測値は7.5℃で、推定値と比較的近い。年平均値が低くなった原因として、水深9mの水温が実際に表層よりも低いことと vital effect の貢献分を完全に補正できなかったことがあげられる。また、モデルの精度をより高めるためには骨格と海水の酸素同位体比の差も含める必要がある。

の分析ができなかった。ここでは塩分変化が現在と同じ程度小さかったことを仮定して、水温を再現した。

#### a. 氷床量

モデルに使用する氷床量変化分については、海水準の変化から計算する方法と底生有孔虫に記録された深海底の実測値を用いる方法がある。本研究では琉球列島近海の底生有孔虫 *Uvigerina hispidocostata* の酸素同位体比の記録から変化分を見積もった(武石, 1996MS)。すなわち、石油公団石油開発技術センターによって宮古島沖で掘削されたグラビティコア (TC-2) に記録された9.2kaの酸素同位体比は現在とくらべて0.5‰重いため、その分を補正する。

#### b. 塩分

喜界島周辺の塩分の季節変化は約0.5程度である(図8)。この値は酸素同位体比に換算すると、0.1‰分にすぎない(Oba, 1988)。したがって、今回のモデルでは塩分は変化しないものと仮定した。

#### c. vital effect

*Porites* sp. の酸素同位体比は水深が深くなるのにもなって重くなる傾向がある(香川, 1994MS; 図11)。この現象は、水深の増加に伴う光合成速度の減少と、骨格成長速度の減少に由来すると考えられる。このvital effect ( $\delta v^{18}O$ ) を補正するため、図11のデータを以下のように直線でモデル化した。

$$\delta v^{18}O = -0.182 T + 0.04 D - 0.55$$

ただし、Tは水温(°C)で、Dは水深(m)である。水温項の傾きは石垣島米原沖水深0-25mのデータから求めた。これらの傾きは-0.11~-0.25の範囲にあり、その平均値は-0.182である。水深項の傾き0.04は図11の回帰直線の傾きである。

#### (4)古水温の復元 沖縄県石垣島米原沖のサンゴ礁(水深0~25m)で採取された

先に求めたモデルを用いて喜界島の現生および化石試料に付いて水温を復元した(表3)。化石試料の水深については年輪幅より推定した。その結果、現生試料の年平均水温推定値は21.9°Cで、年格差推定値は6.6°Cとなった。現在の喜界島周辺の平均海水温は24.55°Cであり、モデルからの推定値は2.6°C低く見積もられた。また、平均年格差の実測値は7.5°Cで、推定値と比較的近い。年平均値が低くなった原因として、水深9mの水温が実際に表層よりも低いこととvital effectの貢献分を完全に補正できなかったことがあげられる。また、モデルの精度をより高めるためには骨格と海水の酸素同位体比の差も含める必要がある。

化石試料の年平均水温推定値は22.0℃で、年格差推定値は8.2℃となった。9.2kaの海水温は現在よりも数℃高かったと考えられているため、今回の結果とは矛盾する。また、図9と図10の比較より、9.2kaの夏の平均最高海水温は現在とはほぼ同じであるが、冬の平均最低海水温が現在より約2℃高かったことが明らかになった。

図11

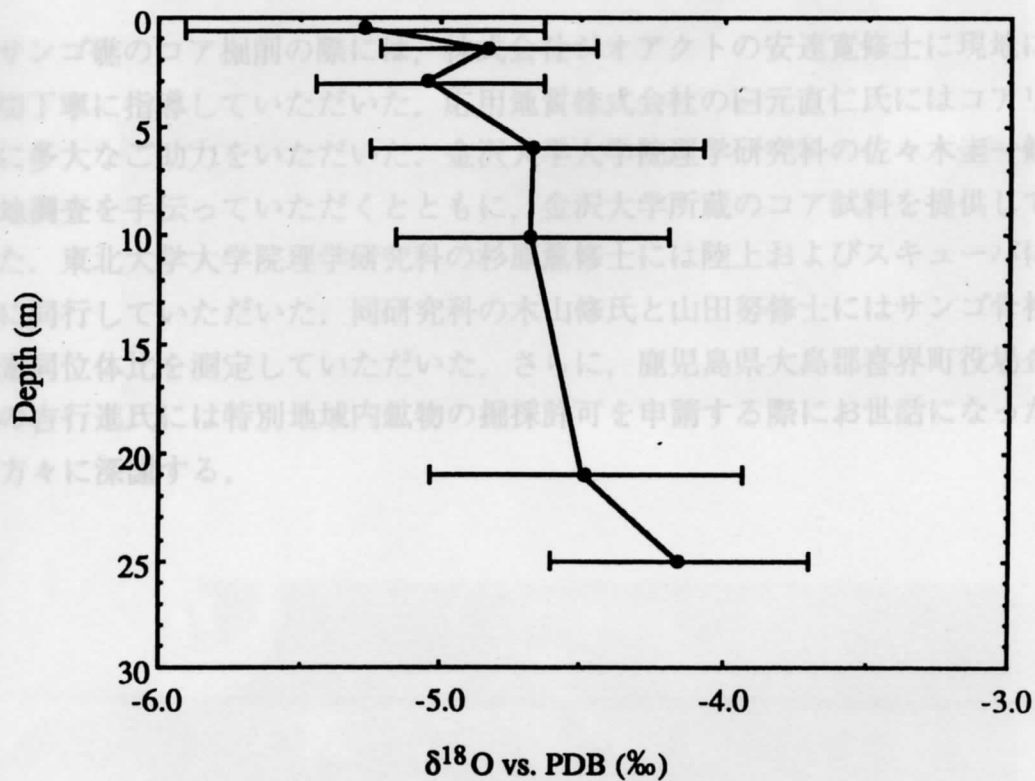


図11. 沖縄県石垣島米原沖のサンゴ礁（水深0～25m）で採取された *Porites* spp.の酸素同位体比の平均値と  $\delta^{18}\text{O}$ . 誤差棒は年周変化 ( $1\sigma$ )の幅を示す.

化石試料の年平均水温推定値は22.0℃で、年格差推定値は8.2℃となった。9.2kaの海水温は現在よりも数℃高かったと考えられているため、今回の結果とは矛盾する。また、図9と図10の比較より、9.2kaの夏の平均最高海水温は現在とほぼ同じであるが、冬の平均最低海水温が現在より約2℃高かったことが明らかになった。

## 謝辞

隆起サンゴ礁のコア掘削の際には、株式会社ジオアクトの安達寛修士に現地において懇切丁寧に指導していただいた。応用地質株式会社の白元直仁氏にはコアリングの際に多大なご助力をいただいた。金沢大学大学院理学研究科の佐々木圭一修士には現地調査を手伝っていただくとともに、金沢大学所蔵のコア試料を提供していただいた。東北大学大学院理学研究科の杉原薫修士には陸上およびスキューバによる調査に同行していただいた。同研究科の木山修氏と山田努修士にはサンゴ骨格の酸素炭素同位体比を測定していただいた。さらに、鹿児島県大島郡喜界町役場企画観光科の吉行進氏には特別地域内鉱物の掘採許可を申請する際にお世話になった。以上の方々に深謝する。



写真1

鹿児島県喜界島志戸崎海岸におけるハンド  
コアラーを用いたコア試料の掘削風景

ハンドコアラーによって掘削されたコア試料の

掘削風景





写真1

鹿児島県喜界島志戸桶海岸におけるハンド  
コアラーを用いたコア試料の掘削風景



写真2

ハンドコアラーによって掘削されたコア試料の  
回収風景



写真3  
コア試料T-1

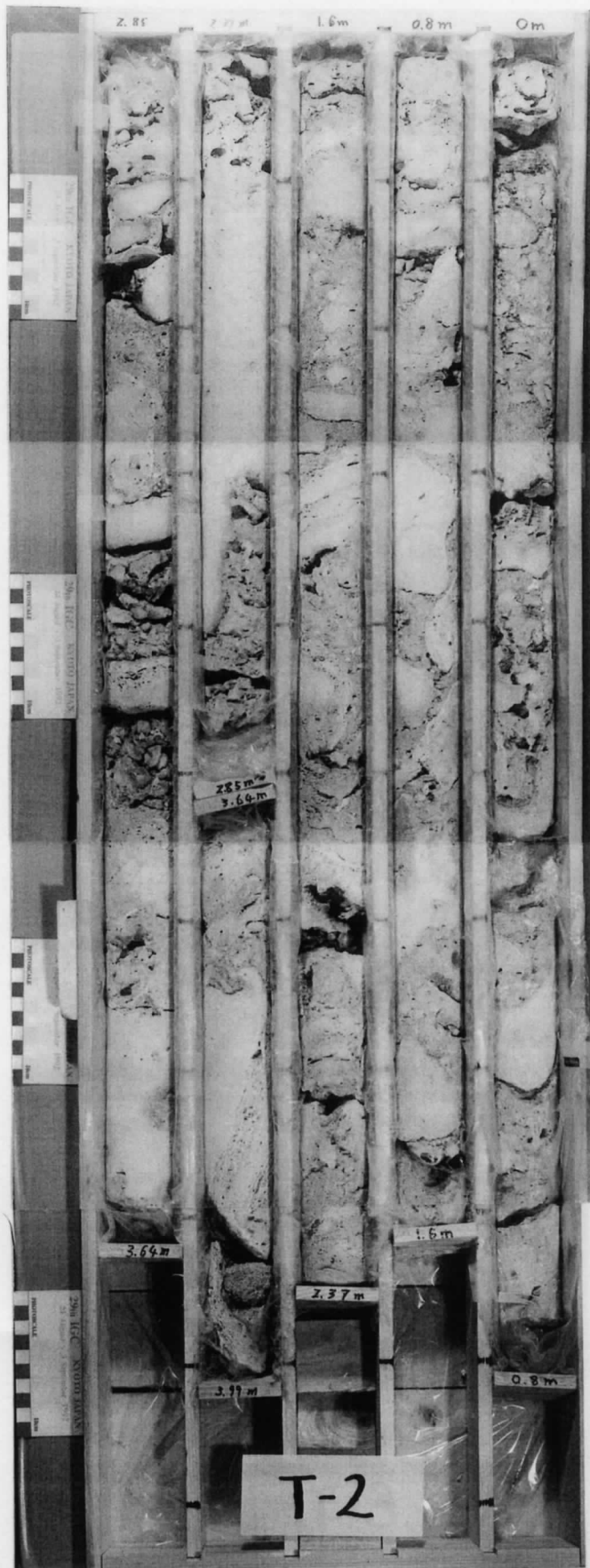


写真4  
コア試料T-2

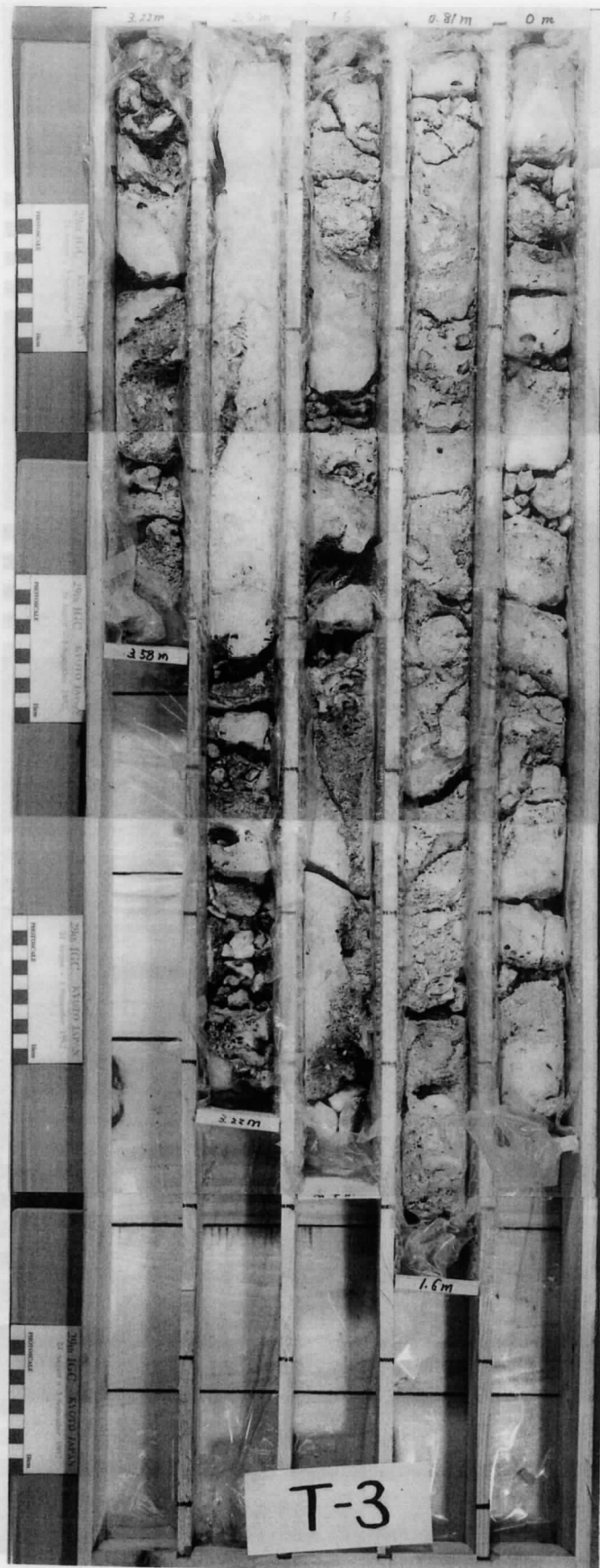


写真5  
コア試料T-3

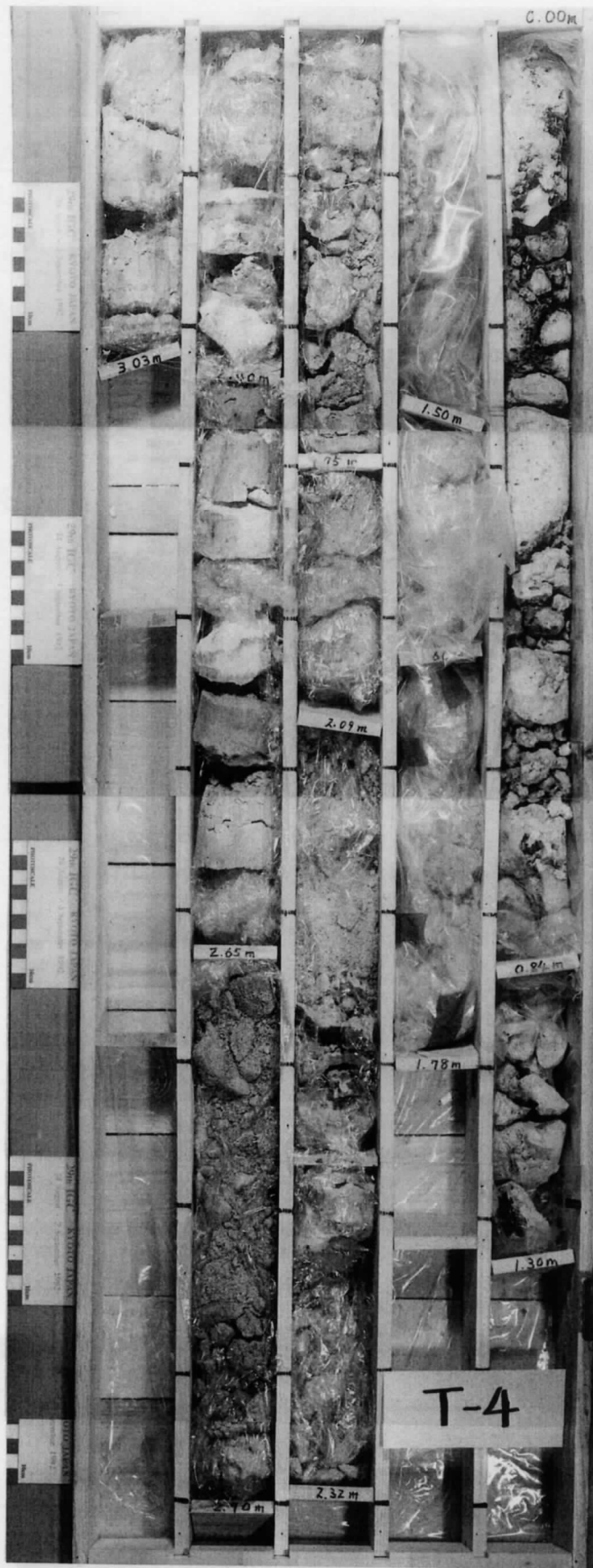


写真6  
コア試料T-4



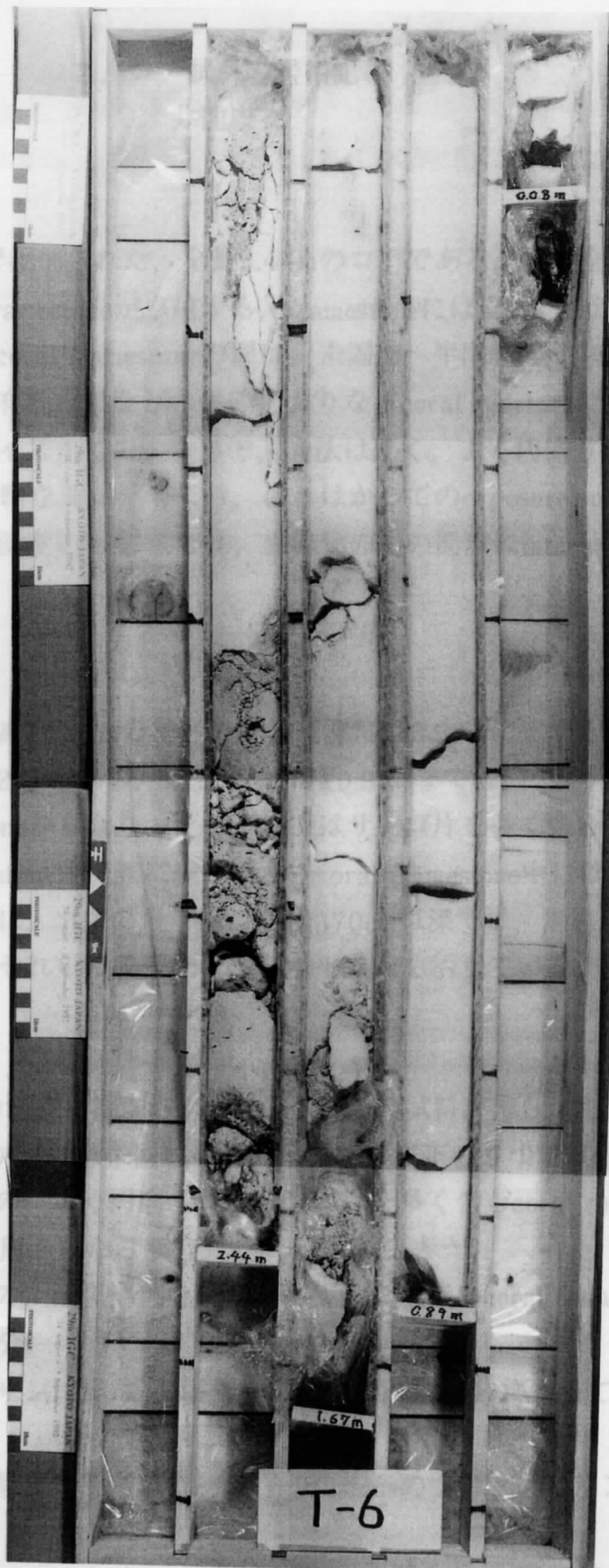


写真7  
コア試料T-6

コアT-1  
IV面(標高0.762m)の地点で  
サンゴ群体およびcoral fr  
が含まれる。サンゴ群体/c  
サンゴ片・軟体動物片・  
これらの主成分は、中礫サイ  
0.9mには、茶色を呈する明  
がある。また、コアの下層  
られた。

コアT-2  
コアの上部地点はIII面の標  
は深度0.95mを境に大きく2  
ゴ片も多く含むcoral rudst  
とサンゴ群体/coral frames  
が層状的に認められる。特  
サンゴを厚く覆っている。

コアT-3  
コアはIII面の標高1.975mの  
は、深度3.13~3.22mはコア  
1. 地表から深度1.12mまでの  
群体/coral framestoneの互  
2. その下位深度2.00mまでの  
クとサンゴ片が混在する部  
3. 深度2.00~2.75mの造礁  
分。  
4. 深度2.75~3.13mの、淡  
分(2と同様の岩相)、  
5. 3.22~3.58mの、coral rudstoneとサンゴ群体/coral framestoneの互層部分(1と同様の  
岩相)。  
なお、深度3.30mおよび3.40mには、exposure surfaceの可能性のある茶色を呈する明確な  
面が認められる。

体を通じて造  
サンゴモが少  
片(特に枝状  
構成されてい  
している。深  
faceの可能性  
sedimentsがみ

本コアの相  
層され  
coral ru  
造礁サンゴ  
サンゴモが造礁

本コアの岩相  
される。  
rudstoneとサンゴ  
framestoneのプロ  
占められる部  
ンゴ片の混在部

## 2. コア試料の岩相記載

井龍康文

### コアT-1

IV面の標高0.752mの地点で掘削された、全長3.44mのコアである。コア全体を通じて造礁サンゴ群体およびcoral framestoneが卓越する。framestoneには皮殻状無節サンゴモが少量含まれる。サンゴ群体/coral framestoneの間は、未固結～半固結のサンゴ片（特に枝状サンゴ片）・軟体動物片・有孔虫殻などの生碎物よりなるcoral rudstoneで構成されている。これらの生碎物は、中礫サイズまでの大きさで、淘汰は悪く、よく円磨されている。深度0.9mには、茶色を呈する明瞭な面が認められ、これはかつてのexposure surfaceの可能性がある。また、コアの下部深度3.3m以深では、生碎物の間の間隙にinternal sedimentsがみられる。

### コアT-2

コアの掘削地点はIII面の標高1.341mの地点で、掘削深度は3.99mに達する。本コアの岩相は深度0.95mを境に大きく2分される。地表から深度0.95mまでは、よく円磨されたサンゴ片を多く含むcoral rudstoneからなり、その下位ではサンゴ片を多く含むcoral rudstoneとサンゴ群体/coral framestoneが交互に繰り返す。coral framestone中には無節サンゴモが普遍的に認められる。特に、コアの最下部、深度370cm以深では、無節サンゴモが造礁サンゴを厚く覆っている。それらの成長位はほぼ水平方向を示している。

### コアT-3

コアはIII面の標高1.975mの地点で掘削され、全長3.58mの試料が得られた。本コアの岩相は、深度3.13～3.22mはコア試料は未回収部分を除いて、以下の5つに区分される。

1. 地表から深度1.12mまでの、よく円磨されたサンゴ片を多く含むcoral rudstoneとサンゴ群体/coral framestoneの互層からなる部分。
2. その下位深度2.00mまでの、淡黒褐色を帯びた不規則な形状のcoral framestoneのブロックとサンゴ片が混在する部分。
3. 深度2.00～2.75mの造礁サンゴ群体 (*Gardineroseris planulata*) によって占められる部分。
4. 深度2.75～3.13mの、淡黒褐色を帯びたcoral framestoneのブロックとサンゴ片の混在部分 (2と同様の岩相)。
5. 3.22～3.58mの、coral rudstoneとサンゴ群体/coral framestoneの互層部分 (1と同様の岩相)。

なお、深度3.30mおよび3.40mには、exposure surfaceの可能性のある茶色を呈する明瞭な面が認められる。

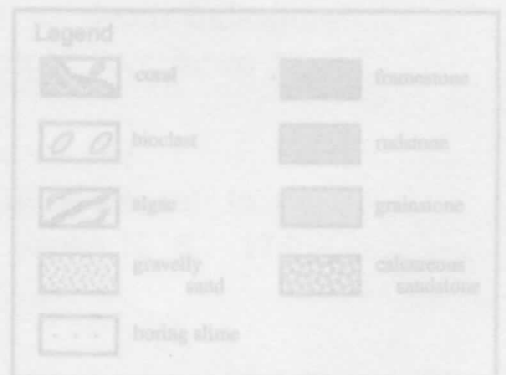
#### コアT-4

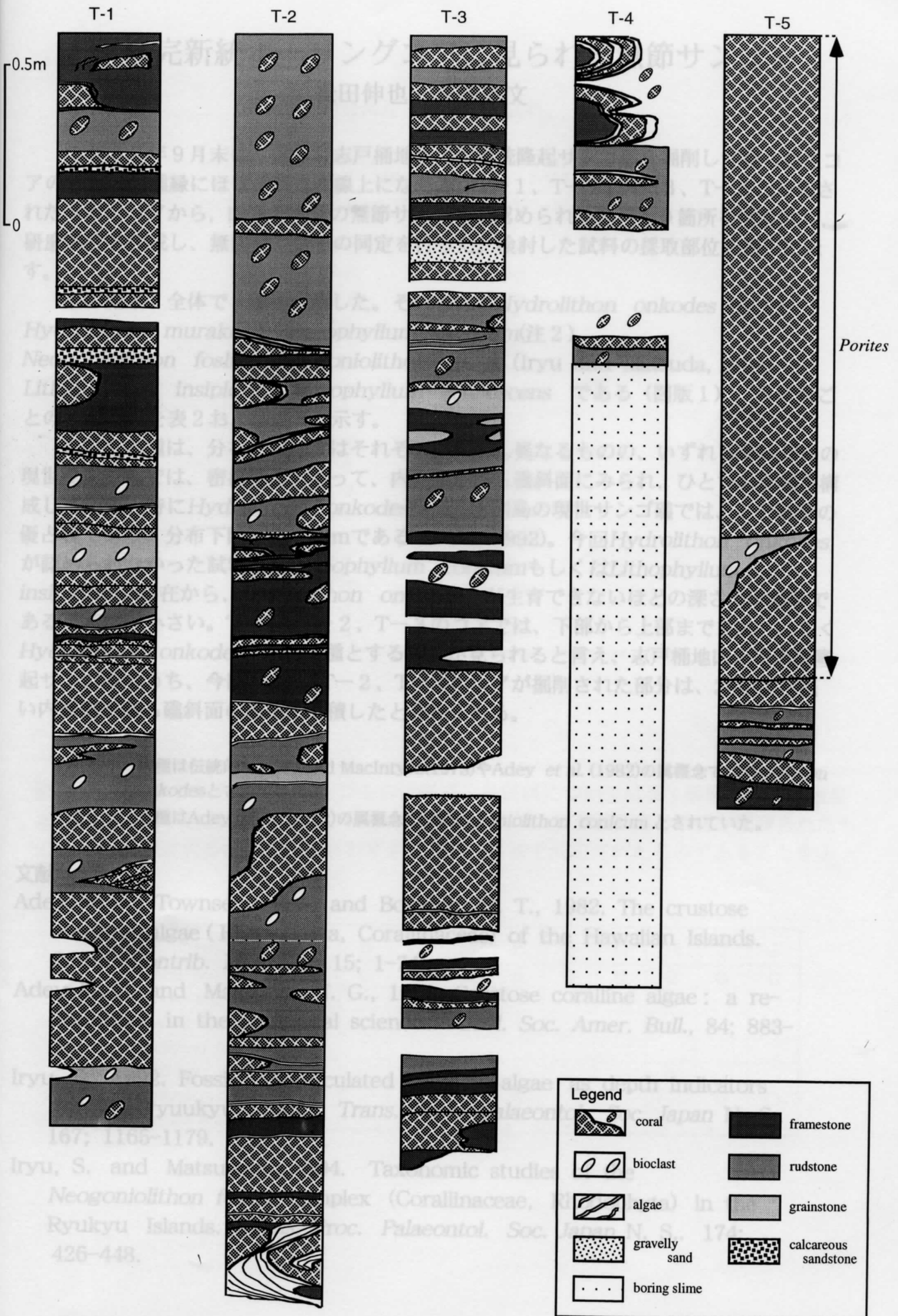
コアはII面の標高3.737mの地点で掘削された。ここでは、全長3.03mを掘削したが、岩芯試料が得られたのは、上部1.03m（うち、0.62~0.84mは試料未回収）であり、その下位は錐粉（スライム）として回収された。

上部1.03mのうち、地表から深度0.34mまでの部分はcoral framestoneからなり、皮殻状無節サンゴモに覆われた造礁サンゴが認められる。コアT-2の最下部同様、それらの成長方向はほぼ水平方向である。その下位、深度0.34~1.03mは淡黒褐色を帯びたcoral framestoneのブロックとサンゴ片の混在部である。

#### コアT-6

コアはIV面の標高1.128mの地点で掘削され、全長2.44mの試料が得られた。地表から深度2.04mは塊状ハマサンゴ (*Porites* sp.) が占め、その下位には円磨されたサンゴ片を多く含むcoral rudstoneとサンゴ群体が、それぞれ2回繰り返してみられる。







# 志戸桶完新統ボーリングコアに見られる無節サンゴモ

松田伸也・井龍康文

1997年9月末に、喜界町志戸桶地区の完新統隆起サンゴ礁を掘削して得られたコアのうちの、礁縁にほぼ垂直な直線上にならぶ、T-1、T-2、T-3、T-4と命名された4本のコアから、肉眼で大型の無節サンゴモが認められる部分19箇所を切り取り、研磨薄片を作成し、無節サンゴモの同定を行った。検討した試料の採取部位を表1に示す。

その結果、全体で7種を確認した。それらは、*Hydrolithon onkodes* (注1), *Hydrolithon murakosii*, *Pneophyllum conicum*(注2), *Neogoniolithon fosliei*, *Neogoniolithon* sp. A (Iryu and Matsuda, 1994), *Lithophyllum insipidum*, *Mesophyllum erubescens* である(図版1)。各試料ごとの検討結果を表2および表3に示す。

これらの種は、分布下限深度はそれぞれいくぶん異なるものの、いずれも琉球列島の現世サンゴ礁では、密接に伴いあって、内側礁原から礁斜面にみられ、ひとつの群集を構成している。特に*Hydrolithon onkodes*は、琉球列島の現世サンゴ礁では、この群集の優占種であり、分布下限深度は20mである(Iryu, 1992)。今回*Hydrolithon onkodes*が認められなかった試料も、*Pneophyllum conicum*もしくは*Lithophyllum insipidum*の存在から、*Hydrolithon onkodes*が生育できないほどの深さの堆積物である可能性は小さい。T-1、T-2、T-3のコアでは、下部から上部までまんべんなく*Hydrolithon onkodes*を優占種とする群集が見られると言え、志戸桶地区の完新統隆起サンゴ礁のうち、今回T-1、T-2、T-3のコアが掘削された部分は、20mより浅い内側礁原から礁斜面の環境で堆積したと考えられる。

注1: 本種は伝統的なAdey and MacIntyre(1973)やAdey et al. (1982)の属概念では*Porolithon onkodes*とされていた。

注2: 本種はAdey et al. (1982)の属概念では*Paragoniolithon conicum*とされていた。

## 文献

- Adey, W. H., Townsend, R. A. and Boykins, W. T., 1982. The crustose coralline algae (Rhodophyta, Corallinaceae) of the Hawaiian Islands. *Smith. Contrib. Mar. Sci.*, 15; 1-74.
- Adey, W. H. and MacIntyre, I. G., 1973. Crustose coralline algae: a re-evaluation in the geological sciences. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 84; 883-904.
- Iryu, S., 1992. Fossil nonarticulated coralline algae as depth indicators for the ryuukyu Group. *Trans. Proc. Palaeontol. Soc. Japan N. S.* 167; 1165-1179.
- Iryu, S. and Matsuda, S., 1994. Taxonomic studies of the *Neogoniolithon fosliei* complex (Corallinaceae, Rhodophyta) in the Ryukyu Islands. *Trans. Proc. Palaeontol. Soc. Japan N. S.* 174; 426-448.



表1. 研磨薄片で検討した試料。

試料	コア	採取部位 (地表面からの深さ,cm)
A	T-1	7~11
B	T-1	15~25
C	T-1	137~147
D	T-1	150~156
E	T-1	181~189
F	T-1	194~200
G	T-1	200~207
H	T-1	222~225
I	T-1	229~240
J	T-1	261~271
K	T-2	109~115
L	T-2	164~171
M	T-2	324~330
N	T-2	369~372
O	T-3	33~38
P	T-3	56~62
Q	T-3	330~335
R	T-4	0~12
S	T-4	26~38

表2. コア T-1 の各試料のサンゴモの出現表。各試料については表1参照。◎は生殖巣の中軸断面が観察されたもの、○は中軸断面ではないが生殖巣の断面が観察されたもの、△は生殖巣の断面が観察されず栄養組織の特徴で同定されたものであることを示す。

種 \ 試料	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
<i>Hydrolithon onkodes</i>	◎	○	◎	△	△	◎	◎	◎	◎	◎
<i>Hydrolithon murakosii</i>	○							△		○
<i>Pneophyllum conicum</i>				○						△
<i>Neogoniolithon fosliei</i>										
<i>Neogoniolithon sp. A</i>					△			△		
<i>Lithophyllum insipidum</i>	○		△		△				◎	○
<i>Mesophyllum erubescens</i>						◎				

表 3. コア T-2, T-3, T-4 の各試料のサンゴモの出現表 (記述法は表 1 と同じ)

種 \ 試料	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
<i>Hydrolithon onkodes</i>		◎	◎	◎		◎	◎		◎
<i>Hydrolithon murakosii</i>		◎			◎	◎			
<i>Pneophyllum conicum</i>	◎	◎	△		◎			◎	
<i>Neogoniolithon fosliei</i>			△						
<i>Neogoniolithon sp. A</i>				△					
<i>Lithophyllum insipidum</i>		◎						◎	△
<i>Mesophyllum erubescens</i>			○		◎				

図版 1 説明

1. *Hydrolithon onkodes* の無性生殖巣窩
  2. *Hydrolithon onkodes* の雄性生殖巣窩
  3. *Hydrolithon murakosii*
  4. *Pneophyllum conicum*,
  5. *Neogoniolithon fosliei*,
  6. *Neogoniolithon sp. A*,
  7. *Lithophyllum insipidum*,
  8. *Mesophyllum erubescens*
- 写真 1 ~ 8 は同一倍率。写真 1 のスケールバーは 100 μ を示す。



