

課題名	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
課題代表者名	山野博哉（独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター衛星観測研究室）
研究実施期間	平成20～22年度
累計予算額	87,740千円（うち22年度 27,230千円） 予算額は、間接経費を含む。

研究体制

- (1) 環境変動史と州島地形構造に関する研究（国立大学法人東京大学）
- (2) 人間居住史と農耕史に関する研究（慶應義塾大学）
- (3) 生活圏形成と社会変動に関する研究（国立大学法人お茶の水女子大学）
- (4) 地形変化予測と影響評価に関する研究（国立大学法人茨城大学）
- (5) 水資源変化予測と影響評価に関する研究（大学共同利用機関人間文化研究機構総合地球環境学研究所）
- (6) 情報の統合化と適応策に関する研究（独立行政法人国立環境研究所）

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。中でも、ツバルなど環礁上に成立する小島嶼国は、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から形成され、標高が最大数m、幅数100mと低平で、地球温暖化の影響が最も深刻であると考えられる。地球温暖化に伴う気候変動と海面上昇によって、降水量の減少と地下水を保持する地形の縮小に伴う水資源の劣化が予測される一方で、近代化に伴って都市化と人口集中が起こり、地下水が汚染されることも懸念される（図1）。

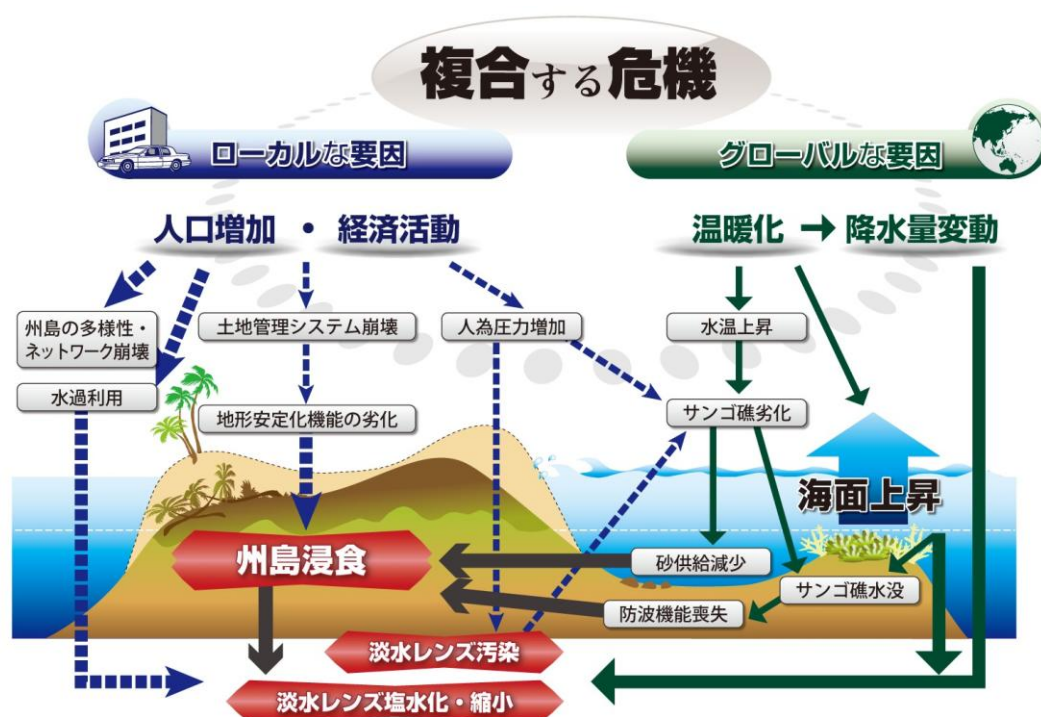


図1. 環礁州島からなる小島嶼国に危機をもたらしているグローバル・ローカルな要因

2. 研究目的

本研究においては、環礁上に成立する小島嶼国に対し、地形と水資源に基づいて農業生産と人間居住に関する環境収容力を推定し、地球温暖化に伴う海面上昇と降水量変動の両方の影響を予測して脆弱性の評価を行う。その上で、海面上昇による海岸侵食に対する適応策に加え、海面上昇による地下水の塩水化と縮小、気候変動による水資源変化を考慮して、汚染や過利用を起こさないよう適切な適応策を提案する。重点対象地域として、近年人口が増加するとともに海面上昇への脆弱性が指摘されているマーシャル諸島共和国とツバル共和国を選定する（図2）。

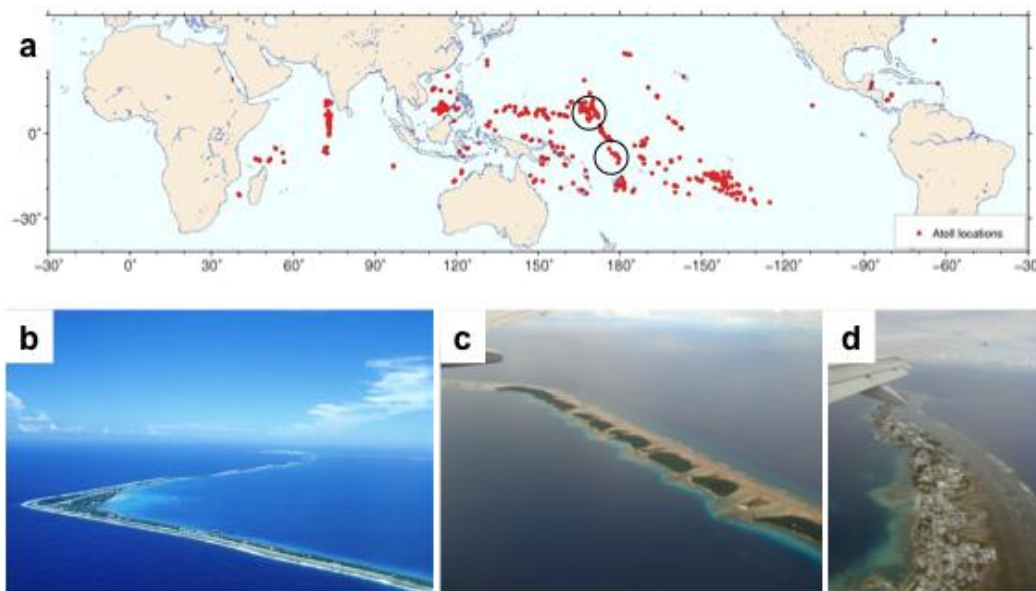


図2. a 世界の環礁の分布とマーシャル諸島共和国（上の○印）、ツバル（下の○印）の位置。b-d 多様な環礁州島。リング状に連なったフナフチ環礁上に位置するツバル共和国の首都フongafale島（b）。マーシャル諸島共和国マジュロ環礁上の人口の少ない州島（c）と都市部の州島（d）。

以上の目的を遂行するため、学際的研究チームからなる6つのサブテーマを設定した（図3）。

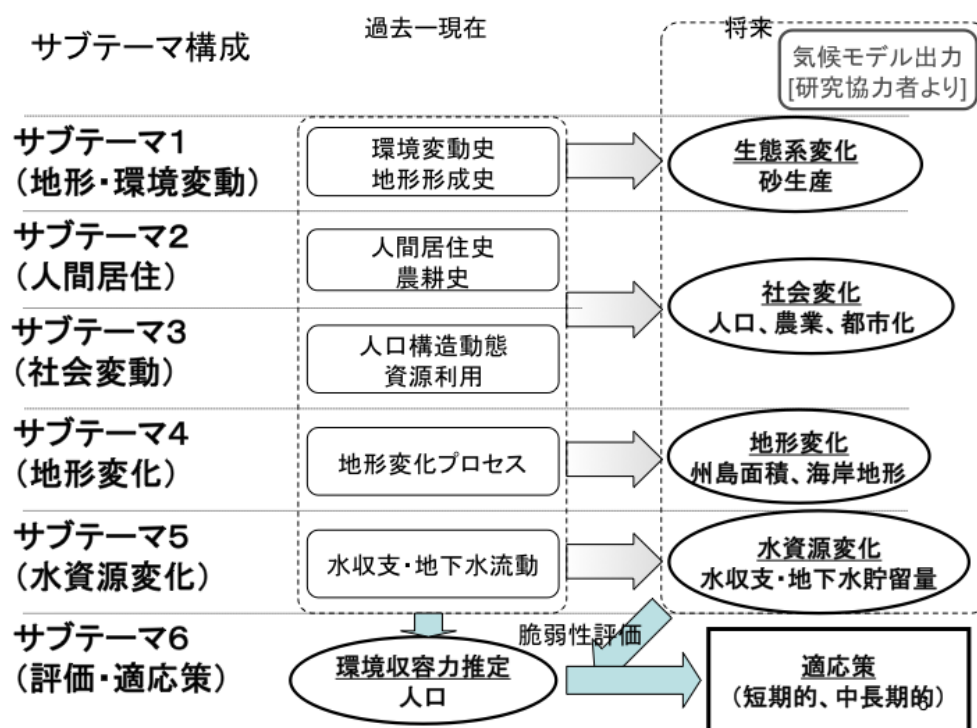


図3. 本研究のサブテーマ構成

3. 研究の方法

(1) 環境変動史と州島地形構造に関する研究

現生および化石塊状サンゴ（ハマサンゴ）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、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は、サンゴ年輪の窒素同位体比も測定し、栄養塩流入量の変化を復元した。

地形に関しては、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。

(2) 人間居住史と農耕史に関する研究

地球温暖化にともなう海面上昇の影響が懸念されるなかで、人間の暮らしを含めた環礁州島の脆弱性を個別に評価するためには、農耕景観の形成を歴史的に把握することが役に立つ。そのためにまずは、①オセアニア環礁州島における農耕の現状を把握するために、民族誌、民族植物学、農学の文献情報を収集した。次に、②ツバルのフナフチ環礁フォンガファレ州島にて、州島形成と人間居住の関係史にかかわるジオアーケオロジー調査を実施した。

(3) 生活圏形成と社会変動に関する研究

マーシャル諸島共和国、ツバル、キリバス共和国を中心とする各種センサス情報を現地及び図書館等で収集し、人口動態統計情報のトレンドの経年的分析を行った。

人口動態の詳細かつ微細な傾向・特質を把握するための悉皆的なコミュニティ調査手法（観察・面接調査）に基づくフィールド・センサス調査（ミクロなレベルの人口動態分析）及び面接調査（自由応答法）によるライフヒストリー（個人の居住歴、移動歴、職歴、社会ネットワーク形成）と環境変動意識・景観認識に関する情報の収集と分析を行った。

現地調査においては、環礁州島間の定期航路の乗船者名簿等の各種情報と史資料を活用した社会ネットワーク形成のトレンド分析を行った。同時に、New Zealand Census Data(1853-2006)を用いた、小島嶼国と環太平洋メトロポリタン地域との間に継続する広範な地域的人口移動に関するトレンドの経年的分析を行った。

また、環境認識に関しては、文化人類学的手法による民俗語彙（現地言語の語彙によるカテゴリ化）の調査に基づく現地社会の生活圏認識の分析を行った。

(4) 地形変化予測と影響評価に関する研究

環礁州島の地形変化は自然条件によるものと人工的に生じるものの二つに大きく分けられる。本研究では自然条件による地形変化に着目し、砂生産—運搬—堆積の一連のプロセスを再現する地形変化モデルの構築を行い、州島地形の将来予測と、それに対する保全策を検討した。

海岸においては、植生による侵食防止作用に着目し、衛星画像による植生分布等に基づくゾーニングを行った。

陸域からの海域汚染の状況と汚染源を特定するために、海岸水を採水し、水質分析を行った。

(5) 水資源変化予測と影響評価に関する研究

州島の水資源量とその動態を把握するために、島を横断するいくつかの観測線で電気探査を実施した。井戸水の同位体分析により、地下水（淡水レンズ）の滞留時間を推定した。以上に基づき、地下水流動の数値モデリングを行った。また、気象データを収集し、水収支モデルを作成した。

(6) 情報の統合化と適応策に関する研究

現在の小島嶼国の危機は、グローバルな要因とローカルな要因の複合により生じており、ローカルな要因を特定することにより適応策の立案が可能となる。本研究においては、国土の維持に重要な生態学的、海岸工学的プロセスと、地産地消の資源である水資源を中心に、グローバルな要因とローカルな要因に関して、サブテーマ1～5の知見をまとめて危機の全体像を描出した。その上で、適応策を、要因と時空間スケールに基づいて整理し、対象地において効果的な適応策を提案した。

4. 結果及び考察

(1) 環境変動史と州島地形構造に関する研究

化石サンゴの分析により、現在に比べ、2100年前はエルニーニョが強く、1000年前は降水量はほとんど変化していないことが示された。また、窒素同位体比からは、近年の人口増加にともなって汚染が増大し、サンゴが斃死していることが明らかになった。

島の地形は2000年前から有孔虫の遺骸片とサンゴ片の堆積により発達を始めたことが明らかとなったが、ツバルの島の体積はマーシャル諸島共和国の島の4分の1であり、環境変動に対してより脆弱であることが示唆された。

(2) 人間居住史と農耕史に関する研究

発掘調査とタロイモ畑の分布調査により、島の発達による淡水レンズの発達が農耕に大きな影響を与えていることが明らかとなった。また、人間居住と農耕年代は島の構造により異なり、ツバルの方がマーシャル諸島共和国より若い年代を示した。

(3) 生活圏形成と社会変動に関する研究

人口調査、聞き取り調査、乗船名簿調査等すべての調査は、島と島の間に社会ネットワークが形成されており、多くの人口が流入すると同時に多くの人口が流出するような平衡状態が維持されていることが明らかとなった。住民の生活圏形成を把握するキーワードは、ネットワーク、移動性、広範性、柔軟性、適応性であり、従って、人間—環境系の視点から資源の保全ならびに環境変化に対する適応策を策定するに際しても、開放系システムとしての環礁州島の生活圏形成の特質を前提とする必要があることが示された。

(4) 地形変化予測と影響評価に関する研究

地形変化の将来予測計算結果から、激しい侵食が生じる領域などが特定されたが、その分布は広範囲に不連続に分布していた。また、海岸植生分布からは、近年植生の占有率が低下しており、海岸の維持機能が低下していることが明らかとなった。人口の少ない島周辺では砂生産が維持されているため、ここからの砂の移動による養浜が対策として考えられた。

水質分析からは、汚染の原因として屎尿が考えられた。

(5) 水資源変化予測と影響評価に関する研究

マーシャル諸島では厚い淡水レンズが形成されるが、人工揚水によって塩水化が起こっている状況が明らかとなった。一方、ツバルでは元々の州島の面積が小さく、淡水レンズは形成されず、古水資源は降水量がほとんどであった。水収支の解析及び地下水流動モデルにより、水資源の診断ツールを提供するとともに、今後の気候変動による水資源低下に対して、淡水レンズとその周辺の汽水を組み合わせて使用することが可能であることが示された。

(6) 情報の統合化と適応策に関する研究

以上のサブテーマ1～5の知見を統合し、環礁州島の地形変化と水資源変化に与えるグローバル・ローカルな要因を特定し、それらの関係をまとめた(図1)。

島の構造は多様であり、地形的に脆弱なツバル(サブテーマ1)においては、淡水レンズが形成されず(サブテーマ5)、居住開始年代が若く(サブテーマ2)、マーシャル諸島に比べより脆弱であることが環境変動史と人間居住史からも明らかとなった。また、最近の人口増(サブテーマ3)にともない、屎尿による汚染も進んでいる(サブテーマ4)。すなわち、ツバルは、地球温暖化にともなうグローバルな要因と人口増加にともなうローカルな要因の複合にさらされている。さらに、将来的に国土の減少や水資源の劣化が危惧される。ツバルに限らず、小島嶼国は利用可能な土地と資源が限られており、構造的に同じ問題を抱えていると言って良い。こうした問題のバリエーションは、気候—地形—水資源と社会システムで説明でき、他の島嶼国にも適用可能である(図4)。

環境変動に対する適応においては、グローバル(地球温暖化)な影響の低減、ローカル(人口増加)な影響の低減に加え、未利用資源の開拓が重要であると考えられる(図5)。淡水レンズの存在しないフォンガファレ島においては、水タンクが多数設置され、渇水期をしのいでいる。このように、自然の状態では活用されていなかった資源の活用を未利用資源の開拓と考える。第二次世界大戦以降の人口の急激な増加と、1950年以降の温暖化傾向は、すでに現在において、水タンクに代表されるように環境変動への適応が始まっていると考えることができる。

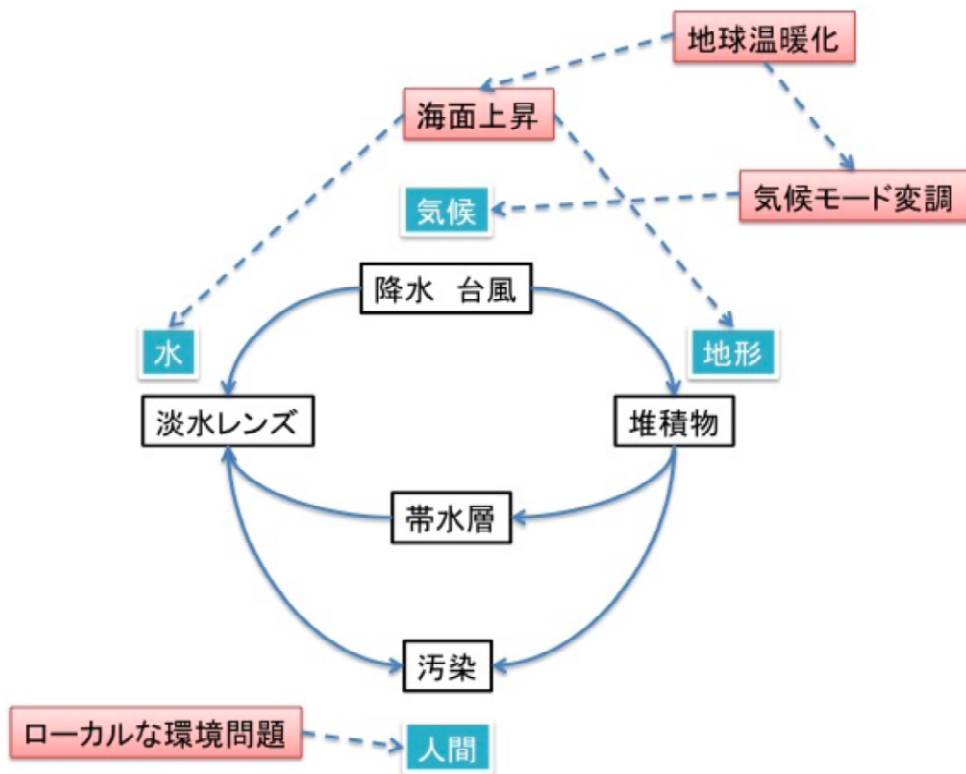
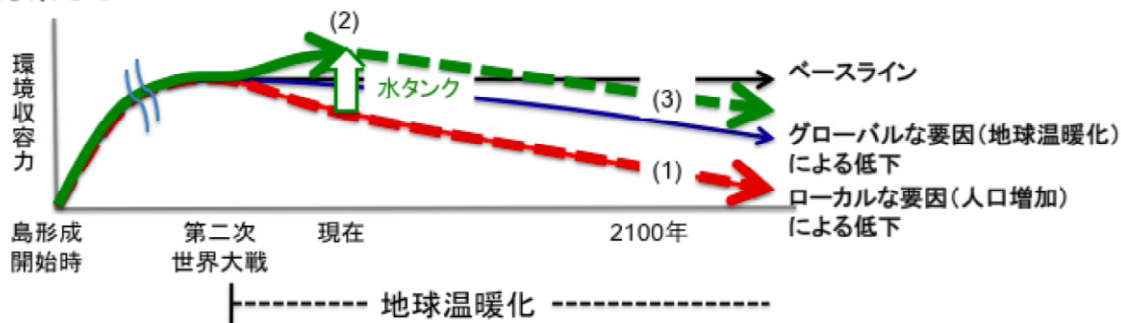


図 4. 州島の気候—地形—水資源、人間システムとグローバル・ローカルな環境問題の関係

a: 適応策なし



b: 適応策あり

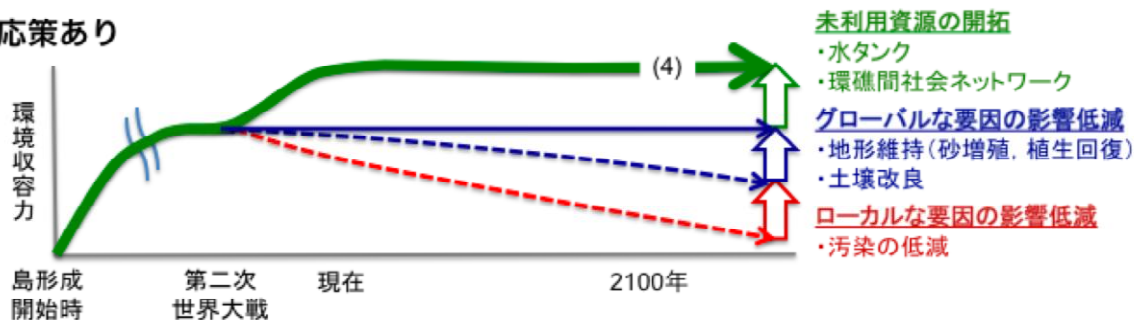


図 5. a: 適応策の無い場合の環礁州島の持つ環境収容力（人口）の変化。第二次世界大戦前をベースラインと考えると、今後、グローバル・ローカルな要因両方によってその環境収容力が低下する(1)。現在は、水タンクなどによって環境収容力を上げ、人口増加をまかなっている状態である(2)が、グローバル・ローカルな要因両方によってその環境収容力が低下する(3)と考えられる。b: 適応策を講じた場合。グローバル（地球温暖化）な影響の低減，ローカル（人口増加）な影響の低減に加え、未利用資源の開拓（水タンクなど）により現在の環境収容力が維持される(4)。

社会面での適応も考えるべき要素である。親族間の社会ネットワークに基づいた環礁間や海外を含めた島外への人々の移動が活発である（サブテーマ3）。移動することによって、人々は一つの環礁あるいは州島にとどまらず資源を広く利用していると考えられる。

ツバルにおいては、要因において特に重要なものが、グローバルな要因である海面上昇と降水量変動、ローカルな要因である人口増加にともなう土地利用変化と汚染にあることが示された。元湿地帯を示したハザードマップによる都市計画の立案、海浜植生の回復による海岸保護、ゾーニングによる保護区域の設定とともに、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ること、タロイモ畑における淡水保水力のある土壌を導入すること、環礁間や島外のネットワークを促進する運輸手段の増強を行うことなどが具体的な対策として考えられる。

一方、マーシャル諸島共和国においては、ツバルより頑健であるものの、海岸侵食や淡水レンズの塩水化の問題が起こりうる。サブテーマ4により、マーシャル諸島共和国において、人口が少なく健全なサンゴ礁生態系の維持されている島の周辺では砂生産が過剰にあり、そこからの砂運搬による養浜も対策として考えられることが示された。また、サブテーマ5の水収支の成果は診断ツールとして活用され、適切な水利用の指針策定に貢献するものである。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

本研究により、小島嶼国の危機の構造が明らかになるとともに、適応策を要因（グローバルな影響の低減、ローカルな影響の低減、未利用資源の開拓）で整理でき、対象地に対して具体的な適応策を提示することができた。環礁州島の立地条件は多様で、それに従い、環礁州島は多様な構造を持つ。一つの環礁内においても、そこに分布する州島の地形、形態や面積は多様である。環礁に居住を始めた人間は、地形を改変し、農耕栽培を行って景観を形成してきた。こうした人間居住史や社会構造、生活圏形成の歴史も多様である。火山島からなる小島嶼国は環礁とはさらに異なる構造や歴史を持っているであろう。本プロジェクトは、こうした多様性を理解した上で、グローバル・ローカルな要因を特定して具体的な対策を立案し、現地での施策や援助計画に反映させることが必要であることを示した。

（2）環境政策への貢献

本プロジェクト全体の目的と適応策の枠組みに関して、総合科学技術会議「気候変動適応型社会の実現に向けた技術開発の方向性立案のためのタスクフォース」への資料提供を行った。

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科学技術振興機構と国際協力機構による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。本事業は、上で挙げた項目のうち、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し、砂生産を増大させ、島の砂浜を回復す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に基づく適応策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。本プロジェクト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と考えられる。

環礁以外の小島嶼国にもさらにさまざまな自然・社会的問題が存在している。前述のように、本プロジェクトにおいては、水資源・農業管理や社会ネットワークの形成など、他に適応策に展開できる成果が得られた。今後、さらに島嶼国に対する科学的知見を積み重ねるとともに、そこから得られた、多様な問題に対する適応策がそれぞれの国に適用・実現されるよう努める。

6. 研究者略歴

課題代表者：山野博哉

1970年生まれ、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了、博士（理学）、国立環境研究所研究員、現在、国立環境研究所主任研究員

主要参画研究者

- (1) 茅根 創、1959年生まれ、東京大学大学院理学系研究科地理学専門課程修了（理学博士）、工業技術院地質調査所主任研究員、現在、東京大学大学院理学系研究科教授
- (2) 山口 徹、1963年生まれ、慶應義塾大学文学部卒業、オークランド大学大学院人類学部卒業（PhD. in Anthropology）、千葉商科大学政策情報学部助教授、現在、慶應義塾大学文学部教授
- (3) 棚橋 訓、1960年生まれ、慶應義塾大学文学部卒業、博士（社会人類学）、慶應義塾大学文学部助教授、現在、お茶の水女子大学大学院人間文化創成科学研究科教授。
- (4) 横木裕宗、1965年生まれ、東京大学工学部土木工学科卒業（博士（工学））、東京大学工学部助手、現在、茨城大学工学部准教授
桑原祐史、1968年生まれ、東京理科大学理工学部土木工学科卒業（博士（工学））、茨城大学工学部助手、現在、茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター准教授
- (5) 谷口真人、1959年生まれ、筑波大学大学院博士課程地球科学研究科修了（理学博士）、現在、総合地球環境学研究所プログラム主幹・教授
梅澤 有、1974年生まれ、東京大学大学院理学系研究科修了（博士（理学））、総合地球環境学研究所上級研究員、現在、長崎大学水産学部助教（総合地球環境学研究所客員研究員）
- (6) 山野博哉（同上）
松永恒雄、1966年生まれ、東京大学大学院工学系研究科修了（博士（工学））、工業技術院地質調査所研究員、現在、国立環境研究所室長

7. 成果発表状況（本研究課題に係る論文発表状況。）

(1) 査読付き論文

- 1) 山野博哉：地図の無い島 - 環礁州島における地理情報の整備と地球温暖化に対する脆弱性評価・適応策への応用- . 地学雑誌, 117, 412-423 (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) 深山直子：ニュージーランド・オークランドにおける太平洋島嶼系住民の祭典—『パシフィカ・フェスティバル』と『ポリフェス』の報告. 日本オセアニア学会NEWSLETTER, 91, 15-21(2008)
- 5) 小林 誠：地球温暖化言説とツバル—海面上昇に関する語りと認識をめぐって. 社会人類学年報, 34, 159-176(2008)
- 6) 佐藤大作、横木裕宗：Funafuti環礁Fongafale島における作用外力と地形変化に関する現地調査、地球環境研究論文集, 17, 77-84 (2009)
- 7) 桑原祐史・江田雄樹・横木裕宗・小柳武和・三村信男：南太平洋島嶼国を対象とした沿岸域防護のためのゾーニング図作成方法の高度化、(社)地盤工学会 環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 8, 389-394 (2009)
- 8) 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)
- 9) 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)
- 10) 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)
- 11) 中田聡史・山野博哉・梅澤有・藤田昌史・渡邊真砂夫・谷口真人：比抵抗法による環礁州島における帯水層の塩水化評価. *日本リモートセンシング学会誌*, **30**(5), 317-330 (2010)
 - 12) 小林 誠：ポリネシア・ツバルの“環境難民”をめぐる覚書—海外移住に関する言説と現状の乖離. *環境創造*, 13, 73-84(2010)
 - 13) 深山直子、石森大知：『沈む』島の現在—ツバル・フナフチ環礁における居住を巡る—考察. *史学*, 79, 57-75(2010)
 - 14) Nakada, S., Yasumoto, J., Taniguchi, M., and Ishitobi, T.: Submarine groundwater discharge and seawater circulation in a subterranean estuarine beneath a tidal flat. *Hydrol. Process.*, DOI: 10.1002/hyp.8016, (2011)