

A-0805 環礁上に成立する小島嶼国の地形変化と水資源変化に対する適応策に関する研究

(1) 環境変動史と州島地形構造に関する研究

東京大学 大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻 茅根 創

〈研究協力者〉 東京大学大学院理学系研究科 中村修子

東京大学大学院理学系研究科 飯嶋寛子

平成20～22年度累計予算額：19,401千円（うち、平成22年度予算額：6,400千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 地球温暖化に伴う気候変動による降水量や降水パターンの変化は、環礁州島の水資源の供給に重大な問題を引き起こす。しかしながら熱帯域で長期の降水量を観測した記録が少ないため、降水量の長期的な変化や降水パターンの変化は不明で、環礁州島の水資源供給の将来予測を進める上で大きな不確定要因となっている。本研究は、気候変動が水資源に与える影響について評価するために、環礁における過去数千年、百年、数十年スケールの降水量変動及び汚染の歴史をサンゴ年輪から見積って、近年の地球規模での気候変動イベントや降水量そのものの変化と人口増加に伴う汚染を明らかにする。マジュロの1000年前、2000年前の化石試料と現生試料の比較から、1000年前および2000年前は現在よりも海水温が低かったか、降水量が少なかった可能性が示唆された。一方、ツバルでは、人口の密集する地域では地下水汚染が著しく、水域の環境悪化によってサンゴが立ち枯れて大型藻類におおわれている。これは、最近数10年間の人口増加に伴う生活排水負荷の増加によって、首都の人口密集地域のラグーン側のサンゴ群集が斃死してしまったことが、サンゴ年輪の窒素同位体比と放射性炭素の変化によって明らかになった。気候（降水量）、地形、堆積物、人間活動は、相互に関係し合っている。さらに、地球温暖化は、降水モードを変化させるとともに、州島の堆積システムや、海面上昇を通じて地形と地下水の容量に影響を与える。さらに、地下水や地形形成過程は、人間活動とも密接に関わっている。地球温暖化に対して環礁の水資源をどのように維持していくかを考えるためには、こうした自然-人間の相互作用のフレームワークの中で考察し、対応策を検討することが必要である。

[キーワード] 降水量、地下水、州島地形、サンゴ年輪、水温・塩分

1. はじめに

小島嶼国は、利用可能な土地と資源が限られており、地球温暖化に対する脆弱性がきわめて高い。ツバル、マーシャル諸島など国土のほぼすべてがサンゴ礁起源の砂からなる環礁州島は、面積が小さく、国土が透水性の高いサンゴ礁起源の砂で構成されるため、河川や湖が存在せず、利用可能な水資源が降水と地下水に限られる。そのため、環礁州島は、地形のみならず、水資源に関して脆弱である。地球温暖化に伴う気候変動によって降水量や降水パターンが変化すると、水資源の供給に重大な問題を生じる。

水資源として直接利用され、地下水資源を涵養する降水量について、環境収容力という点では長期的な平均年間降水量よりも、ENSO(El Nino Southern Oscillation) イベントなどに伴う異常渇水など極端なイベントが収容力を規定する。地球温暖化に伴って、過去20年間にそれ以前よりもこうしたイベントの頻度が増加している、あるいは降水量分布自体が変動していることが指摘されている。しかしながら、熱帯域で長期の降水量を観測した記録が少ないため、自然の変動と人為変動を区別することができない。気候変動が水資源に与える影響について評価するためには、環礁における過去数千年、百年、数十年スケールの降水量変動を見積り、近年ENSOなどの地球規模での気候変動イベントや降水量そのものの変化、その温暖化との関係について明らかにすることが必要である。

環礁州島の水資源は、こうした長期的な気候変動による降水量の変化だけでなく、海面上昇による帯水層の縮小や、近年の人口増加に伴う人為負荷(地下水汚染)も大きな影響を及ぼす。よって、将来の気候変化に伴う環礁の水資源確保のための対応策を検討する上で、こうした要因とその相互関係も同時に明らかにする必要がある。

2. 研究目的

本研究の目的は、環礁州島の水資源、特に降水量の変動を千年、数十年スケールで復元し、地球規模の気候変動イベントの影響および地球温暖化に伴う降水量変動を評価することである。環礁における降水量変動を復元することによって、環礁の収容力を規定する異常渇水が気候変動イベントとどのように関係しているか、近年、こうしたイベントや降水量そのものがどのように変化し、それが温暖化と関係しているのかを明らかにする。さらに、最近数10年間の近代化に伴って、地下水汚染やサンゴ礁生態系劣化がどのように進んだのかを、サンゴ年輪から復元、評価する。また地下水の賦存ポテンシャルを決める州島地形について、その形成過程と海面上昇による変化を明らかにして、気候(降水量)、地形、堆積物、人間活動が、どのように関係し合っているかを明らかにして、環礁の水資源をこうした相互作用の中に位置づけて考察し、将来に対する対応策を検討する。

3. 研究方法

(1) サンゴ年輪解析

1) マーシャル諸島

マーシャル諸島共和国において現生および化石塊状サンゴ(ハマサンゴ *Porites* sp.)のコア試料を採取し、その酸素安定同位体比、ストロンチウム濃度(Sr/Ca)を月の時間分解能で測定した。酸素同位体比は水温と塩分の指標、ストロンチウムは水温のみの指標であるので、両者を測定することによって水温と塩分(=降水量)を独立に、定量的に復元した。また、表層海水試料を月1回採取し、塩分と酸素同位体比の測定を行い、両者の関係を明らかにした。

2) ツバル

水資源汚染の顕著な海域から採取したサンゴ試料について、サンゴ年輪の窒素同位体比を測定し、栄養塩流入量の変化を復元した。窒素同位体比はUchida et al.¹⁾に基づいて、段階加熱法を用いて静作動型窒素同位体質量分析計で測定した。

(2) 地形と堆積物

州島を横断する方向に測線を設けてレベル測量を行い、島の地形断面を求めた。標高は、測量時の海水面を基準にして求め、潮位予測値によって平均海面からの値に補正した。

測線上で適当な間隔でトレンチを掘削して、トレンチ壁面の堆積物を採取し、その粒度と構成を求めた。また、棘の磨耗していない有孔虫殻のみを選別して放射性炭素年代を測定して、その堆積年代を求め、海面変動との詳細な比較を行った。

4. 結果・考察

(1) サンゴ年輪試料を用いたマーシャル諸島の水溫・降水量変動の復元

1) 塊状サンゴ試料の採取

2008年8月にマーシャル諸島において、現生および化石ハマサンゴのコア試料を3本採取した。現生サンゴ試料は、マジュロ環礁の北部チャンネル部に生息する高さ4.8mのハマサンゴから、水中ボーリングによって、長さ124cmのコアを採取した。サンゴの生息水深は、およそ6mであった。化石サンゴ試料は、マジュロ環礁およびアルノ環礁の化石マイクロアトールから、それぞれ長さ57cm、81cmのコアを採取した。

コア試料は、岩石用カッターを用いて厚さ5mmのスラブ状にし、研磨、超音波洗浄後、軟X線撮影を行い、年輪を確認した(図1)。また、それぞれの試料をX線回折装置(XRD)で解析した結果、全てアラゴナイトであり、同位体比および微量金属分析に用いても問題のないことを確認した。マジュロ環礁およびアルノ環礁で採取した化石ハマサンゴは、放射性炭素年代測定から、それぞれ2336-2115 cal yr BP(BC386-165)と1233-987 cal yr BP(AD717-963)と年代を見積もった。

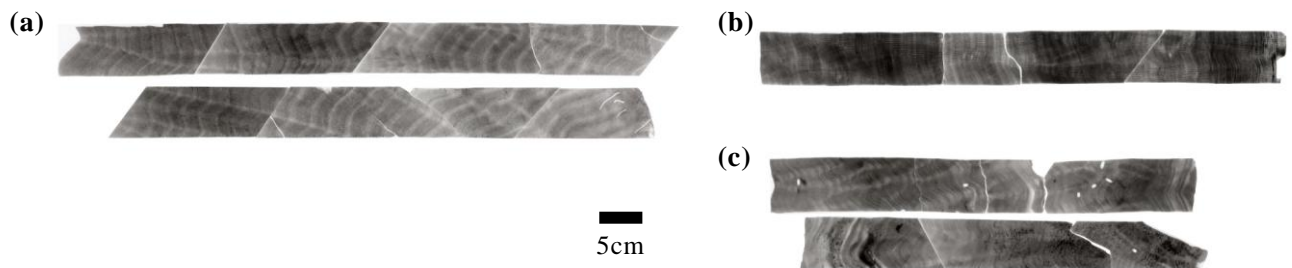


図1 マーシャル諸島で採取したハマサンゴコア試料の軟X線写真(ポジ: 白い部分は骨格密度の高い季節を示す) (a)マジュロ環礁で採取した現生ハマサンゴ (b)マジュロ環礁で採取した化石ハマサンゴ(約2100yrBP) (c)アルノ環礁で採取した化石ハマサンゴ(約1000yrBP)

2) 酸素同位体比

2009年～1998年の酸素同位体比を約1ヶ月の時間分解能で測定した(図2)。酸素同位体比は、 $-5.59 \sim -4.95\%$ の範囲で変動し、軟X線写真による年輪の位置との比較から、ほとんどの年で年2回のピークを持つことが分かった。しかし、そのピークや季節変動、年変動は明瞭ではない。マジュロの月平均海面水温は、2月に最低温度(28.5度)、9月に最高温度(29.4度)を示す。しかし、その年変動は1度以下と小さい(NOAA NCDC ERSST version3b、170°E、6°Nのグリッドデータ: 1950

ー2008年の50年平均値)。マジュロのサンゴ骨格酸素同位体比に明瞭な季節変動、年変動が現れないのは、水温の季節変動が小さいためだと考える。

サンゴ年輪の酸素同位体比変化は海水温と降水量の年変化に対応する。マジュロの海面水温および降水量の観測記録の解析から、海面水温、海水温は共に2月に最小値を取っていることが分かった。そこで、酸素同位体比サイクルの最大値が、対応する年の最低海水温および最少月平均降水量を示した2月と一致するように年代を決めた。

マジュロ環礁およびアルノ環礁で採取した化石ハマサンゴについても、酸素同位体比を約1ヶ月の時間分解能で、数年ずつ測定した。1000年前の試料は、酸素同位体比は-5.48~-4.78‰の範囲で変動し、平均値は-5.09‰であった。現生試料と同様に年輪に対応したサイクルが見られるが、その季節変動および年変動ともに明瞭ではない。2100年前の試料は、酸素同位体比は-5.37~-4.61‰の範囲で変動し、平均値は-4.98‰であった。コア上部については、年輪に対応した年サイクルが見られ、その変動は約0.5‰である。

3) Sr/Ca比

現生サンゴのSr/Ca比は8.68-8.95 mmol/molで変動し、その平均は 8.79 ± 0.03 mmol/mol(n=94)であった(図2)。Sr/Ca比の測定誤差は水温に換算して0.50度以下なのに対して、マジュロの表層水温の年変動は2度以下と小さいため、Sr/Ca比の季節変動は明瞭ではない。 $Sr/Ca = 10.553 - 0.0607 \times SST^2$ という関係式を用いてSr/Ca比から水温を見積もった結果、29.0度であり、マジュロ環礁の観測による平均表層水温29.05度と一致することを確認した。

1000年前の試料のSr/Ca比の平均は 8.89 ± 0.003 mmol/mol(n=53)、2100年前の試料のSr/Ca比の平均は 8.81 ± 0.005 mmol/mol(n=45)であり、それぞれ水温に換算すると27.4度と28.7度と推定された。

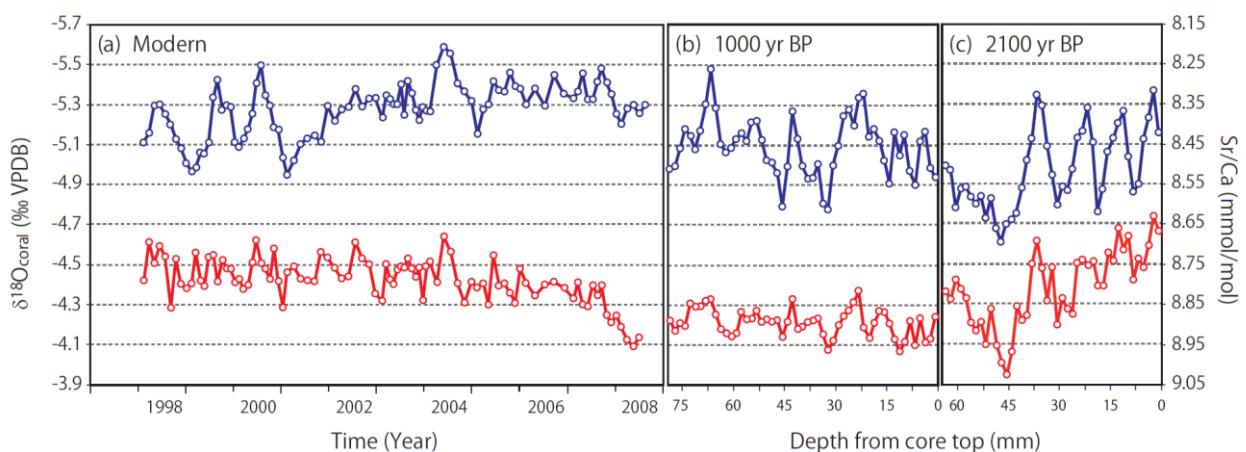


図2 マーシャル諸島で採取したハマサンゴコア試料の酸素安定同位体比 ($\square^{18}O_{\text{coral}}$; 青) とSr/Ca比 (赤) の比較。(a)現生ハマサンゴ、(b)化石ハマサンゴ (1000年前)、(c)化石ハマサンゴ (2100年前) の結果。

4) 海水試料

マジュロ環礁において、2008年8月から2009年7月の間に約1ヵ月に一度表層海水試料をサンプリ

ングし、その塩分と酸素同位体比を測定した。塩分は34.0から34.7 psuで変化し、平均値は34.5 psuであった。海水の酸素同位体比は0.14から0.33‰SMOWで変化し、平均値は0.27‰SMOWであった。海水酸素同位体比と塩分は非常によい相関を示し、その関係は

$$\square \delta^{18}\text{O}_{\text{seawater}} = 0.23 \times \text{SSS} - 7.66 \quad (1)$$

であった（図3）。この関係は、西太平洋から中央太平洋に関して報告されている海水酸素同位体比と塩分の関係式³⁾と一致しており、マジユロ環礁は西太平洋の塩分の表す代表的な地点であることを確認した。

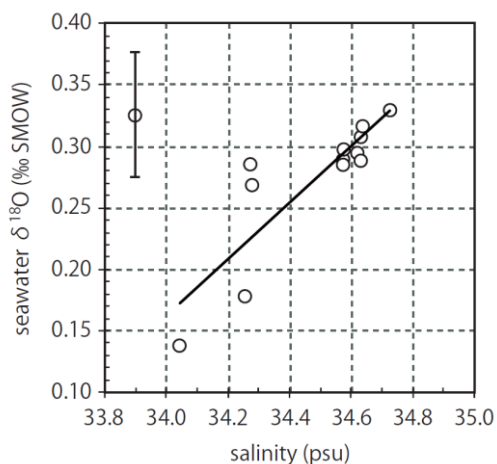


図3 マーシャル諸島における海水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{seawater}}$) と塩分の相関 (2008年8月～2009年7月)

5) 塩分の復元

現生サンゴの平均酸素同位体比は-5.27‰、サンゴから見積もった平均水温は29.0度である。サンゴ酸素同位体比と水温の関係式 [$\square \delta^{18}\text{O}_{\text{coral}} - \square \delta^{18}\text{O}_{\text{seawater}} = -1.56 - 0.14 \times \text{SST}$] ⁴⁾ と海水酸素同位体比と表層塩分の関係式 (式(1)) を使って、平均塩分を見積もると34.9psuとであった。これはマジユロにおいて観測した塩分の平均値 (34.49psu) と誤差の範囲で一致する。

6) 1000年前の気候復元

サンゴから復元した1000年前の水温は27.4度で、現在 (29.1度) より約1.6度低かったことが分かった。1000年前については、中央太平洋のサンゴ年輪試料の分析から寒冷または乾燥した気候が、マカッサル海峡沖の海底コア試料の分析からも現在よりも寒冷であったことが報告されており、熱帯中央太平洋から西太平洋一帯が寒冷な状態であったことを示した。

1000年前の水温低下 (1.6度) は、酸素同位体比に換算すると0.23‰であり、現生サンゴの酸素同位体比との差 (0.18‰) は水温によって説明できる。このことから、1000年前の塩分は、現在とほとんど変わらなかったことが推測される。マーシャルでは、エルニーニョ時には降水量が減少するが、水温の変動は明瞭ではない。そのため、1000年前のマジユロの寒冷な状態はENSOでは説明できない。

熱帯太平洋中央部パルミラ島の化石サンゴの酸素同位体比分析から、同時代は寒冷で乾燥した状態であったことが報告されている⁵⁾。パルミラ島はラニーニャ時に水温が低下し、降水量が減少

することから、この時代はラニーニャが強い状態（ラニーニャライク）であったと言われる。一方、西太平洋のインドネシア沖の海底コアの分析からは、エルニーニョが強い状態が指摘されている⁶⁾。本研究の結果から、ENSOに特有な降水量のシグナルは検出されなかったことから、また、熱帯太平洋全体が現在よりも寒冷な状態であったことから、ENSOとは別の気候システムが働いていた可能性が考えられる。

熱帯西太平洋における表層海水温の低下は、アジア夏季モンスーンの弱化をもたらす⁷⁾。堆積物コアの分析から同時期にはアジアモンスーンが弱まっていたことが指摘されており^{8,9)}、本研究によって示した熱帯西太平洋の水温低下によるアジアモンスーンの弱化の可能性と一致する。本研究は、アジアモンスーンの直接的な影響を受けない地域での初めての結果で、2100年前の熱帯西太平洋の気候とアジアモンスーン変動との関係を指摘した。

7) 2100年前の気候復元

サンゴから復元した2100年前の水温は28.7度で、現在（29.0度）と同程度である。そのため、現生と化石サンゴの酸素同位体比の差（0.29‰）は塩分の変化で説明でき、2100年前は現在よりも乾燥した（塩分が高い）状態であったことを示した。

マジュロはエルニーニョ時に降水量が減少することから、約2100年前の乾燥した状態はエルニーニョが強かった状態を示していると考えられる。熱帯域の化石サンゴ記録¹⁰⁻¹²⁾、各地の地質記録¹³⁾、モデルシュミレーションを用いたENSO変動の復元結果¹⁴⁾等から、約2000年前にENSOの強度、頻度が強くなったことが示されており、本結果と一致する。

（2）ツバル国フナフチ環礁フォンガファレ島における窒素負荷とサンゴの大量斃死

ツバルの首都フナフチ環礁の人口が密集しているフォンガファレ島のラグーン側では、枝ミドリイシ群集が立ち枯れて、大型藻類におおわれている。我々は、同島のハマサンゴ年輪と立ち枯れサンゴの斃死年代を放射性炭素濃度（ $\Delta^{14}\text{C}$ ）によって特定するとともに、窒素負荷の歴史の変遷を窒素同位体比（ ^{15}N ）から見積もって、同島の人為ストレスの変化とサンゴ群集の斃死の関係を明らかにした。

フォンガファレ島のハマサンゴ年輪には、1975-1993年に成長の間隙が認められ、1975年にいったん群体の成長が止まっている（図4）。一方、立ち枯れた枝サンゴ先端（死亡時）の $\Delta^{14}\text{C}$ は、67-108‰であった。これを、同じフナフチ環礁で人為影響が少ないフナファラ島で採取された、継続的な年輪を持つハマサンゴの $\Delta^{14}\text{C}$ 変化カーブにプロットすると、斃死年代は1970年代前半か1990年代と推定される（図5）。ハマサンゴの成長がとまった年代との対比から、ここでは、1970年代前半にサンゴの大量斃死をもたらすイベントがあったと推定する（現在、枝サンゴ基部の $\Delta^{14}\text{C}$ の測定によって、斃死年代の特定を試みている）。フォンガファレ島のハマサンゴ年輪の ^{15}N は、1970年代前半に11.5‰のピークを持ち、現在も10‰と高い（図6）。現在の海藻の ^{15}N や栄養塩濃度からも、フォンガファレ島では現在窒素負荷が大きい。

フナフチ環礁では、1972年に台風Bebeが直撃、外洋側に19kmにわたってストームリッジが形成された。サンゴの斃死はこの台風によるものである可能性もある。しかし、フナフチ環礁の他の島では同じハビタットに健全な枝サンゴ群集が見られる。フォンガファレ島では1970年代半ば以降人口が急増しており、生活排水や家畜の尿尿などの窒素負荷の増加によって、台風による斃死

後、サンゴが回復できなかつた可能性が高い（図7）。

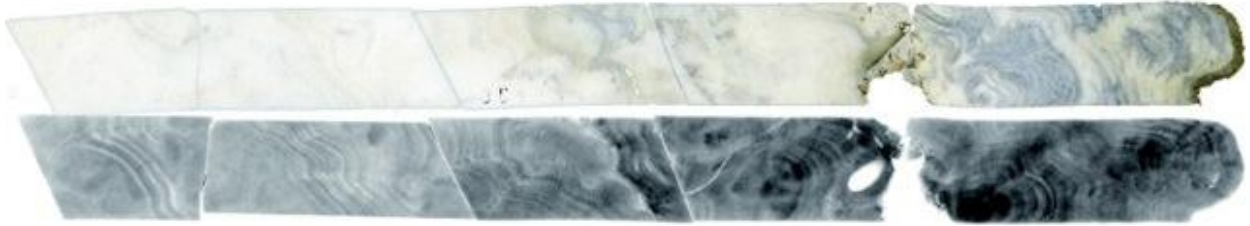
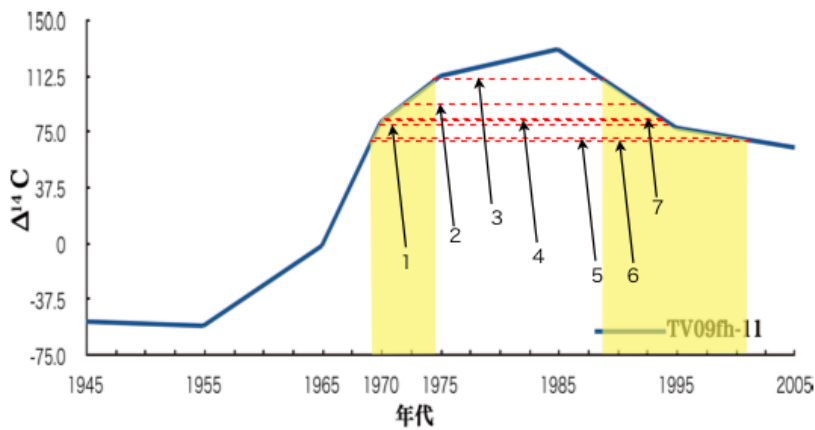


図4 ツバルフォンガファレで採取した、ハマサンゴコア試料のスラブ写真（上）とその軟X線写真（下：白い部分は骨格密度の高い季節を示す）。右が頂部。全長63cmで、頂部から17cmに成長の間隙が見られる。



TV09fh-11と立ち枯れサンゴの $\Delta^{14}\text{C}$
 赤点線：立ち枯れサンゴの $\Delta^{14}\text{C}$ の値、1：TV-smAC-1、2：TV-smAC-1-2、3：TV-smDeadAC、4：TV-smTgN164、5：TV-smTgN182、
 6：HighSchool沖3m、7：HighSchool沖1m
 黄色：立ち枯れサンゴが死んだと考えられる2つの時期

図5 フナファラ島サンゴ年輪（青線）と立ち枯れサンゴ（赤）の $\Delta^{14}\text{C}$ 変化

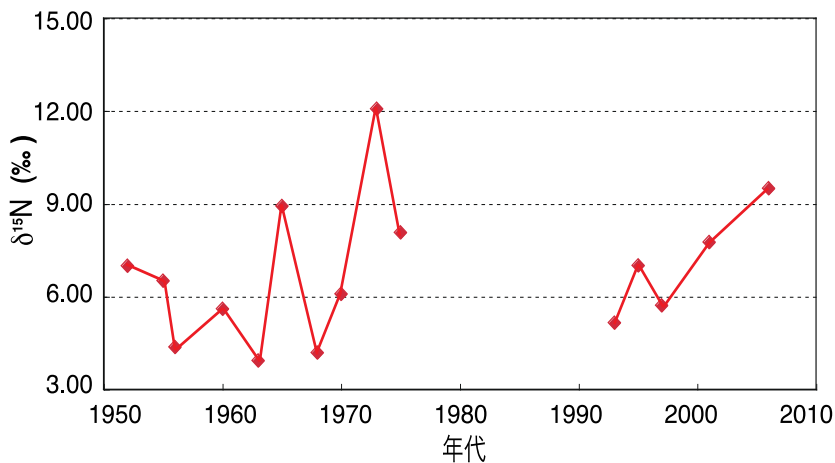


図6 フォンガファレ島ハマサンゴ年輪の ^{15}N 変化。間隙は、ハマサンゴ年輪が途切れていた期間。



図7 ツバルのフォンガファレ島沖のサンゴは立ち枯れて、大型藻類におおわれている。

(3) 州島地形

マジュロ環礁ローラ島においては、州島の幅は最大1200mで、外洋側から標高4mのストームリッジ、1～2mの中央凹地、3mのラグーン側リッジからなる。構成物は、ストームリッジはサンゴ礫であるが、島のほとんどは有孔虫、サンゴなどの粗粒砂である。島の形成は、3600年前に島の外洋側にサンゴ礁が形成されたのち、2000年前に先ず中央凹地が海面上に作られ、その後2000年かけて外洋側とラグーン側それぞれに側方成長して現在に至った。ラグーン側への堆積速度は、 $380\text{m}^3/\text{年}$ である。ローラ島の平均海面上の体積は、平面形が三角形の島の底辺3800m・高さ1200mに平均標高1.8mを描けて、 $4.1\times 10^6\text{m}^3$ と見積もられた。

フナフチ環礁フォンガファレ島においては、州島の幅は最大650mで、外洋側から標高4mのストームリッジ、1～2mの中央凹地、2.5mのラグーン側リッジからなる。構成物は、ストームリッジはサンゴ礫であるが、島のほとんどは有孔虫、サンゴなどの粗粒砂である。とくに有孔虫が構成物の4分の3をしめる。島の形成は、1500年前までにサンゴ礁礁原が形成され、これとほぼ同時に中央凹地が海面上に現れ、その後外洋側とラグーン側それぞれに側方成長して現在に至った。フォンガファレ島の平均海面上の体積は、平面形が三角形の島の底辺2200m・高さ650mに平均標高1.5mを描けて、 $1.1\times 10^6\text{m}^3$ と見積もられた。これはマジュロ環礁ローラ島の4分の1の体積である。

(4) 太平洋島嶼の気候・地形のバリエーション

マジュロ、ツバルともに、熱帯でも赤道からやや離れた高降水量帯で、ときに台風に襲われるという気候条件のため、降水が多いが堆積物が粗粒砂～礫と粗いため、淡水レンズの発達が悪い。島民は、比較的幅の広い島の淡水レンズを活用するか（マジュロ環礁ローラ島）、天水を貯留して水資源として利用している（マジュロ環礁、ツバル）。ここでは、島の生活排水負荷は、潮汐変化に伴う自然の排水システムによって、効率的に海洋にフラッシュアウトしている。

一方、赤道直下に位置して、降水が乏しく台風のないキリバスでは、淡水レンズの規模は小さ

いが、島を構成する堆積物の粒径が小さいため、その帯水能力が高く、島民は有効に淡水レンズを利用している。そのため、島の生活排水負荷を、できる限り減少させなければならない。

このように、地球温暖化に対する環礁州島の対応策を考える上で、気候-地形-水という自然システムと、人間社会システムとの相互関係を総体としてとらえることが必要である（図8）。

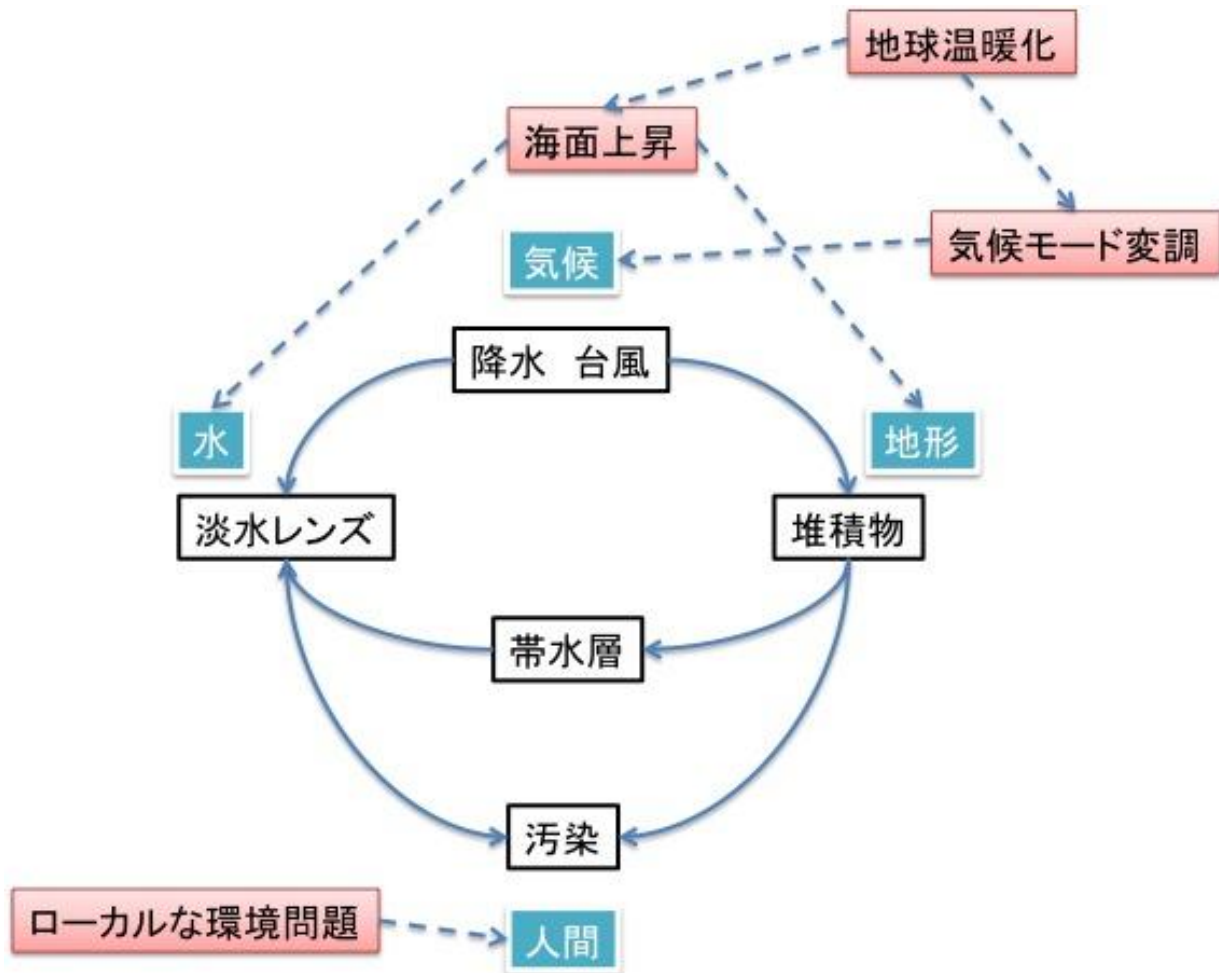


図8 環礁州島の気候-地形-水システムと人間システムと地球温暖化とローカルな環境問題の関係.

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

マジュロの最近10年の酸素同位体比の平均値は60年前の値と比べて低く、最近に高海水温 and/or 高降水量の状態になっている可能性を指摘した。中央～西熱帯太平洋のサンゴ酸素同位体比記録との比較から、マーシャルを含む中央太平洋熱帯域では、近年一様に温暖化・淡水化が起きていることが分かり、エルニーニョの頻度の増加、また太平洋熱帯海域全体がエルニーニョ様の状態になっていることを推測した。さらに、1000年前および2000年前は現在に比べて低海水温 and/or 低降水量の状態であることが分かった。こうした数十年スケールおよび化石試料を用

いた数千年スケールでの水温・降水量変動の復元によって、熱帯太平洋の自然の気候サイクルの変遷を定量し、温暖化などの人為変動を含む現在の気候変動の変調の位置づけを行うことができる。また、本研究で明らかにした州島地形の形成過程と海面上昇による変化によって、地下水の賦存ポテンシャルの変化を決めることができる。本研究による結果は、環礁州島の環境収容力を規定する水資源を評価する上で重要である。

(2) 環境政策への貢献

本研究によって、太平洋島嶼国の気候変動は、地球温暖化によってエルニーニョのモードが変動していることが明らかになった。地球温暖化はあくまでバックグラウンドとしての条件の変化（温暖化予想（projection）であって、予測（prediction）ではない）であり、直接それぞれの地域の気候変動に結びつけること（たとえば温暖化によって気温が上昇する、降水量が増加する）は、科学的な態度ではない。政策決定にもなら活用される情報を与えない。今後、本研究の成果に基づいて、温暖化という異なるモード下での気候変動「予測」を進めることが、島嶼国の温暖化適応にとって、きわめて重要である。

本研究によって、島の地形の形成・維持に、有孔虫が大きな役割をもっており、その分布が外洋側礁原の低潮位上であること、その生産が人間活動によって劣化していることが示された。この成果に基づいて、海面上昇に対する環礁州島の維持・再生をはかる上で、有孔虫の生息域の保全・再生を図ることが必須であることを示した。環礁州島の国土の維持を、海岸管理計画などを通じて具体化する上で、この知見はきわめて重要である。また、環礁州島への人間居住が島の形成とほぼ同時の2000年前だったこと、それ以降2000年間人々の伝統的土地管理システムが途切れず維持されてきたこと、伝統的土地管理システムが崩壊し地形の維持システムが機能しなくなったのが、たかだか最近数10年の出来事であることは、地球環境問題に対する地域の環境政策、環境と土地の保全・管理政策を立てる上で、伝統的システムの意義を再評価する上で、重要な知見である。

今後、マーシャル諸島共和国政府の「海岸管理計画」と「海洋資源管理計画」ワーキンググループと密接にコンタクトして、成果の現地への適用を進めたい。両計画は、マーシャル諸島のものであるが、こうした計画を持っている島嶼国は少なく、計画に盛り込むべき内容は環礁島嶼国に共通のものが多いため、両計画へ成果をインプットすることができれば、他の島嶼国の計画策定にもモデルとなり、成果を一般的に適用することができる。

一方ツバルは、海面上昇によって水没の危機にある国として、国際的に注目されている。2004年にツバルは、「気候変動に対する国家持続可能な開発のための適応プログラム」を策定して、先進国の支援を要請している。日本政府も、2007年12月のツバルと日本の首相会談において福田首相が支援を約束し、2008年1月には鴨下環境大臣、3月には環境省や外務省・JICAの調査団が派遣され、具体的な支援策が検討されている。本課題代表者の茅根は外務省・JICAの調査団に参加して本研究課題の成果を支援策にどのように活かすかについて、具体的な助言を行っている。ツバル政府の要請は、堤防の建設や埋立てなどハードが中心である。しかしながら本研究で明らかにしたように、島の形成には生態的な過程が重要であり、ツバルをはじめとする環礁の島の水没は、海面上昇に対する水没という単純な図式だけではなく、グローバルな問題に人口増加や経済発展などローカルな問題が重ね合わさって起こっている。島を維持する生態学的なメ

カニズムを理解しないままにそうした対策をとると、長期的には島の維持機構が破壊されてしまう可能性が高い。海面上昇に対する施策を建てるためには、島の形成・維持メカニズムの理解に基づいて、現在の問題を取り除き、将来の海面上昇に対する復元力の高い島を再生することが必要である。

6. 引用文献

- 1) Uchida, A. *et al.* High sensitivity measurements of nitrogen isotopic ratios in coral skeletons from Palau, western Pacific: Temporal resolution and seasonal variation of nitrogen sources. *Geochemical Journal* **42**, 255-262 (2008).
- 2) Correge, T. *et al.* Evidence for stronger El Nino-Southern Oscillation (ENSO) events in a mid-Holocene massive coral. *Paleoceanography* **15**, 465-470 (2000).
- 3) Fairbanks, R. G. *et al.* Evaluating climate indices and their geochemical proxies measured in corals. *Coral Reefs* **16**, S93-S100 (1997).
- 4) Asami, R. *et al.* Carbon and oxygen isotopic composition of a Guam coral and their relationships to environmental variables in the western Pacific. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **212**, 1-22, doi:10.1016/j.palaeo.2004.05.014 (2004).
- 5) Cobb, K. M., Charles, C. D., Cheng, H. & Edwards, R. L. El Nino/Southern Oscillation and tropical Pacific climate during the last millennium. *Nature* **424**, 271-276, doi:10.1038/nature01779 (2003).
- 6) Tierney, J. E., Oppo, D. W., Rosenthal, Y., Russell, J. M. & Linsley, B. K. Coordinated hydrological regimes in the Indo-Pacific region during the past two millennia. *Paleoceanography* **25**, doi:10.1029/2009pa001871 (2010).
- 7) Cai, Y. J. *et al.* The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation. *Earth and Planetary Science Letters* **291**, 21-31, doi:10.1016/j.epsl.2009.12.039 (2010).
- 8) Zhang, P. Z. *et al.* A Test of Climate, Sun, and Culture Relationships from an 1810-Year Chinese Cave Record. *Science* **322**, 940-942, doi:10.1126/science.1163965 (2008).
- 9) Yamada, K. *et al.* Late Holocene monsoonal-climate change inferred from Lakes Ni-no-Megata and San-no-Megata, northeastern Japan. *Quaternary International* **220**, 122-132, doi:10.1016/j.quaint.2009.09.006 (2010).
- 10) Tudhope, A. W. *et al.* Variability in the El Nino - Southern oscillation through a glacial-interglacial cycle. *Science* **291**, 1511-1517 (2001).
- 11) McGregor, H. V. & Gagan, M. K. Western Pacific coral delta O-18 records of anomalous Holocene variability in the El Nino-Southern Oscillation. *Geophysical Research Letters* **31**, doi:10.1029/2004gl019972 (2004).
- 12) Gagan, M. K., Hendy, E. J., Haberle, S. G. & Hantoro, W. S. Post-glacial evolution of the Indo-Pacific Warm Pool and El Nino-Southern Oscillation. *Quaternary International* **118-119**, 127-143, doi:Doi 10.1016/S1040-6182(03)00134-4 (2004).
- 13) Conroy, J. L., Overpeck, J. T., Cole, J. E., Shanahan, T. M. & Steinitz-Kannan, M. Holocene changes in eastern tropical Pacific climate inferred from a Galapagos lake sediment record. *Quaternary Science Reviews* **27**, 1166-1180, doi:Doi 10.1016/J.Quascirev.2008.02.015 (2008).

- 14) Clement, A. C., Seager, R. & Cane, M. A. Suppression of El Nino during the mid-Holocene by changes in the Earth's orbit. *Paleoceanography* **15**, 731-737 (2000).

7. 国際共同研究等の状況

本研究の成果に基づいて、特にツバルの海岸の生態工学的再生を目指した地球規模課題対応国際科学技術協力事業「海面上昇に対するツバル国の生態工学的維持」（代表者：東京大学 茅根 創教授）が立ち上げられた。ツバル側のカウンターパートは、環境局長のマタイオである。また SOPAC、南太平洋大学とも共同で進めている。本事業は、地球環境研究総合推進費で得られた成果のうち、汚染の低減やサンゴ・有孔虫の増殖によって生態系を積極的に回復させて砂生産を増大させ、島の砂浜を回復させることを目標としている。この目標は、本推進費で得られた科学的知見をもとに立てられたもので、もし本推進費の知見がなかったら護岸など長期的な島の形成メカニズムを損なうような対策のみに終わってしまったかもしれない。すなわち、本推進費課題の科学的成果を具体的かつ有効な対策につなげることができた。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上发表

<論文（査読あり）>

- 1) 中山裕郎・飯嶋寛子・中村修子・茅根 創：GSJ炭酸塩標準物質（JCp-1, Jct-1）の炭素および酸素安定同位体比。地質調査研究報告，59，461-466 (2008)。
- 2) 桑原祐史・横木裕宗・佐藤大作・山野博哉・茅根 創：ツバル国フナフチ環礁における沿岸域土地被覆変化の解析。沿岸域学会誌，21(2)，21-32 (2008)。
- 3) Murase, T., Tanaka, M., Tani, T., Miyashita, Y., Ohkawa, N., Ishiguro, S., Suzuki, Y., Kayanne, H. and Yamano, H.: A photogrammetric correction procedure for light refraction effects at a two-medium boundary. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **74**, 1129-1136 (2008).
- 4) Uchida, A., Nishizawa, M., Shirai, K., Iijima, H., Kayanne, H., Takahata, N. and Sano, Y.: High sensitivity measurements of nitrogen isotopic ratios in coral skeletons from Palau, western Pacific: Temporal resolution and seasonal variation of nitrogen sources. *Geochemical Journal*, **42**, 255-262 (2008).
- 5) Fujita, K., Osawa, Y., Kayanne, H., Ide, Y. and Yamano, H.: Distribution and sediment production of large benthic foraminifers on reef flats of the Majuro Atoll, Marshall Islands. *Coral Reefs*, **28**, 29-45 (2009)
- 6) Yamaguchi, T., Kayanne, H. and Yamano, H.: Archaeological investigation of the landscape history of an oceanic atoll: Majuro, Marshall Islands. *Pacific Science*, **63**, 537-565 (2009).
- 7) Osawa, Y., Fujita, K., Umezawa, Y., Kayanne, H., Ide, Y., Nagaoka, T., Miyajima, T. and Yamano, H.: Human impacts on large benthic foraminifers near a densely populated area of Majuro Atoll, Marshall Islands. *Marine Pollution Bull.*, **60**, 1279-1287 (2010).
- 8) Hongo, C. and Kayanne, H.: Relationship between species diversity and reef growth in the Holocene at Ishigaki Island, Pacific Ocean. *Sedimentary Geology*, **223**, 86-99 (2010).

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 茅根 創：サンゴ年輪年代学.遺伝, 62(6), 95-100 (2008).
- 2) 茅根 創：島嶼国における環礁州島の現状と課題.海岸, 48(1), 27-32 (2008).
- 3) 茅根 創:サンゴ礁. 東京大学理学系研究科・理学部編「東大式 現代科学用語ナビ」148-149 (2009).
- 4) 茅根 創：環礁州島の地形形成維持に関わる生態プロセス. 水環境学会誌, 33. 245-248 (2010).

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 茅根 創：地球温暖化現象とツバル問題. 太平洋諸島地域研究所春期研究会（2008.5）.
- 2) 茅根 創・中村修子・飯嶋寛子・T. R. McClanahan・S. Behera・山形俊男：ケニアのサンゴ年輪による過去115年間のインド洋ダイポールモードの復元. 日本地球惑星科学連合2008年大会（幕張, 2008.5）.
- 3) 中村修子・茅根 創・飯嶋寛子・T. R. McClanahan・S. Behera・山形俊男：ケニアのサンゴ年輪による過去115年間のインド洋ダイポールモードの復元. バイオミネラリゼーションと石灰化-遺伝子から地球環境まで-（東京大学海洋研究所, 2008.6）.
- 4) 茅根 創・中村修子：大学体験講義. 横浜共立学園高等学校（2008.7）.
- 5) Kayanne, H., N. Nakamura, H. Iijima, T. R. McClanahan, S. K. Behera and T. Yamagata, Indian Ocean Dipole Index for the Last 115 Years Recorded in Kenyan Coral Annual Bands, 11th International Coral Reef Symposium, (Fort Lauderdale, Florida, USA, 2008.7)
- 6) Iijima, H., H. Kayanne, and N. Nakamura, Past 100 years Inter-annual Sea Surface Salinity Changes in the Western Pacific Based on Coral Isotope Analysis, 11th International Coral Reef Symposium, (Fort Lauderdale, Florida, USA, 2008.7)
- 7) Kayanne, H., N. Nakamura, H. Iijima, T. R. McClanahan, S. K. Behera and T. Yamagata, Decadal variability of IOD over the last 115 years recorded in Kenyan coral, 2008 Western Pacific Geophysics Meeting (Cairns, Queensland, Australia, 2008.7-8)
- 8) 茅根 創・本郷宙軌・岡地 賢・井手陽一・高野弘之・丸山將吾：沖ノ鳥島の現在・完新世のサンゴ構成と地形. 日本サンゴ礁学会第11回大会（静岡グランシップ, 2008.11）.
- 9) 茅根 創：地球温暖化の影響と適応-環礁の水没と海面上昇. 東京地学協会秋季公開講演会（2008.10）.
- 10) 中村修子・茅根 創・飯嶋寛子・T. R. McClanahan・S. K. Behera・山形俊男：ケニアのサンゴ年輪に記録された20世紀後半のインド洋のモードシフト. 第12回 日本サンゴ礁学会、（沖縄県本部公民館, 2009.11).
- 11) 細井豪・中村修子・茅根 創・山野博哉・高畑直人・佐野有司：ツバルにおけるハマサンゴ年輪の $\delta^{15}\text{N}$ 変動と人為影響. 第12回 日本サンゴ礁学会（沖縄県本部公民館, 2009.11).
- 12) 茅根 創：地球温暖化に対するサンゴ礁の応答. 第12回 日本サンゴ礁学会、サンゴ礁学シンポジウム（沖縄県本部公民館, 2009.11).
- 13) 中村修子・茅根 創・飯嶋寛子・T. R. McClanahan・S. K. Behera・山形俊男：ケニアサンゴ年

輪から復元された20世紀のインド洋モードシフト. JAMSTEC主催 古海洋シンポジウム (東京大学海洋研究所, 2010.1).

- 14) 茅根 創・細井 豪・中村修子・佐野有司・梅澤 有・山野博哉：ツバル国フナフチ環礁フォンガファレ島における窒素負荷とサンゴの大量斃死. 第13回日本サンゴ礁学会 (つくばカピオ, 2010.12) .
- 15) 中村修子・茅根 創・飯嶋寛子・T. R. McClanahan・S. K. Behera・山形俊男：インド洋ケニアのサンゴ酸素同位体比に現れる気候シグナルの解析. 第13回日本サンゴ礁学会 (つくばカピオ, 2010.12) .
- 16) 飯嶋寛子・茅根 創・山野博哉：化石サンゴの酸素安定同位体比および Sr/Ca による西太平洋熱帯域の水溫復元. 第13回日本サンゴ礁学会 (つくばカピオ, 2010.12) .

(3) 出願特許

とくに記載すべき事項はない。

(4) シンポジウム、セミナーの開催 (主催のもの)

とくに記載すべき事項はない。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 2008年10月2日 朝日ニュースター「地球異変 ～南太平洋 ツバル・キリバス 沈む島」
- 2) 2008年10月26日 読売新聞「途上9か国と科学技術外交」
- 3) 2009年5月22日 NHK総合 ニュースウォッチ9「海面上昇のツバル・ゴミ問題も深刻」
- 4) 2009年6月18日 NHK BS1 今日の世界「グリーン・アース：ゴミがサンゴ礁の島を破壊する」
- 5) 2009年12月16日 読売新聞夕刊「温暖化って！？ 星の砂」
- 6) 2009年12月17日 京都新聞「ツバルと「水没報道」」
- 7) 2010年9月6日 朝日新聞「星砂育て 陸になれ」
- 8) 2010年9月8日 朝日小学生新聞「水没する島「星砂」で救え」
- 9) 2010年10月14日 (木) NHKラジオ あさいちばん エコトピックス「生物の力で島を水没から守れ！」
- 10) 2010年11月10日 (水) 7:42- CBCラジオ「気分爽快！多田しげおの朝からPON」
- 11) 2010年11月15日 (月) NHK World (Radio Japan) Saving a small-island nation with the aid of "star sand".
- 12) 2010年12月号 ジュニアアエラ「星砂よ、陸になれ」
- 13) 2010年8/9月号 TURAGA、Fiji: "Sea level rise in the Pacific in an alarming state JICA、JST、SATREPS to help Tuvalu.
- 14) 2010年11月号 Tiawan Panorama: "Tuvalu: King-hit by the Tides"
- 15) 2011年2月号 グリーン・パワー「南の島の水没、「星砂」が救う？」
- 16) 2011年2-3月号 Science Window 人と大地「ツバル／フナフチ環礁」

(6) その他

とくに記載すべき事項はない。