

B-15 環礁州島からなる島嶼国の持続可能な国土の維持に関する研究

(1) 環礁州島の自然(地形-生態)プロセスに関する研究

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〉 琉球大学 理学部 物質地球科学科 藤田 和彦

東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 安河内 貫・大澤 葉子

平成15~19年度合計予算額 57,190千円

(うち、平成19年度予算額 13,300千円)

※上記の合計予算額には、間接経費13,197千円を含む。

[要旨] 海面上昇に対する環礁州島地形の応答を考える上で、環礁州島の地形構成とその形成・維持機構はもっとも基本的な情報であるにも関わらず、これまでほとんど調べられていなかった。本研究では、環礁州島の地形と堆積物の構成、年代と形成・維持に関わる要因を、マジュロ環礁とフナフチ環礁における現地調査に基づいて明らかにした。その結果、環礁州島の地形は、海側からサンゴ礁礁原-ストームリッジ-中央凹地-ビーチリッジの順に配列することが明らかになった。ストームリッジと中央凹地の下部はサンゴ礫から、中央凹地の上部は無層理の粗粒~中粒砂層から、ビーチリッジと中央凹地の上部の一部は葉理の発達した中粒砂からなる。年代測定の結果は、中央凹地下部の礫層と無層理砂層は、海面低下に伴って2000年前に数10年以内に形成されたことを示す。人々の初期居住は、島の形成とほぼ同時であった。

州島の構成物としては、有孔虫砂の寄与がもっとも大きい。マジュロ環礁の礁原に多い有孔虫は*Calcarina*と*Amphistegina*で、風上側に位置する外洋側礁原の低潮位線付近や州島間の水路に多く棲息する。生産量は、風上側かつ自然条件下の地域の外洋側礁原でもっとも多く、礁湖側や風下側、人為的影響下の礁原では少ない。さらに、有孔虫の棲息密度と州島の人口には負の相関が認められる。マジュロ環礁では、人口の増加や人間活動によって地下水の栄養塩濃度が高くなっており、栄養塩濃度の上昇が有孔虫へ直接的・間接的影響を与えることで、有孔虫の棲息密度が減少したと推測される。マジュロ環礁全体では人為影響以前には、年間15000m³の有孔虫砂生産ポテンシャルがあり、そのわずか3%が沿岸漂砂によって運搬・堆積して島の地形が維持されていたと推定される。しかしながら現在は、生産ポテンシャルが大幅に減少してしまった。

[キーワード] 環礁州島、地形、堆積物、有孔虫、完新世

1. はじめに

環礁とはサンゴ礁が礁湖を囲んでリング状に連なったものであり、環礁上の州島(以下環礁州島)は、炭酸塩生物遺殻が礁原に集積して作られた。環礁は、第四紀の海水準変動の影響を受け

て形成された。環礁の形成史において、完新世前期の海面上昇によるサンゴ礁の形成については多くの研究がなされてきたが、その後の、完新世中期から後期の、安定した（もしくは下降した）海面下に起こったと考えられる環礁州島の地形発達については、ほとんど研究がない。低平な環礁州島には、太平洋を中心に数百万人が暮らしており、今世紀中に予期される海面上昇によって住処を失うことが危惧されているため、海面変動に対する州島の形成メカニズムを知ることは重要である。

これまでの研究で、環礁州島が太平洋域で確認されている中期～後期完新世における1～2mの高海面から、その後現在に向かっての海面低下の時期に形成されたことが示唆されている。しかし、海面変動と比較するための州島堆積物の放射性炭素年代が、試料が異地性であるため正しい堆積年代を示さないことと、これまでの研究が州島の拡大史を復元するのみで形成のメカニズムを考えてこなかったために、海面変動と州島形成の因果関係は不明である。州島形成のメカニズムは、州島を堆積させる物理的な要因と、州島の堆積物を供給する生態的な要因によると考えられる。しかし、予想される様々な要因と州島形成のメカニズムを結びつけた、州島形成を説明する統一的なモデルはこれまで存在しなかった。

環礁州島の堆積物は、サンゴ、石灰藻、有孔虫などサンゴ礁石灰化生物の破片や殻によって構成される。マジュロ環礁における地形学および堆積学的研究により、州島堆積物の3割以上が有孔虫の遺骸殻で占められることが明らかにされた。そのため、州島の形成過程を解明したり、将来の海面上昇による州島の地形変化を予測したりする上で、有孔虫の供給源と供給量を把握することが必要である。環礁に分布する有孔虫に関しては、これまで多くの研究が行われてきた。しかし、ほとんどの研究が堆積物中の遺骸個体を研究対象としているため、生体有孔虫の分布や棲息密度については詳しく理解されていない。いくつかの先行研究において、生体有孔虫が風上側の礁原や水路に多いことが報告されている。このことは有孔虫の分布が波浪や潮流などの流動環境条件に影響を受けている可能性を示唆する。また、人口が多い州島付近の礁原では生体有孔虫が近年見当たらないことも報告されている。このことは、大型有孔虫が人為的影響を受けて減少しており、結果的に州島を造る堆積物の生産量も減少している可能性を示唆する。また、もしも有孔虫の棲息分布が人為的影響を受けているのであれば、その原因を究明する必要がある。

2. 研究目的

本研究では、西太平洋型の2つの環礁州島：マーシャル諸島マジュロ環礁ローラ島とツバルのフナフチ環礁フォンガファレ島の調査に基づいて、州島の基本的な地形構成と構成物、形成年代を明らかにし

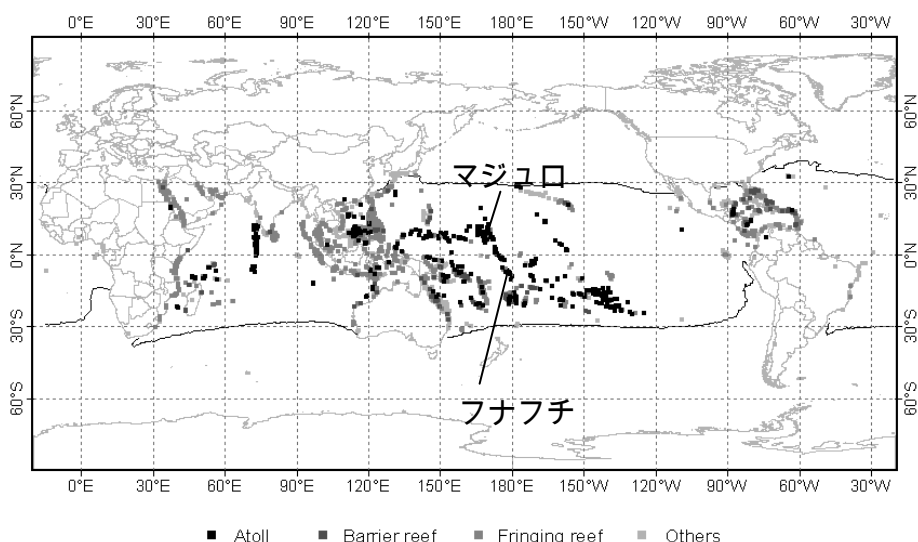


図1 世界の環礁分布（黒点）と調査を実施した環礁。

て、州島形成のメカニズムとそれを規定する要因を明らかにする。

さらに、マジュロ環礁のサンゴ礁において、有孔虫の生態分布と棲息密度とその規定要因、とくに人為影響を明らかにするとともに、その年間堆積物生産量を推定する。さらに、マジュロ環礁全体での有孔虫砂の収支を求める。

3. 研究方法

(1) 地形調査

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う。さらに、有孔虫の棘の残り具合(残棘率; spine ratio)から、州島の主な堆積物である有孔虫の供給源を求め、そこでの実際に堆積量に見合う有孔虫の生産量があるかを確認する。また、海面低下が州島形成の物理要因に果たす役割を数値モデルで実験する。これらによって、海面変動に対する州島形成のメカニズムを明らかにし、太平洋及び世界の環礁州島の形成を規定する要因を求める。

(2) 有孔虫調査

1) 生態分布、棲息密度、生産量

マジュロ環礁において、卓越風に対する位置、州島の有無、州島の人口の違いを考慮して測線と調査地域を決定した(図2)。有孔虫の分布と卓越風に対する位置との関係を調べるために、卓越風に対して外洋側礁原が風上側に当たるエネコ島と、風下側に当たるロングアイランド島を選定した。州島の存在が有孔虫の分布に与える影響を調べるために、ローラ島周辺において、北端沖の州島のない礁原、中央部の外洋側礁原と礁湖側の沖に位置するパッチリーフ、南端の外洋側礁原および礁湖側礁原の計6測線を設定した。また、風上側の州島の間位置する水路でも調査した。有孔虫の棲息密度と州島の人口との関係を調べるために、物理環境条件が同じ(卓越風の風上側)でありながら、州島の人口に大きな変化がみられる、マジュロ環礁北東部のエネコ島からデラップ島にかけての地域を選定した。そして、この地域内の計11地点に調査測線を設定した。

図2 マジュロ環礁と調査測線の位置（2重線は地形調査、実線は有孔虫調査の測線）。

本研究では、測線調査法により有孔虫の分布と棲息密度を調べた。各地域で外洋側と礁湖側のサンゴ礁に測線を設定し、岸から沖にかけて10 m毎に底質や底生生物群集を調べることで底質帯を区分した。各底質帯において有孔虫が棲息する底質（海藻や礫）を4試料採取した。採取後、実験室で底質（海藻）から有孔虫を分離した後、染色処理を行い、採取時に生きていた有孔虫（染色した個体、0.5 mm径以上）のみを拾い出し、同定および計数した。得られたデータを基に、棲息密度（個体/m²）を算定した。

得られた棲息密度データと各有孔虫種の年間回転率¹⁾および単位体積あたりの個体数のデータを基に有孔虫の年間堆積物生産量（m³/yr/100 m²）を算出した。

2) 人為的影響による有孔虫の棲息密度低下の原因に関する調査

人口密集域付近の礁原で有孔虫の棲息密度が減少する原因として、水質の違いに着目した。人口の少ない州島と多い州島、さらにその中間の州島の3地域で地下水の水質を調べるために、各地域の井戸から地下水を採水した。合計13地点の地下水の栄養塩濃度、イオン組成、窒素同位体比を測定した。また、エネコ島からウリガ島にかけての調査測線（計11測線）でも岸側と沖側で海水を採水し、栄養塩濃度を測定した。

沿岸に繁茂する海藻の窒素同位体比は、沿岸の栄養塩の起源と流入量を示唆する。そこで、人口の少ない州島と多い州島、さらにその中間の州島の3地域において、礁湖側・外洋側の沿岸で海藻（ウミウチワ属、シオグサ属）を採取し、その窒素同位体比を測定した。

3) 有孔虫砂の収支

1) で求めた有孔虫の単位面積あたり生産量を、研究課題（3）-1) による衛星画像の解析によって求めた有孔虫のハビタット面積にかけ算して、マジュロ環礁全域における有孔虫砂の生産量を求めた。次に、研究課題（3）-2) によるラグーン側海岸に沿った沿岸漂砂ポテンシャル、本研究課題の1) で求めたローラ島の堆積速度と比較して、マジュロ環礁における有孔虫砂の収支をまとめた。

4. 結果・考察

(1) 地形構成と形成過程

図3にマジュロ環礁ローラ島、図4にフナフチ環礁フォンガファレ島を横断する測線の地形断面を示す。州島地形は、海側からサンゴ礁礁原-ストームリッジ-中央凹地-ビーチリッジの順に配列する。この配列は、マジュロ環礁やフナフチ環礁の他の島や、他の環礁でも認められ、台風や暴風の影響下にあつて、過去4000年から2000年前に高海面があつた「西太平洋型」環礁州島の基本的な地形構成である。

図3、4には、トレンチ掘削によって明らかになった両島の堆積物の構成も示す。ストームリッジと中央凹地の下部は主にサンゴ礫から、中央凹地の上部は無層理の粗粒〜中粒砂層から、ビーチリッジと中央凹地の上部の一部は葉理の発達した中粒砂からなる。砂粒分の構成は、有孔虫が半分ほどを占め、以下サンゴ、石灰藻の順である。有孔虫では、*Calcarina* (タイヨウノスナ)が多い。タイヨウノスナのうち棘が残っているものの割合は0〜24%で、北側の葉理を持つ砂層と南側の無層理砂層に多かった。

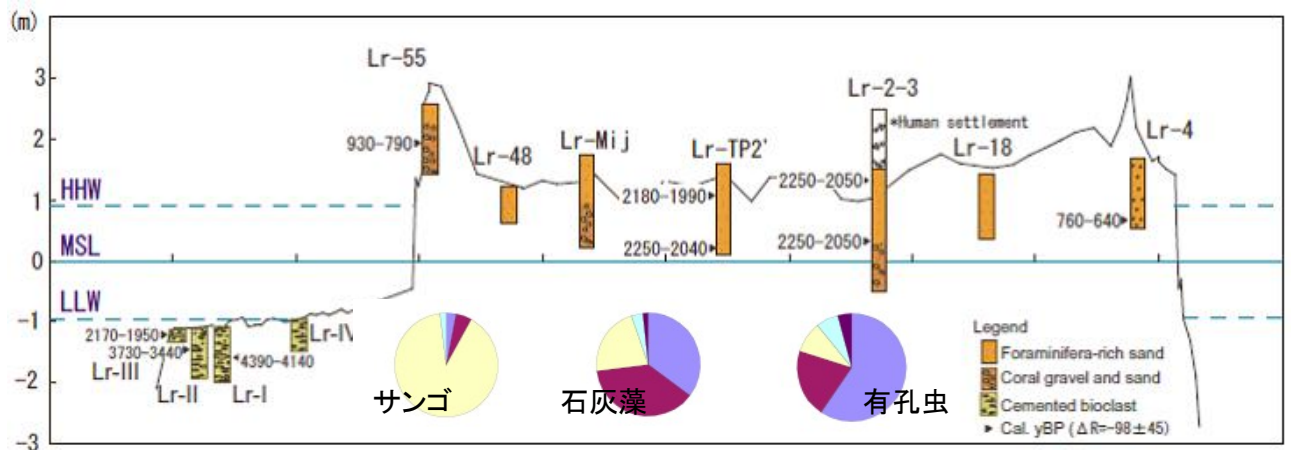


図3 マジュロ環礁ローラ島の地形断面と堆積層。

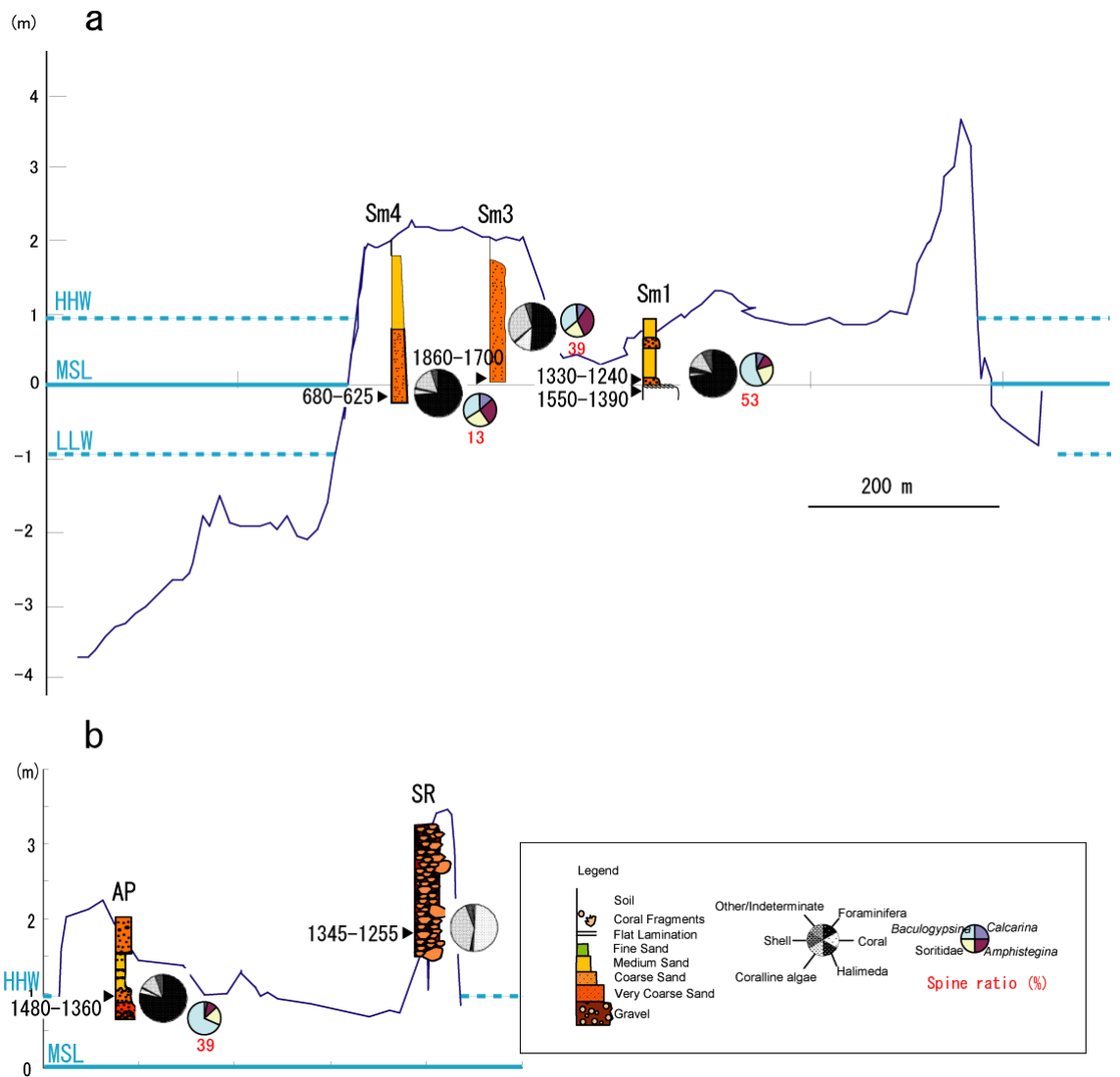


図4 フナフチ環礁フォンガファレ島の地形断面と堆積層。

島の形成過程を明らかにするために年代測定に用いた有孔虫砂、サンゴなどの海洋試料と、文化層の年代決定に用いた炭化物などの陸上試料とを比較する際には、海洋試料のリザーバー効果（大気に比べて海水の放射性炭素濃度が低いため、海洋試料の方が400年前後古い年代になる効果）を見積もることが必要である。マジュロ環礁では、この海洋リザーバー効果が見積もられていなかったため、「(2) 環礁州島の人間居住-自然環境の相互作用に関する研究」によって同じ文化層から出土した陸生試料（炭化物）と海生試料（イルカ類骨）の年代を比較した。その結果平均的なリザーバー効果からどれくらいずれるかという ΔR の値として、 -35 ± 25 年を得た。

砂粒分のうち、棘が残っているタイヨウノスナの年代は、中央のサンゴ礫層と無層理砂層のもの7点の試料は、2000-2200年前と放射年代の測定誤差の範囲で一致した。この年代は、マジュロ環礁ロングアイランド島で発見した当時の低潮位面を示す化石マイクロアトールの年代（およそ

2200 年前) と一致した。この化石マイクロアトールの高度から、当時の海面は現在よりも1.4 m高かったこと、2000年前以降現在に向かって海面が低下したことがわかった(図5)。当時の堆積相は二つの島で共通して、下部に礫質相、上部に砂質相という構造になっており、それぞれの年代はほぼ同じであった。これらのことから、海面低下が開始した頃、礁原の最大エネルギーの減少によって強い波浪状態における堆積が開始し、数100年のうちに州島の中心部分が形成されたことがわかった。それまで州島が堆積しなかったのは、高海面のため礁原の波浪エネルギーが強すぎて礫質なものを堆積できなかったためと考える。

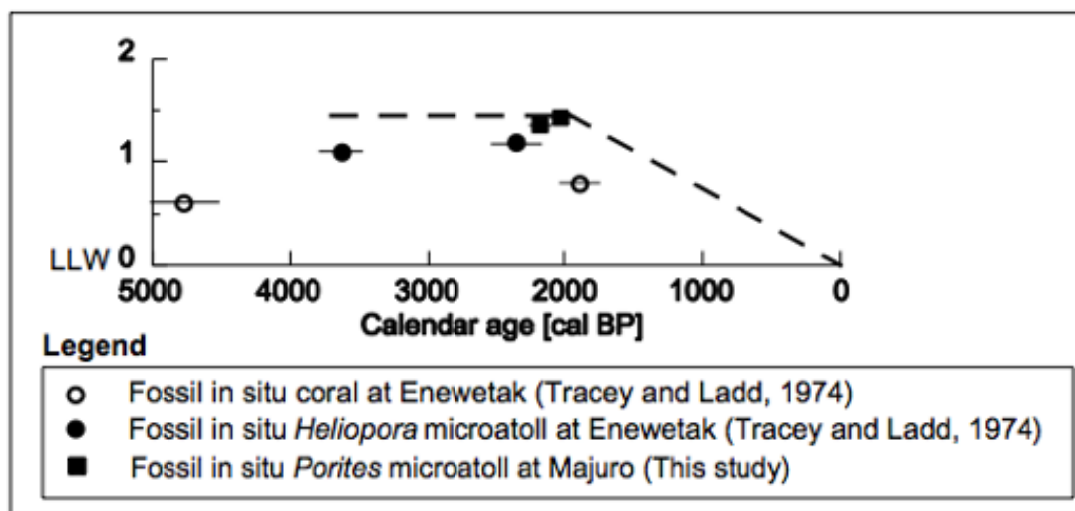


図5 マジュロ環礁における化石マイクロアトールの高度と年代から求められた海面変化曲線。

州島が堆積を開始したのはそれぞれの環礁の中でも礁原の幅の広いところの、ややラグーン寄りであり、やはり波浪エネルギーが相対的に弱いところで堆積したことを支持している。また、地形は堆積を開始した部分が最も低く、付加するにつれて高くなっていた。このこともまた、波浪が比較的弱い部分から、強い部分へと付加が進むことを示している。礫質相、砂質相とも、砂粒子の約半分が大型底生有孔虫(とくに*Calcarina*)によって構成されていた。

本研究課題「(2) 環礁州島の人間居住-自然環境の相互作用に関する研究」の発掘調査によって、この2000-2200年前の自然層をおおって、地床炉の存在が確認された。その年代は2000年前と、島の形成時期と一致した。すなわち、海面低下をトリガーとして島が形成される(海面上に現れる)とほぼ同時に、人間の居住が始まっていたことを示す。島の形成以後、植生が島をおおい、土壌が形成されて、人間居住に適当な場を提供するようになるまで数100年から1000年程度の時間差があるのではないかと考えられていた。本研究の結果は、太平洋の海洋民がまだほとんど植生のみられない形成されたばかりの島に、積極的に進出してきたことを示している。

(2) 有孔虫の生態分布と規定要因

マジュロ環礁の礁原に棲息する有孔虫群集は、*Calcarina*と*Amphistegina*を優占する。

*Calcarina*と*Amphistegina*は、風上側に位置する外洋側礁原の芝草状藻類帯と潮だまりでそれぞれ最も棲息密度が高い（それぞれ $>10^6$ 、 $>10^5$ 個体/ m^2 ）。両種は水路内の海藻上でも同程度の高い密度を示す。

外洋側礁原において、両種は沿岸の藍藻・海藻マット帯にはほとんど棲息しない。*Calcarina*は、各底質帯内で棲息密度にバラツキがほとんどない測線では、岸側の底質帯よりも沖側の芝草状藻類帯やラップモク帯に有意に多い（Nemenyi Joint-Rank (NJR) 検定、 $P<0.05$ ）。しかし、底質帯内で棲息密度がばらつく測線では、底質帯間の棲息密度において有意な違いが認められない（Kruskal-Wallis (KW) 検定、ns）。一方、*Amphistegina*は、*Calcarina*と比較して礁原全体に分布する傾向がある。棲息密度は、風上側の外洋礁原では沖側の底質帯よりも岸側の潮だまりで有意に高い（NJR検定、 $P<0.05$ ）。一方、風下側では岸側底質帯よりも沖側底質帯に有意に高い（NJR検定、 $P<0.05$ ）。しかし、その他の測線では、棲息密度のバラツキが大きく、底質帯間の棲息密度に有意な差は認められない。

礁湖側礁原では、両種とも沿岸の底質帯には分布せず、沖側の底質帯に分布する。しかし、棲息密度のバラツキが大きく、沿岸と沖側との棲息密度の差は有意ではない（KW検定、ns）。例外的に、*Amphistegina*はローラ島礁湖沖のパッチリーフにおいて、礁原よりも礁湖側浅斜面で棲息密度が高い（NJR検定、 $P<0.05$ ）。

1) 卓越風に対する位置との関係

風上側と風下側の外洋側礁原を比較した結果、*Calcarina*の棲息密度は風下側よりも風上側で有意に高いが（NJR検定、 $P<0.05$ ）、*Amphistegina*は風上側と風下側とで有意な差が認められない（NJR検定、ns）。また、両種は風上側に位置する州島において、礁湖側よりも外洋側の礁原に有意に多い（NJR検定、 $P<0.05$ ）。これら2種の分布様式の違いは、各有孔虫の必要とする水流条件が微妙に異なるためと解釈される。

2) 州島の存在の影響

ローラ島周辺で有孔虫の棲息分布を検討した結果、(1) 州島の沿岸部を除く外洋側および礁湖側の礁原に有孔虫が分布し、平均 10^4 個体/ m^2 の有孔虫が棲息すること、(2) 外洋側礁原の礁縁に近い、低潮線付近の海藻帯で有孔虫が最も多く棲息すること（ 10^5 個体/ m^2 ）が明らかとなった（図6）。これらの結果から、ローラ島周辺では、波浪や潮汐による水流の強さ（海水の交換率）と水深（低潮線付近）が有孔虫の分布を規定する主な環境要因であると考えられる。

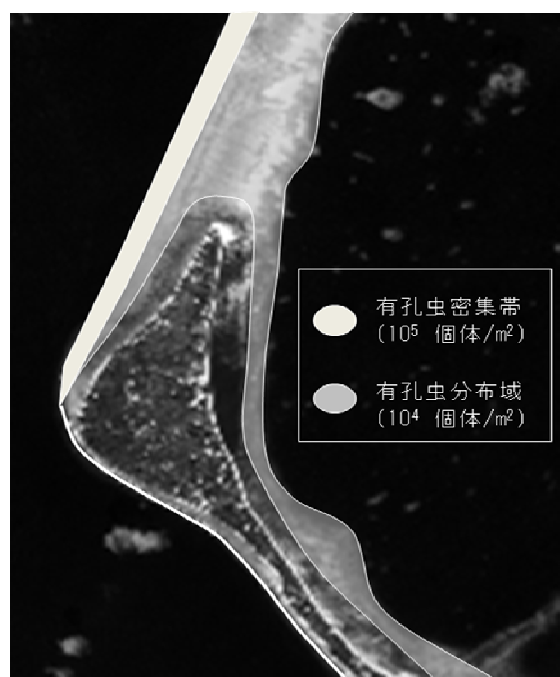


図6 ローラ島周辺の礁原における有孔虫の分布と棲息密度。

3) 州島の人口との関係

エネコ島からデラップ島にかけての地域では、人口は自然条件に近い州島では10-20人であるが、人口過密地域に近い州島で200人に急増し、さらに人口が過密した3つの州島（D.-U.-D. 地域）で2000-7000人（合計15000人）に達する（1999年現在）。有孔虫の棲息密度（図7）は、人口の少ない州島の礁原で高く（>5000個体/100 cm²）、人口が密集した州島に近づくと急激に減少し（1500-600個体/100 cm²）、さらに人口が密集した州島の礁原では人口の少ない州島の礁原よりも棲息密度が2桁低くなる（50-15個体/100 cm²）。以上の結果から、有孔虫の棲息密度は明らかに州島の人口と反比例することが確認された。

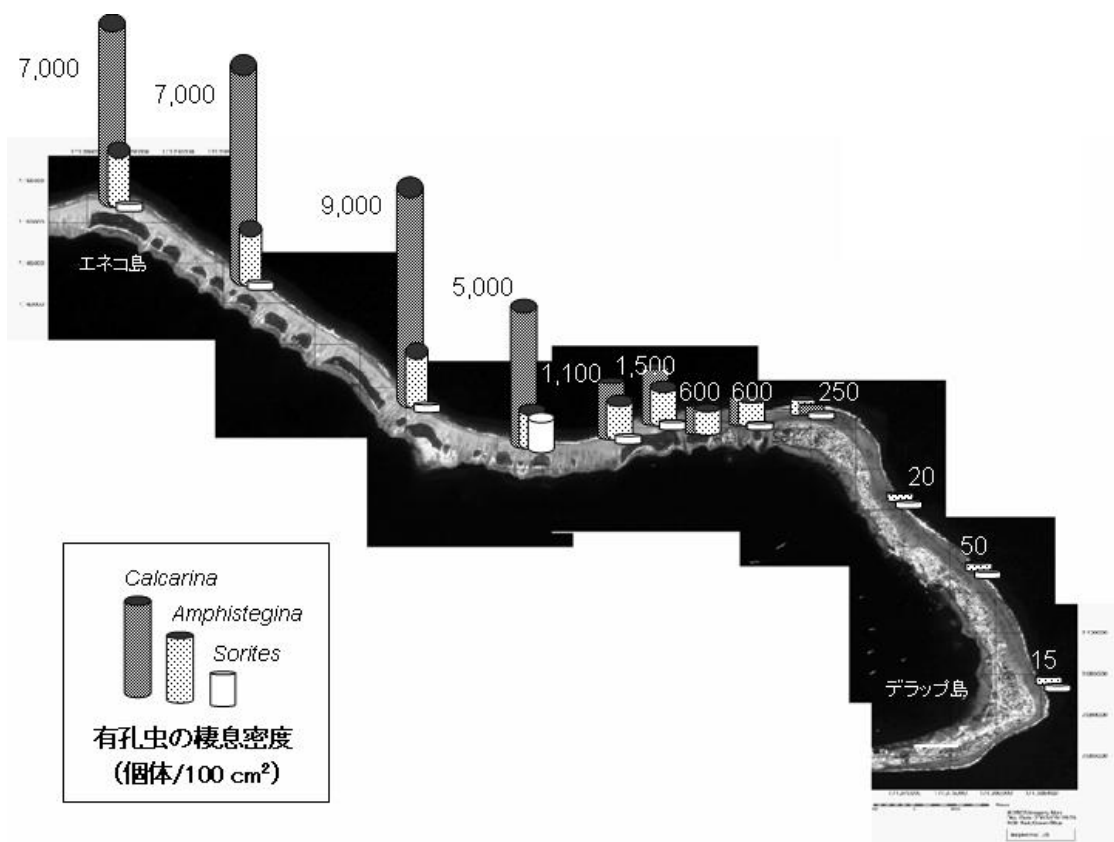


図7 マジュロ環礁北東部の外洋側礁原における有孔虫の棲息密度の変化。エネコ島は人口が少ない自然条件に近い州島であるのに対して、デラップ島は人口が密集した都市化した州島である。

4) 生産量

マジュロ環礁の礁原における有孔虫の生産量（図8）は、風上側かつ自然条件下の外洋側礁原や水路で最も多く（ $10^5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{yr}/100 \text{ m}^2$ 、以下単位同じ）、同じ風上側に位置する州島の礁湖側礁原で最も少ない（1）。風下側に位置するロングアイランド島の外洋側礁原は風上側のそれと比べて著しく少なく、礁湖側礁原と同程度の生産量を示す（ $10^2 \sim 10^3$ ）。ローラ島周辺では、風上側と風下側の中間の値を示す（ $10^3 \sim 10^4$ ）。また、風上側でも人口の多いD.-U.-D. 地域の外洋

側礁原では少ない (10^2)。以上の有孔虫の生産量の地域による違いには、波浪などの流動環境の違いや人為的影響の差が大きく関連すると推察される。

図8 マジュロ環礁における大型底生有孔虫の年間堆積物生産量 ($\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{yr}/100 \text{ m}^2$)。

(3) 人為的影響

有孔虫の棲息密度が州島の人口と反比例する原因として、調査地域の底質・水質との関連について検討した。

1) 底質の違いと影響

底質帯の種類と帯状分布は、人口の少ない州島と多い州島とで異なる。人口の少ない州島から人口が密集した州島へ近づくにつれて、(1) 沿岸に分布する藍藻・緑藻マット帯の幅が広がる、(2) ラップモク帯が消滅する、(3) 有孔虫が多く棲息する芝草状藻類の組成が異なり、人口の多い州島の礁原ではテングサ・モサヅキだけでなく、多種の海藻がみられる。しかし、人口の異なる州島の礁原で同じ種類の海藻を採取して、有孔虫の棲息密度を調べた結果、(1) 同じ種類の海藻でも地域が異なると棲息密度が大きく異なること、(2) 同じ地域内では、異なる海藻における棲息密度は同程度であることから、有孔虫の棲息密度は海藻の違いよりもむしろ海藻が繁茂する場所における別の要因の違いに影響されると考えられる。

2) 水質の違いと影響

地下水のイオン組成は、人口の少ない州島と多い州島のどちらも海水が混合した地下水の一般的な範囲に含まれる。これは、(1) 州島の面積が小さいため、もともと地下水量が少ないこと、(2) 人口の多い地域では、少ない地下水を過剰に汲み上げているため、地下に海水が多く浸透するためと考えられる。

地下水の栄養塩(硝酸)濃度(図9)は人口の多い都市部の州島で著しく高く ($>200 \mu\text{M}$)、人口の少ない州島の2倍以上である。都市部の地下水のいくつかの値は明らかにWHOに定められた水

質基準値を超えている。

礁原の海水の栄養塩濃度は、地下水のそれに比べて非常に低い（約1 μM ）。都市部に近い礁原の海水の方が人口の少ない州島付近の礁原の海水よりも濃度が若干高い傾向があるが、明確な差はみられない。

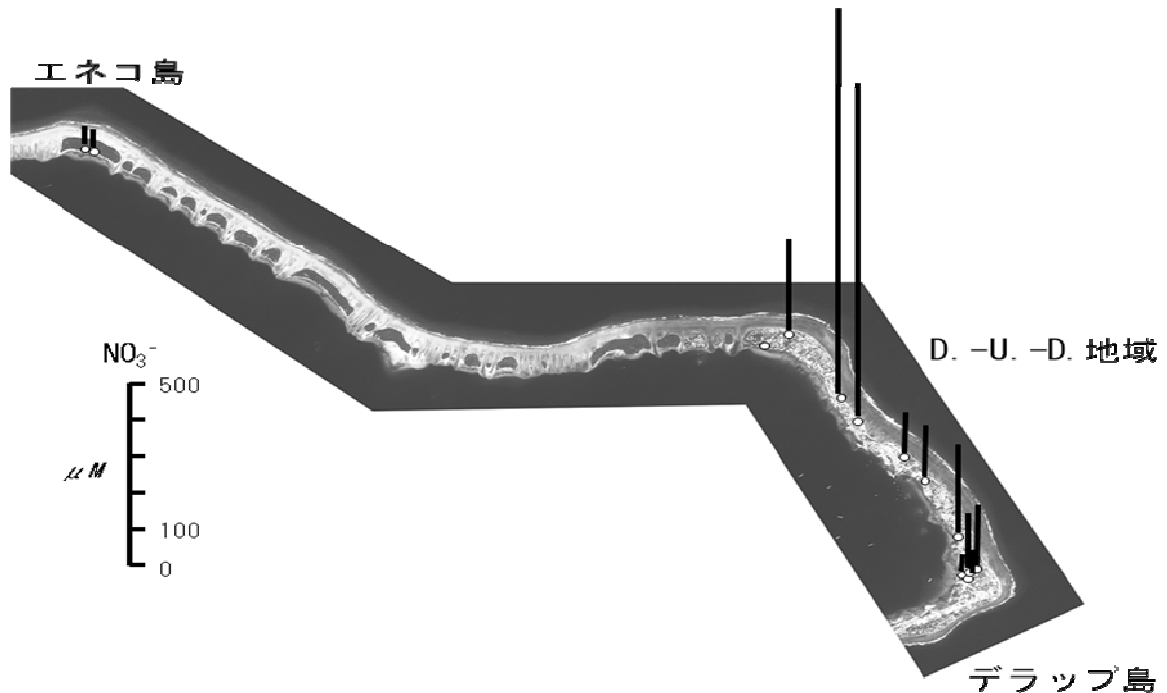


図9 マジュロ環礁北東部の州島における地下水の栄養塩（硝酸）濃度。

地下水の窒素同位体比は約10‰であり、人間活動による排水の影響を受けていることを示唆する。しかし、人口の少ない地域と多い地域で大きな違いはみられない。礁湖側の沿岸に繁茂する海藻（ウミウチワ属）の窒素同位体比は約3-8‰であり、外洋側の沿岸に繁茂する海藻（シオグサ属）の値は1‰以下である。一般に藍藻の窒素固定による同位体比は0‰であるため、これらの結果は、礁湖側の沿岸の海藻は主に陸域からもたらされる窒素を吸収しているが、外洋側の沿岸の海藻は主に藍藻によって固定された窒素や外洋水中の窒素を取り込んでいると推察される。この外洋側礁原の結果は、海水の栄養塩濃度の結果と整合性があり、外洋側礁原では陸域からの地下水が外洋水によって希釈されている可能性がある。

以上の結果を総合すると、マジュロ環礁の州島では人口の増加に伴い地下水の栄養塩濃度が高くなっており、その地下水が礁原へ流入して海藻や底生生物に吸収されている可能性を示唆する。高い栄養塩濃度は有孔虫への直接的効果（成長の抑制）・間接的効果（底質・食物網の変化）によって分布・生殖・成長・死亡率に影響し、有孔虫の棲息密度の減少につながっていると推測される。今後、栄養塩が有孔虫に与える直接的・間接的効果を野外実験・飼育実験で検証していく必要がある。

(4) 有孔虫砂の収支

図10にマジュロ環礁における有孔虫の砂生産と、漂砂による運搬ポテンシャル、ローラ島における堆積速度をまとめた。ハビタットは本研究課題(3)-2)で、沿岸漂砂ポテンシャルは(3)-1)によって得られた成果である。有孔虫のハビタットは、赤で示した礁原上である。人為影響のない状態では、マジュロ環礁全体で年間 15000m^3 の有孔虫砂の生産量があった。この値は、人為影響の小さなエネコ島沖の生産量を、ハビタットに掛け合わせて求めたものである。一方、ラグーン側海岸沿いの沿岸流による漂砂ポテンシャルは、東から西に向かって 200m^3 前後である。また、ローラ島における有孔虫砂の堆積速度は、 380m^3 と見積もられる。すなわち、生産された有孔虫砂のうち、運搬され、堆積するのは、わずか1%である。実際には、99%はラグーン底や外洋に失われ、大量に生産される有孔虫砂のうちごくわずかな量が、島の形成・維持に十分であることが明らかになった。

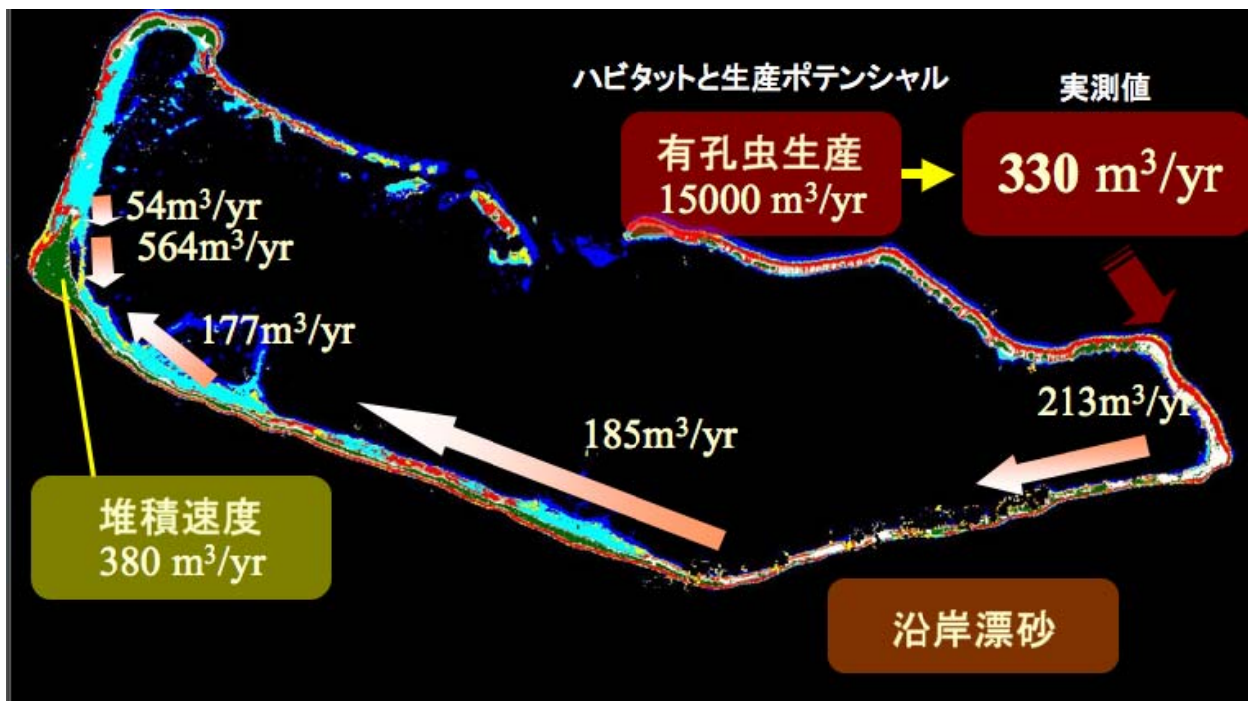


図10 マジュロ環礁における有孔虫砂生産-運搬-堆積収支。

ところが実際には図6に示すように、都市化した州島の礁原では有孔虫の生産が大幅に減少してしまった。こちらの値をもとに有孔虫砂の生産量を見積もると、マジュロ環礁全体でわずか 330m^3 となる。そのほとんどを運搬・堆積したとして、島の維持にやっとである。実際に運搬・堆積する量が1%で変わらないとすると、その量はわずか 3m^3 であり、島の維持にはとうていおぼつかないことがわかる。環境劣化による有孔虫生産量の減少は、海面上昇に対する島の脆弱性を著しく高めている。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

環礁州島の基本的な地形構成とその形成過程、形成要因をはじめて明らかにすることができた。島の形成は、2000年前の海面低下をトリガーとして、島の中央部が先ず形成され、その後外洋側とラグーン側に拡大した。さらに、島の形成とほぼ同時に人間居住が始まったことも明らかになった。

西太平洋の環礁州島地形の形成・維持に重要な役割を果たしている有孔虫について、その生息要因を明らかにした。マジュロ環礁の礁原に多い有孔虫は*Calcarina*と*Amphistegina*であり、特に風上側に位置する州島の外洋側礁原に多く棲息する。有孔虫の分布を規定する主な環境要因は、波浪や潮汐による流動環境条件、水深（低潮線付近）と付着しやすい底質（芝状藻類帯）の有無であり、生産量は風上側かつ自然条件下の地域の外洋側礁原で最も多く、礁湖側や風下側、人為的影響下の礁原では少ない。このことは、波浪などの流動環境の違いや人為的影響の差が有孔虫の生産に影響を与えることを示唆する。

本研究は初めて環礁における有孔虫の生産量マップを明らかにした。このデータは、マジュロ環礁をはじめ西太平洋型の環礁州島における州島形成モデルを構築する上で重要な基礎データとなる。また、有孔虫の棲息密度と州島の人口には負の相関が認められ、マジュロ環礁では、人口の増加や人間活動によって地下水の栄養塩濃度が高くなっており、栄養塩濃度の上昇が有孔虫へ直接的・間接的影響を与えることで、有孔虫の棲息密度が減少していると推測される。

(2) 地球環境政策への貢献

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・再生を図る上で、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(当時)が支援を約束し、2008年1月には鴨下環境大臣(当時)、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。

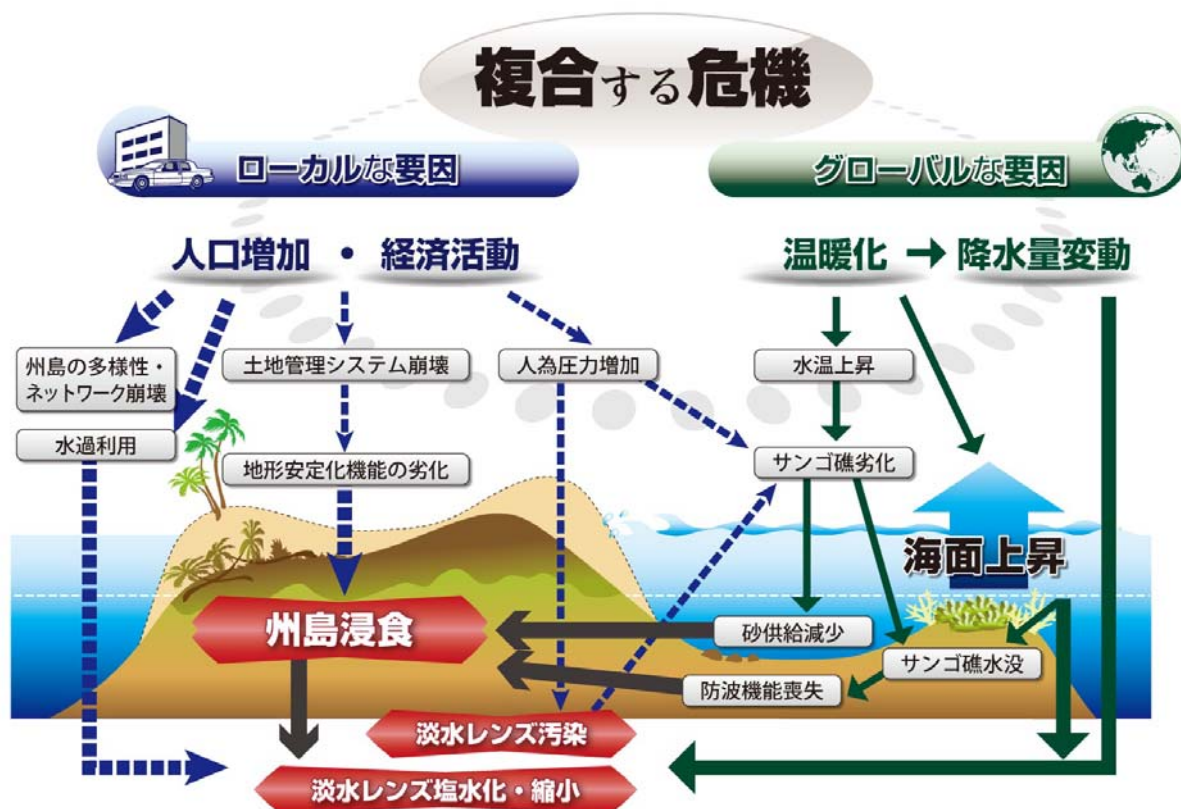


図11 環礁州島のローカルな要因とグローバルな要因が複合する危機。

このように、環礁州島の問題は、決して「海面上昇による水没」という単純なものではない。地球温暖化によってサンゴが白化すれば、サンゴ礁が劣化して海面上昇に追いついて地形を作る

ポテンシャルだけでなく、島を作る砂礫の供給ポテンシャルも落ちる。サンゴ礁の劣化は、環礁国の人口増加や経済成長に伴うローカルな環境ストレスによっても起こる。また、経済活動の変化やライフスタイルの変化によって、土地や植生管理システムが崩壊し、これが州島地形の自然の安定化機能を損ねている。このように、環礁州島の危機はグローバル・ローカル両方の環境ストレスが複合したものであり、現在発生している問題は主にローカルな要因によるものである（図5）。ローカルな要因によって、今世紀予測されている地球規模変動に対して脆弱性の高い州島になってしまっている（図11）。この視点は、本サブテーマだけでなく、他のサブテーマ、本研究課題全体を通じた共通の成果であり、視点となっている。

6. 引用文献

- (1) Hallock, P. (1981) Production of carbonate sediments by selected large benthic foraminifera on two Pacific coral reefs. *J. Sediment. Petrol.*, 51, 467-474.

7. 国際共同研究等の状況

マーシャル短期大学（マーシャル諸島共和国）とマーシャル諸島共和国の環境庁、海洋資源局とは、統合海岸管理計画に本研究成果をインプットするための議論を進めている。

ツバルの環境庁、土地調査局等、政府の関連部門と、本研究成果の現地政策へのインプットのための議論を始めた。現地のこうした機関と共同で、適切な J I C A 支援策について検討・調整を進めている。

また、太平洋島嶼国の環境問題について研究を進めている、SPREP（南太平洋地域環境プログラム）、SOPAC（南太平洋応用地球科学委員会）のプロジェクトと情報を共有し、連携して進める。

8. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) 横木裕宗, 佐藤大作, 山野博哉, 島崎彦人, 安藤創也, 南陽介, 高木洋, 茅根創, Ishoda, A.: 環礁州島における地形維持機構とラグーン内波浪場に関する現地調査. *海岸工学論文集*, **51**, 1381-1385 (2004).
- 2) Kayanne, H., Chikamori, M., Yamano, H., Yamaguchi, T., Yokoki, H. and Shimazaki, H.: Interdisciplinary approach for sustainable land management of atoll islands. *Global Environmental Res.*, **9**, 1-7 (2005).
- 3) Yamano, H., Kayanne, H., and Chikamori, M.: An overview of the nature and dynamics of reef islands. *Global Environmental Res.*, **9**, 9-20 (2005).
- 4) Yokoki, H., Yamano, H., Kayanne, H., Sato, D., Minami, Y., Ando, S., Shimazaki,

- H., Yamaguchi, T., Chikamori, M., Ishoda, A., and Takagi, H. : Comparison between longshore sediment transport due to waves and long-term shoreline change in Majuro Atoll, Marshall Islands. *Global Environmental Res.*, **9**, 21-26 (2005).
- 5) Yamaguchi, T., Kayanne, H., Yamano, H., Najima, Y., Chikamori, M., and Yokoki, H. : (2005) Excavation of pit agriculture' s landscape on Majuro Atoll, Marshall Islands, and its implications. *Global Environmental Res.*, **9**, 27-36.
 - 6) Yamano, H., Shimazaki, H., Kayanne, H., Yokoki, H., Yamaguchi, T., Chikamori, M., Tamura, M., Murase, T., Suzuki, Y., Itou, K., Hirose, M., Sano, S., Takagi, H., Watanabe, M., Akimoto, F., Watanabe, S., Yoshii, S., Ishoda, A., Leenders, N., and Forstreuter, W. : (2005) Efforts to generate maps of atoll countries. *Global Environmental Res.*, **9**, 37-46.
 - 7) Shimazaki, H., Yamano, H., Yokoki, H., Yamaguchi, T., Chikamori, M., Tamura, M., Kayanne, H. : (2005) Geographic database on the natural and socioeconomic conditions of reef islands. *Global Environmental Res.*, **9**, 47-55.
 - 8) Yamano, H., Shimazaki, H., Matsunaga, T., Ishoda, A., McClennen, C., Yokoki, H., Fujita, K., Osawa, Y., and Kayanne, H. : Evaluation of various satellite sensors for waterline extraction in a coral reef environment: Majuro Atoll, Marshall Islands. *Geomorphology*, **82**, 398-411 (2006).
 - 9) Yamaguchi, T., Chikamori, M., Kayanne, H., Yamano, H., Yokoki, H., and Najima, Y. : Conditions and activities supporting early prehistoric human settlement on Majuro Atoll in Marshall Islands, Eastern Micronesia. *Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium*, 1549-1555 (2006).
 - 10) Yamano, H., Yamaguchi, T., Chikamori, M., Kayanne, H., Yokoki, H., Shimazaki, H., Tamura, M., Watanabe, S., and Yoshii, S. : Satellite-based typology to assess stability and vulnerability of atoll islands: a comparison with archaeological data. *Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium*, 1556-1566 (2006).
 - 11) Yokoki, H., Yamano, H., Kayanne, H., Sato, D., Shimazaki, H., Yamaguchi, T., Chikamori, M., Ishoda, A., and Takagi, H. : Numerical calculations of longshore sediment transport due to wave transformation in the lagoon of Majuro Atoll, Marshall Islands. *Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium*, 1570-1576 (2006).
 - 12) Shimazaki, H., Yamano, H., Yokoki, H., Yamaguchi, T., Chikamori, M., Tamura, M., and Kayanne, H. : Global mapping of factors controlling reef-island formation and maintenance. *Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium*, 1577-1584 (2006).
 - 13) 佐藤大作, 横木裕宗, 藤田和彦, 桑原祐史, 山野博哉, 島崎彦人, 茅根創, 渡邊真砂夫:

海面上昇後のマーシャル諸島マジュロ環礁における地形維持過程の数値シミュレーション. 海岸工学論文集, **53**, 1291-1295 (2006).

- 14) Yamano, H., Kayanne, H., Yamaguchi, T., Kuwahara, Y., Yokoki, H., Shimazaki, H., and Chikamori, M.: Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. *Global and Planetary Change*, **57**, 407-416 (2007).
- 15) Yamano, H., Shimazaki, H., Murase, T., Itou, K., Sano, S., Suzuki, Y., Leenders, N., Forstreuter, W., and Kayanne, H.: Construction of digital elevation models for atoll islands using digital photogrammetry. In: Woodroffe, C.D., Bruce, E., Puotinen, M., and Furness, R.A. (eds.) GIS for the Coastal Zone: A Selection of Papers from CoastGIS 2006 (Wollongong Papers on Maritime Policy, No. 16). Australian National Centre for Ocean Resources & Security, University of Wollongong, Wollongong, Australia, pp. 165-175 (2007).
- 16) 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*, (in press).

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) 茅根 創:水没する環礁州島とその再生—太平洋島嶼国とわが国国境の島々の国土維持—. *Ship & Ocean Newsletter*, no. 99 (2004).
- (2) 口頭発表 (学会)
 - 1) 茅根 創, 山野博哉, 横木裕宗, 山口 徹, 近森 正: 環礁州島の維持機構—地学・生態学・工学・考古学的アプローチ—. 日本サンゴ礁学会第6回大会, 石垣市, 2003年11月; (講演要旨集, 36) .
 - 2) Kayanne, H., Yamamoto, S., Yamano, H., Yokoki, H., Pinca, S., Yamaguchi, T., and Chikamori, M.: Geomorphological and ecological interactions between atoll islands and coral reefs. 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa, June-July, 2004; (Abstract, 180)
 - 3) 安河内貫, 茅根 創, 山口 徹, 山野博哉: マジュロ環礁ローラ島に見られるサンゴ州島堆積層. 日本サンゴ礁学会第8回大会, 沖縄, 2005年11月; (講演要旨集) .
 - 4) 安河内貫, 茅根創, 大澤葉子, パラオ諸島カヤンゲル環礁の堆積相と完新世における堆積プロセス, 日本サンゴ礁学会第9回大会, (仙台, 2006.11).
 - 5) 大澤葉子, 藤田和彦, 井手陽一, 茅根 創, マジュロ環礁における大型底生有孔虫の生息を規定する地理・地形・底質・水質条件, 第9回日本サンゴ礁学会, (仙台, 2006.11) .

- 6) Kayanne H., Yasukouchi T., Yamaguchi T., Yamano H., Yoneda M.: Island formation and early settlement in Majuro Atoll, Marshall Islands. 21st Pacific Science Congress, Okinawa, June 2007; (Abstracts, 205).
- 7) Fujita K., Osawa Y., Yamano H., Kayanne H., Ide Y.: Distribution and sediment production of larger benthic foraminifera on reef flats of Majuro Atoll, Marshall Islands. 21st Pacific Science Congress, Okinawa, June 2007; (Abstracts, 208).
- 8) Osawa Y., Fujita K., Ide Y., Kayanne H., Yamano H.: Anthropogenic influences on foraminiferal distribution on reef flats of Majuro Atoll, Marshall Islands. 21st Pacific Science Congress, Okinawa, June 2007; (Abstracts, 366).
- 9) 茅根 創, 安河内 貫, 山野博哉, 横木裕宗, 佐藤大作, 藤田和彦: マーシャル諸島マジュロ環礁における有孔虫砂の生産—運搬—堆積収支. 日本サンゴ礁学会第10回大会, 沖縄, 2007年11月; (講演要旨集, 13) .

(3) 出願特許

なし。

(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもので国際ワークショップ・シンポジウムのみ）

- 1) 第10回国際サンゴ礁シンポジウム(2004年6月28日～7月2日、沖縄コンベンションセンター)において、「サンゴ礁と地球規模変動」に関する7つの一連のセッションを主催した。これとは別に「環礁における地形-人間相互作用」を主催した。
- 2) 第21回太平洋学会議(2007年6月13-17日、沖縄コンベンションセンター)において、セッション「環礁における地形-人間相互作用」を主催した。
- 3) 「環礁州島からなる島嶼国の持続可能な国土の維持」(2008年2月2日、東京大学小柴ホール、参加者約100名)。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞(2007年3月19日、全国版朝刊)「温暖化の波 沈むツバル」。
- 2) 朝日新聞(2007年4月9日、全国版夕刊)「地球異変-南太平洋の島々から-1 平らな島 迫る海」(連載全体にわたって情報提供)。
- 3) 朝日新聞(2008年3月12日、夕刊、「南の島 人の活動で危機」)

(6) その他

なし。

