

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

(3) 環礁州島形成維持プロセスの統合モデルと変動予測、モニタリングに関する研究

1) 環礁州島のモニタリングとGISによる診断手法に関する研究

独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター 山野 博哉・松永 恒雄・島崎 彦人

平成15～19年度合計予算額 44,609千円
(うち、平成19年度予算額 7,113千円)

※上記の合計予算額には、間接経費9,814千円を含む。

[要旨] 環礁州島の形成維持機構の解明や脆弱性の評価、適応策の支援のために、リモートセンシングと地理情報システム (GIS) を活用して、(1) 基盤情報の整備、(2) 類型化、(3) 脆弱性評価、(4) 予測と適応策への応用に関する研究を行った。(1)の基盤情報の整備においては、環礁州島の形成維持に関わる要因のグローバルデータベースの構築をおこなった。また、衛星データの環礁州島マッピングに対する適用性を明らかにした。(2)の類型化においては、物理環境によって海域を類型化し、代表調査地選定の支援を行うとともに、衛星データによる環礁州島の類型化を行い、適用策の一般化に向けた体制を整備した。(3)の脆弱性評価においては、類型化された州島と人間居住との関係を検討した結果、州島のタイプごとに永続的な利用に適する州島/適さない州島の区別が可能であることが示された。また、現在高潮位時に洪水の起こっているツバル・フォンガファレ島において108年間の土地利用と社会経済状況の変化を解析し、現在の脆弱性が、地球規模の要因(海面上昇)と地域規模の要因(土地条件と社会経済条件)の複合によるものであることを示した。(4)予測と適応策への応用においては、グローバル規模で州島面積と州島の形成維持に関わる要因を定量的に評価する統計モデルを開発した。海面が上昇した場合の予測を行い、地域的な要因が州島の形成維持に重要であることを示した。歴史を再構築して脆弱性をもたらす地域規模での要因を明らかにすることによって、脆弱性の診断と適応策の立案が可能となることが期待される。こうした歴史情報と現在の地形情報に基づいて海面上昇に対する脆弱性を評価したハザードマップを現地政府に提供し、管理計画に貢献した。

[キーワード] リモートセンシング、地理情報システム、診断システム、類型化、グローバルマップ

1. はじめに

州島の形成維持機構、診断法および適応策を他の環礁州島にも適用できるようにするためには、広域での一般化が不可欠である。環礁州島の形成維持に影響を与えると考えられる要因に関してはグローバル規模でのデータ取得やモデルによる再解析が進んでいる。こうしたデータを収集し、グローバル規模での解析をおこなうことは、州島の形成維持機構、診断法および適応策の一般化に非常に有効であると考えられる。

一方、州島は砂質／レキ質、植生がある／ないなど何種類かが存在することや、非常に地形的に不安定な構造であり成長／消滅している州島があることが指摘され、それは環境要因を反映し、また人間の居住にも影響を与えていると推察される。従って、州島の形成維持機構、環境変動に対する脆弱性、適応策は州島の多様性に応じて多様であることが予想され、州島を類型化するアプローチが有効であると考えられる。現状ではサンゴ礁と州島の分布状況に関する地図はほとんどなく、類型化の試みは一部を除いてほとんどおこなわれていない¹⁾。しかし、現在、衛星データは全球規模での統一データフォーマットでのデータ取得が進んでいるため、州島の類型化に有効であると考えられる。

現在の脆弱性は、地球規模の要因とともに、その影響を受ける地域規模の要因の複合であることが指摘されつつある²⁾。類型化やモデル化の手法を用いた広域での一般化を目指すアプローチに加え、地域規模の要因を明らかにすることにより、具体的な適応策の立案が可能となる。環礁州島から形成され、海面上昇による影響が甚大であることが予測されているツバル³⁾においては、実際に海面上昇が起こっており⁴⁾、それが原因とされる洪水が観察されている⁵⁾。二酸化炭素排出量の削減とともに、こうした顕在化した問題に対して当該地域での具体的な適応策立案の支援を行うことが急務である。

2. 研究目的

本研究では、地理情報のきわめて乏しい環礁州島のマッピングと類型化を中心に、マッピングに関する手法を検討し、州島の形成維持に関わる要因との関係を検討し、維持に重要な要因を明らかにする。また、類型化された州島と人間居住との関係を解析し、適切な州島の利用法の提案をおこなう。以下の4つを主なテーマとして研究を進める。(1) 基盤情報の整備。サブテーマ1、2および3②におよび文献調査より明らかとなった環礁州島の形成維持要因、州島の利用法に関してデータを収集し、全球規模での地理情報システム (GIS) を用いたデータベースを構築する。また、全球のデータ取得がほぼ完了しているLandsat衛星データに加え、高解像度衛星データ、空中写真データを収集し、分類や地形変化の検出に対するリモートセンシングの有効性を明らかにし、マッピングを行い、国土の基盤となる地理情報を整備する。(2) 類型化。海域および州島の類型化を行い、代表調査地選定の支援を行うとともに、適応策の一般化に向けた体制を整える。(3) 脆弱性評価。類型化した州島と人間居住年代を比較することにより、州島の現在の脆弱性を評価するとともに、時系列の画像を解析し、現在の脆弱性をもたらしている要因を明らかにする。(4) 予測と適応策への応用。州島の分布と自然・人文要因の全球規模マッピングに基づいて、広域での両者の関係の解析をおこない、州島の形成維持に重要な要因を明らかにして監視項目を設定するとともに、将来予測を行う。さらに、脆弱性評価の結果に基づいて、ハザードマップを作成し、現地政府に提供して適応策立案の支援を行う。

3. 研究方法

(1) 基盤情報の整備

1) 全球GIS統合データベースの構築

他のサブテーマの成果および関連研究のレビュー⁶⁾により、うねり、風向、ストーム等が州島の形成に重要な物理要因であることが示された。これらの要因と地図及び衛星データに関して、測定データ、再解析データの収集及び文献調査によるデータの収集をおこなった。収集をおこなった項目を表1に示す。これらのデータをGISソフトウェアArcViewおよびArc/Infoを活用して統合データベースとしてまとめた。

表1 収集したデータ。

Theme	Target	Unit	Spatial		Temporal		Name	Source	
			Covergae	Resolution	Covergae	Resolution			
Climatological factor	Solar irradiance	Reef/Island	W/m ²	Global	1.0° GRID	(1983/07 - 1991/06, monthly mean)	SeaWiFS Solar	NASA GISS	
	Wind	Reef/Island	m/s	Global	2.5° GRID	(1980-1995, monthly mean)	GGUAS	NOAA NCDC	
	Cyclone (Indo-Pacific)	Island	---	Indo-Pacific	---	1950-2000	6 hours	Best Track	JTWC
	Cyclone (Atlantic)	Island	---	Atlantic	---	1951-2003	6 hours	HURDAT	NOAA AOML
	Air temperature	People	°C	Global	2.5° GRID	(1980-1995, monthly mean)	GGUAS	NOAA NCDC	
	Precipitation	People	mm/d	Global	2.5° GRID	1979-2003	Monthly	GPCP Ver.2	GPCP
Oceanographic facto	Sea Surface Temperature	Reef	°C	Global	9.28 km GRID	(1985-1997, 5 days mean)	Pathfinder SST	NASA JPL	
	Salinity	Reef	PSU	Global	1.0° GRID	Monthly	WOA01	NOAA NODC	
	Nutrients (Nitrate)	Reef	µmol/l	Global	1.0° GRID	Monthly	WOA01	NOAA NODC	
	Nutrients (Phosphate)	Reef	µmol/l	Global	1.0° GRID	Monthly	WOA01	NOAA NODC	
	Nutrients (Silicate)	Reef	µmol/l	Global	1.0° GRID	Monthly	WOA01	NOAA NODC	
	Wind wave	Reef/Island	---	36°N-36°S	1.5° GRID	1990/01/01-1999/12/31	6 hours	ERA-40	ECMWF
	Primary swell	Reef/Island	---	36°N-36°S	1.5° GRID	1990/01/01-1999/12/31	6 hours	ERA-40	ECMWF
	Wave	Reef/Island	---	36°N-36°S	1.5° GRID	1970/01/01-2002/08/31	6 hours	ERA-40	ECMWF
Tide	Reef/Island	m	Global	0.5° GRID	---	---	NAO.99b	NAO	
Geological factor	Late Holocene sea-level hi	Reef/Island	years B.P.	Pacific	---	---	---	Dickinson (2003) ²⁾	
Ecological factor	Distribution of foraminifera	Island	---	Global	---	---	---	Langer and Hottinger (2001) ³⁾	
Huma factor	Settlement period	Island	years B.P.	Pacific	---	---	---	Dickinson (2003) ²⁾	
Map	Reef location	Reef	---	Global	---	---	Location	Reef Base	
	Coastline	Island	---	Global	---	---	GSHHS	NOAA NGDC	
	Satellite	Reef/Island	---	Marshall Island:	30 m	2000-2003	---	Landsat ETM+	USGS

2) リモートセンシングによるマッピング

Landsat ETM+データ（空間解像度30m）と高解像度衛星IKONOSデータ（空間解像度4m）を収集し、現在まで現地データの蓄積のある沖縄県のサンゴ礁を対象として、これらの衛星データを4つの基本的な底質クラス（サンゴ/草類/藻類/礁岩/砂地）に分類をおこない、分類精度の検証をおこなった。また、重点対象地域であるマーシャル諸島共和国全域におけるLandsat ETM+データを収集し、4つの基本的な地形クラス（潮下帯/潮間帯/潮上帯/植生帯）に分類をおこなった。検証は現地調査データと環礁州島の住民への聞き取り調査に基づいておこなった。また、海岸線抽出に関して、種々の衛星センサーの精度評価を行った。空中写真と高解像度衛星を収集し、過去からの地形・居住地の変化に対する有効性を検討した。

空中写真は、解像度が良いことに加え、ステレオ視が可能であるため、空中写真測量により地形図（DEM）を作成するのに利用されているため、地形情報のほとんどない環礁州島において、地形図を作成する有効なツールとなりうる⁷⁾。しかしながら、環礁州島においては、地形の起伏があまり無いこと、最近の写真が入手しにくいこと、空中写真測量に必要な基準点の特定や測量

が困難であることから、空中写真測量の有効性を検討することが必要である。本年度は、ツバル共和国フナフチ環礁のフォンガファレ島を対象とし、空中写真測量の有効性を検討した。1984年に撮影された縮尺1:10000の空中写真を入手し、2400dpiでスキャンした。現地調査においては、1984年から変化していないと判断される構造物を探索し、2周波GPSを用いて18点の基準点測量をおこなった。これらの基準点データを用いて、デジタル空中写真測量ソフトWinAtlasDSP（KLT Inc.、USA）を用いて処理を行い、精度評価を行った。

（2） 類型化

1) 海域区分

(1) により整備した全球データベースを用いて、環礁州島の成立する海域の区分に関して検討した。海域の区分に際しては、潮位差、波のエネルギーフラックスと台風頻度で区分をおこなった。各要因の値を0から255までの値に変換し、ISODATA法を用いてクラスタリングをおこなった。さらに、各クラスターの平均値と分散を求め、それら統計値に基づいて最尤法を用いて分類をおこなった。

2) 州島の類型化

(1) により整備した分類図を用いて、環礁礁原を礁原の向きに基づいていくつかのセグメントに分け、潮下帯・潮間帯・潮上帯・植生帯の占める面積の礁原全体に対する割合に基づいてクラスタ分析をおこない、各セグメントのタイプ分けを行った。

（3） 脆弱性評価

1) 空間構造に基づく評価

(2) により類型化した州島のタイプと、収集した人間居住時期の関係を検討した。さらに、州島のタイプと人間居住時期の関係に基づいて、居住に適するタイプ、適さないタイプなどいくつかに分け、それと現在の居住形態を比較することにより脆弱性の評価を行った。

2) 歴史情報に基づく評価

(1) で確立したマッピング手法を用いて、サンゴ礁底質分布図や地形図など、基本的な詳細な空間情報の整備を行い、現在高潮位時に洪水の起こっているツバル・フォンガファレ島⁵⁾を対象として、大潮の満潮時に浸水する地域を推定し、さらに過去の地図や空中写真を幾何補正して時系列のデータベースを作成した（図5）。地形に関しては、過去の報告書の断面データ⁸⁾と、前年度に作成した標高図⁹⁾の標高を比較した。さらに、土地利用や地形変化の要因として、社会経済状況や人口増加^{10)、11)}に着目し、それらのデータを収集した。用いたデータを表2に示す。

表2 ツバルの時系列解析に使用したデータ。

1896-97年：地質図，地形断面図⁸⁾

1941年：空中写真

- 1943年：空中写真
- 1973年：地図 (Lands & Survey, Tuvalu)
- 1984年：空中写真，標高図⁹⁾
- 2003年：Ikonos衛星データ

(4) 予測・適応策への応用

1) 全球データベースを用いた予測

衛星データを用いて作成された州島分布データ¹²⁾を用い、太平洋とインド洋の213の環礁において、各環礁での州島の面積比率を求め、面積率と、物理的要因（波のエネルギー、潮位、台風の頻度等）及び他の要因（生物による砂生産など、地域的要因をランダム項として扱った）との関係を定量的に明らかにする一般化線形混合モデルに基づいた統計モデルの開発を行った（図1）。これに基づき、各要因の重み付けを行うとともに、IPCC第4次報告書に基づいて、将来海面が59 cm上昇した場合の予測を行った。予測に際しては、各要因のうち海面（潮位差）だけを変化させた場合の島面積の変化予測と、ランダム項の変動を考慮した場合の島面積の変化予測を行った。

第1階層: 州島区画数 n_i は、州島の形成維持ポテンシャル ρ_i とサイズパラメータ n_i の二項分布に従うと仮定。

$$m_i \sim \text{Binomial}(\rho_i, n_i)$$

第2階層: q 個の要因 x_i から、州島の形成維持ポテンシャル ρ_i を予測。

δ_k : 海域の違い ($k=1, 2, \dots$) によるパラッキ
 ε_i : 環礁の違い ($i=1, 2, \dots, 213$) によるパラッキ

$Y(s_p) = 1$ となる確率 p_y は、実際には、局所環境の違いに応じて、個々の区画で変化する。しかしながら、それに関する事前情報は入手困難。モデル構築の実現性を重視する立場から、確率 p_y は空間的に一様である、と仮定してしまう。

$$\log\left(\frac{\rho_i}{1-\rho_i}\right) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_q x_{iq} + \delta_k + \varepsilon_i$$

$$\delta_k \sim N(0, \sigma_\delta^2), \quad \varepsilon_i \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$$

図1 要因と州島の面積率を対応づける一般化線形混合モデル。物理的要因はxで、他の地域的要因はランダム項・・・で表現した。・・・を求め、各要因の寄与を推定する。その後、海面上昇した場合の面積率の変化を解析する。

2) ハザードマップの作成

ツバルにおいて、(1)の地形図作成と、(2)の時系列画像に基づく解析により、元の湿地帯の分布と現在の低地の分布を抽出し、ハザードマップを作成した。危険度評価の際には、元の湿地帯と現在の低地が重なっているところを危険度の高い地域とし、どちらか一方の場合は危険度を中程度とした。

4. 結果・考察

(1) 基盤情報の整備

1) 全球GIS統合データベースの構築

全球GIS統合データベースにより、環礁州島が位置する条件に関して、気象条件（風系、台風頻度、降水量）、海象条件（うねり、風波）、生物的な条件（造礁生物分布）、地学的条件（海面変動史）などすべてが海域によって大きく異なることが明らかになった（図2）。

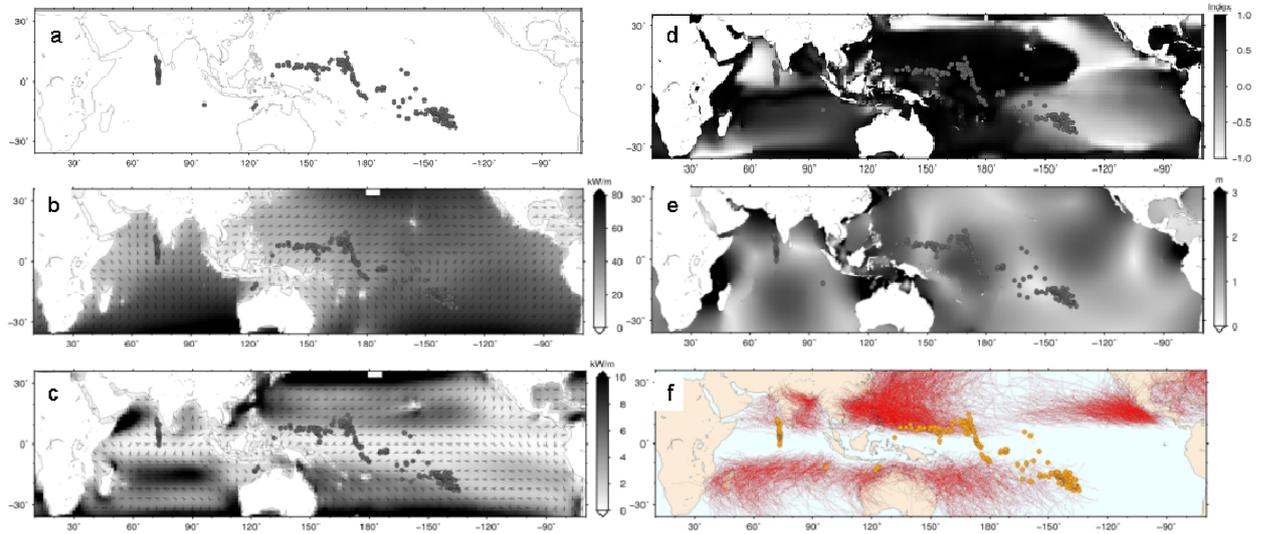


図2 全球データベースの例。(a)環礁の分布、(b)うねりのエネルギーと方向、(c)風波のエネルギーと方向、(d)うねりと風波の方向の一致度、(e)潮位差、(f)台風の経路。

2) リモートセンシングによるマッピング

衛星データによるサンゴ礁の底生生物の分類精度は4つの基本的な底質クラス（サンゴ／草類・藻類／礁岩／砂地）においてLandsat ETM+で64%、高解像度衛星Ikonosで81%であった。サンゴ礁の変化を正確に把握するためには高解像度衛星が必要であることが示された。環礁州島に関しては、4つの基本的な地形クラス（潮下帯／潮間帯／潮上帯／植生帯）の分類で90%程度の分類精度を達成した。したがって、取得範囲の大きさ、画像の取得コストを考慮すると広域での環礁州島の類型化にはLandsat ETM+が最も適当であることが示された。

海岸線抽出に関して、マーシャル諸島共和国マジュロ環礁において、近赤外バンドと中間赤外バンドを用いて検出された海岸線位置と、地形断面図の一例を示す（図3）。全体的に、中間赤外より近赤外バンドの方が海岸線を忠実に再現している。これは、低潮位時にサンゴ礁上に水が残るため、それが中間赤外域の光を吸収しているためであると考えられる。砂浜における汀線位置の誤差は、Terra ASTERを用いた場合SDで8.2-9.9mであった。この誤差は、従来空中写真や地図から推定された汀線位置の誤差の値の範囲内に収まっており、衛星データを用いて過去の地図と同等の精度で海岸線が検出できることが示された。

Transect 5

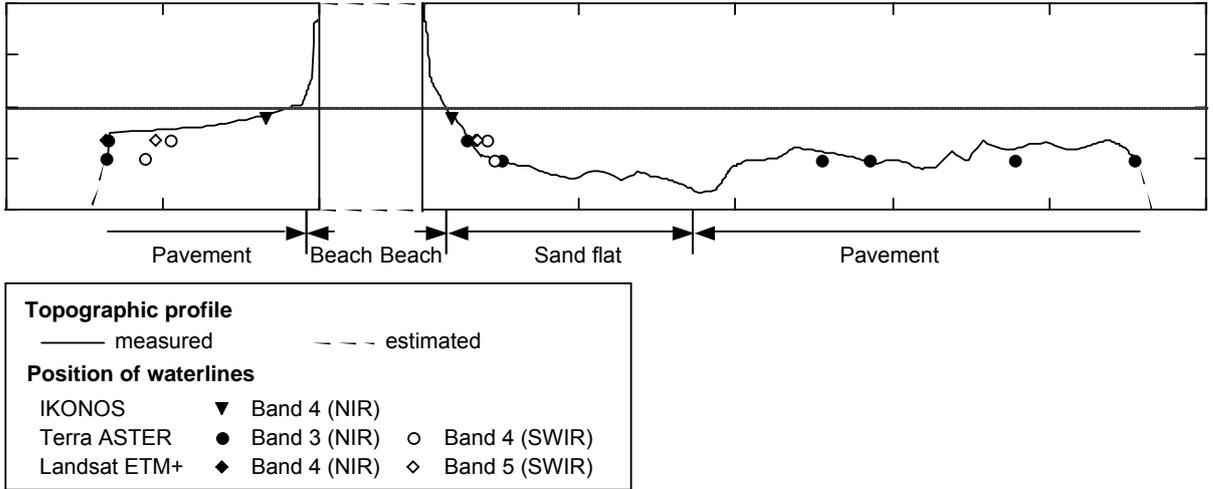


図3 衛星センサーのバンドより推定された汀線位置と、実際の地形断面図。近赤外バンドの方が、実際の地形断面図と良く一致している。

新たに作成されたフォンガファレ島のDEM値と実測値との誤差は、SDで22.4cmであった。これは、州島以外の陸域で空中写真測量により作られたDEM値の誤差と同等であり、環礁州島においても、基準点を適切に選ぶことにより、写真測量により精度良くDEMが作成できることが示された。図4にフォンガファレ島の鳥瞰図を示す。島の中央の窪地、外洋側のストームリッジが再現されているのがわかる。

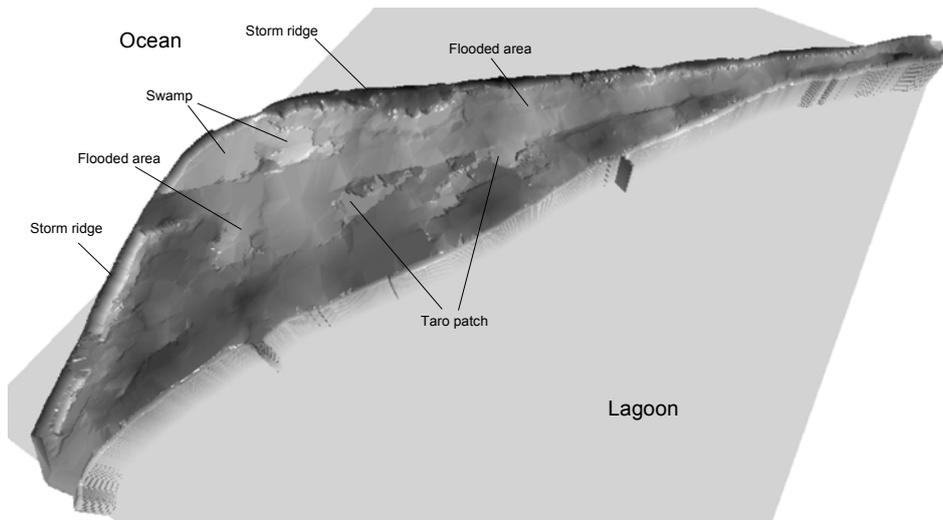


図4 デジタル空中写真測量により生成されたフナフチ環礁フォンガファレ島の鳥瞰図。

空中写真の解析により、マジュロで州島地形の変化の把握が可能であること（サブテーマ3-

②) に加え、ツバルで1941年には集落の位置がラグーン側の浜堤上にものみ分布していたが、1983年には低地にまで拡大していることが明らかになり（サブテーマ1）、土地利用に対する空中写真と高解像度衛星の有効性が明らかになった。

(2) 類型化

1) 海域の類型化

波のエネルギーフラックスと台風頻度に基づく海域区分の結果、インド洋と太平洋は4つの海域に区分できることが明らかになった。赤道型は、台風が少ないことで特徴付けられる。西太平洋型は台風・波のエネルギーとも中程度、東太平洋型は台風は少ないが波のエネルギーが大きいことで特徴付けられる。

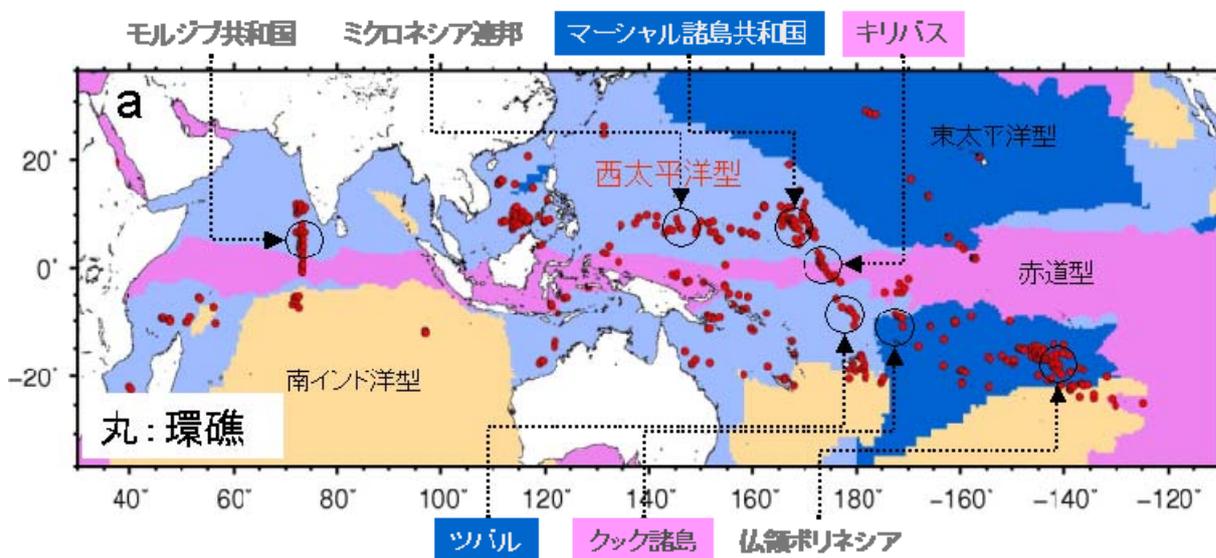


図5 海域区分結果。

2) 州島の類型化

マーシャル諸島共和国全域の州島は大きく7つのタイプに分類することができた（図6）。その結果、風上側、風下側に成立する州島のタイプが明らかになった。風上側には連続性の悪い州島が、風下側には細く連続性の良い州島が発達する。マジュロ環礁におけるローラなど礁原全体に対して州島の占める面積の割合が大きい州島は、風上風下に関係なく環礁の角に成立している。

(3) 脆弱性評価

1) 空間構造に基づく評価

州島への居住時期のデータと比較すると、古くから居住のあった州島は礁原全体に対して州島の占める面積の割合が大きい（図6）。マジュロにおいては、現在都市化している州島（ウリガ）

はもともとは居住に適さない(居住開始時期が遅い)グループに分類されることが明らかになった。実際に、1912年の段階ではウリガよりローラの方が人口が多く、また、1979年の高潮時には、ウリガからローラに避難がおこなわれており⁴⁾、これらのことからローラの方が居住に適する州島であることが考えられる。したがって、類型化の結果は州島のもつ本来の居住に対するポテンシャルを示しており、現在の州島の利用形態と比較することにより、州島に圧力がかかっているか診断できる可能性がある。

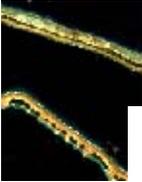
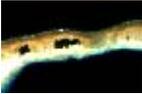
Type of rim	Description	Island	Atoll	Oldest age of archaeological features	Reference	Example
Ia	Large vegetated island on intertidal reef flat at the corner	Laura	Majuro	2010 BP	Yamaguchi et al. (submitted) Streck (1990) Shun and Athens (1990), Beardsley (1993) Weisler (2001a,b) Weisler (1999b) Streck (1990) Weisler (2001a,b) Dye (1987)	
		Eneu	Bikini	2000 (2575) BP		
		Kwajalein (original)	Kwajalein	1920 BP		
		Utirik	Utirik	1860 BP		
		Ujae	Ujae	1680 BP		
		Bikini	Bikini	1670 (3450) BP		
		Aon	Utirik	1590 BP		
Arno	Arno	1040 BP				
Ib	Scattered islands or long narrow island on intertidal reef flat	Legan	Kwajalein	ca. 600 BP	USASSDC (1995) Riley (1987) USASSDC (1995) Riley (1987) Riley (1987) Riley (1987)	
		Calalin	Majuro	360 BP		
		Illeginni	Kwajalein	Prehistoric		
		Arniel	Majuro	Historic		
		Djarrit (original)	Majuro	None		
		Uliga (original)	Majuro	None		
Ic	Heavily developed islands on intertidal reef flat	Kwajalein (present)	Kwajalein	1920 BP	Shun and Athens (1990), Beardsley (1993) Riley (1987) Riley (1987)	
		Djarrit (present)	Majuro	None		
		Uliga (present)	Majuro	None		
IIa	Scattered islands on intertidal and subtidal reef flat	Bikrak	Utirik	1470 BP	Weisler (2001a,b) Dye (1987) Weisler (2001a,b) Dye (1987) Streck (1990) Dye (1987) Dye (1987) Dye (1987) Dye (1987)	
		Bikarej	Arno	1030 BP		
		Allok	Utirik	520 BP		
		Ajmunal	Arno	Prehistoric/Historic		
		Nam	Bikini	N/A		
		Kwarijilang	Arno	None		
		Reboiang	Arno	None		
		Autotali	Arno	None		
		Kilange	Arno	None		
IIb	Small scattered islands or long narrow island on intertidal and subtidal reef flat	Jebu	Arno	Prehistoric	Dye (1987) Riley (1987) Dye (1987) Dye (1987) Dye (1987)	
		Majuro	Majuro	Historic		
		Tutu	Arno	Historic-Modern		
		Matolen	Arno	Recent		
		Bokarik	Arno	None		
IIc	Few or no islands on intertidal and subtidal reef flat	Gelliman	Kwajalein	None	USASSDC (1995) USASSDC (1995) USASSDC (1995)	
		Meck	Kwajalein	None		
		Omelek	Kwajalein	None		
III	Few or no islands on subtidal reef flat	Ulien	Arno	Historic	Dye (1987) Dye (1987)	
		Aninerik	Arno	None		

図6 類型化された州島のタイプと成立条件、人間居住データとの対応。

2) 歴史情報に基づく評価

図7にフナフチ環礁フォンガファレ島の108年間の土地利用、居住地の変化を、図8に地形変化

を、図9に人口及び社会経済状況の変化を示す。1986年にはフォンガファレ島中央部には大きな湿地帯があり、居住地はビーチリッジ上に限られていた。それは少なくとも1941年まで続いたが、1943年の滑走路建設により、湿地は急速に埋め立てられ、土地利用は大幅に変化した（図7、8）。その後、土地利用は基本的に変化していないが、独立や鉱山の衰退による海外労働者の帰還、コブラの衰退による現金収入の不足により首都であるフォンガファレ島に人口が集中し（図9）、居住地が元の湿地帯にまで拡大した（図7）。現在洪水が起こっているのは、この元湿地帯である。したがって、フォンガファレ島の現在の脆弱性は、地球規模の要因（海面上昇）と地域規模の要因（元の土地条件と社会経済条件）の複合によるものであることが明らかとなった。考古学的にも（サブテーマ2）フォンガファレ島は居住年代が若いため、この結果は考古学からも支持されるものであり、地形・土地利用・人間居住の歴史的な変遷を組み合わせることにより、脆弱性の診断や適応策の立案が可能となることが期待される。

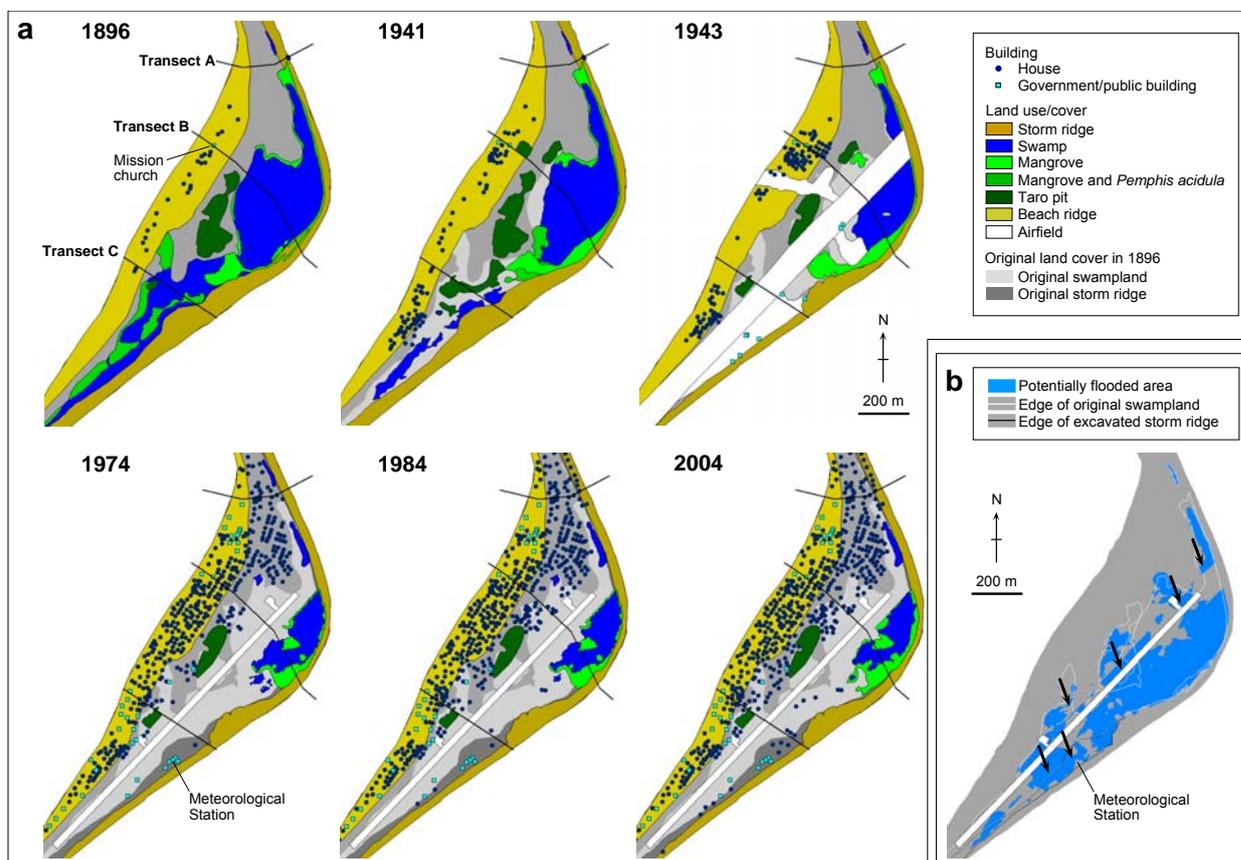


図7 地図と空中写真を幾何補正し、分類を行って年代別に並べたもの。かつての湿地に現在の居住地が拡大してきていることと、人口の増加と集中によって居住地が元湿地に拡大し、そこで現在洪水が起こっていることがわかる。

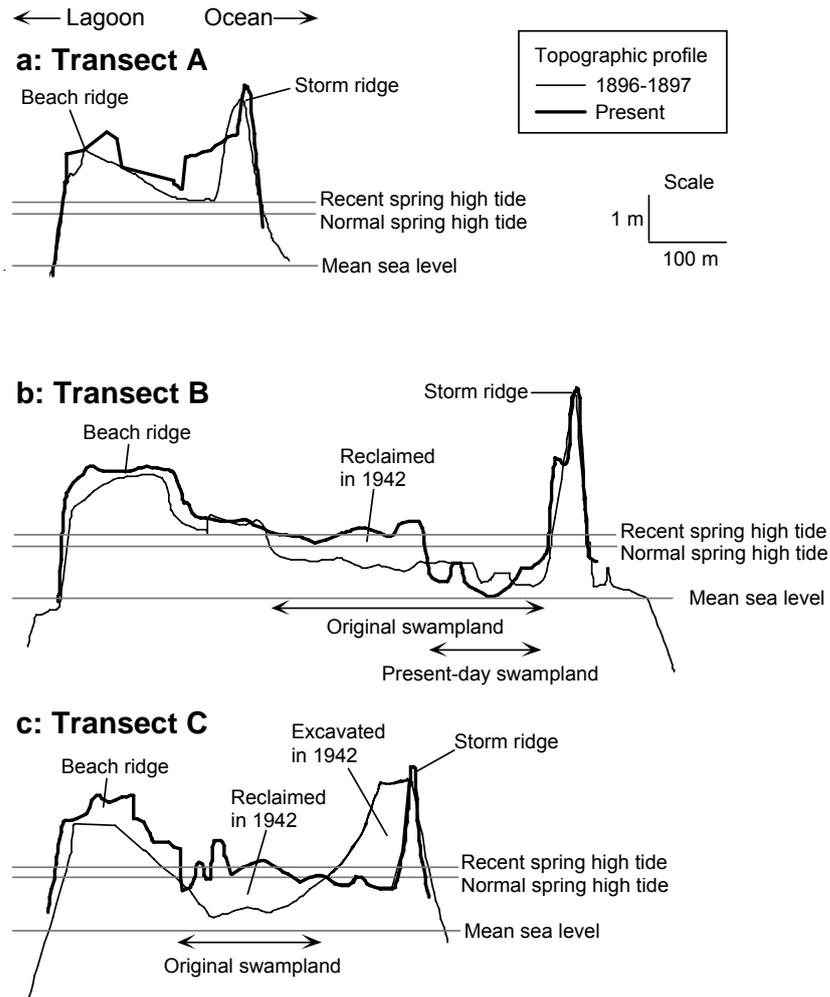


図8 1896年と現在の地形断面図の比較。滑走路建設にともなって大規模な地形変化が起こったこと、現在でも元湿地帯は低地で、洪水が起こりやすいことを示す。

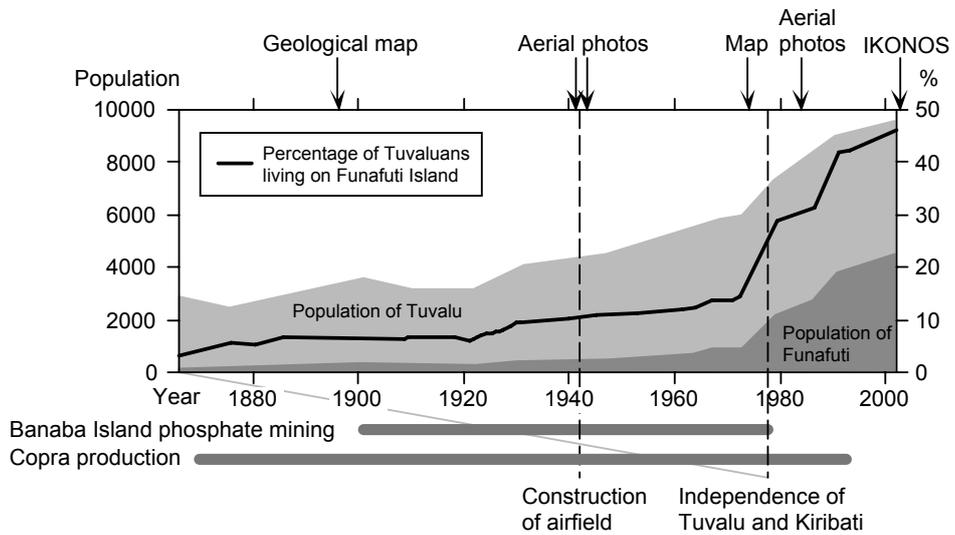


図9 ツバルをとりまく社会経済状況と人口の変化。独立や鉱山の衰退による海外労働者の帰還、コプラの衰退による現金収入の不足により首都であるフォンガファレ島に人口が集中した。

(4) 予測・適応策への応用

1) 全球データベースを用いた予測

潮位差に加えて風波、うねりと潮位差の作用が有意に州島の形成に作用していることが明らかになった。今後、海面上昇だけでなく、波の変化に関して予測精度を上げる必要性が明らかになった。また、誤差項として入れた地域スケールでの要因も無視できない影響を与えることが明らかとなり、砂の生産量の保全など地域規模での要因の監視や管理の重要性が示唆された。これは、以下の(2)節で示す、環礁州島の脆弱性が地球規模の要因と地域規模の要因の複合によるものであることを補完する結果である。

図10に地域的な要因(ランダム項)を固定し、海面上昇のみを考えた場合の島面積の変化を示す。海面上昇のみを考えた場合は、多くの島面積が減少する(図10a)が、係数の不確実性を考慮すると、全ての島に関して、面積が減少しないポテンシャルがあることが明らかとなった(図10b)。

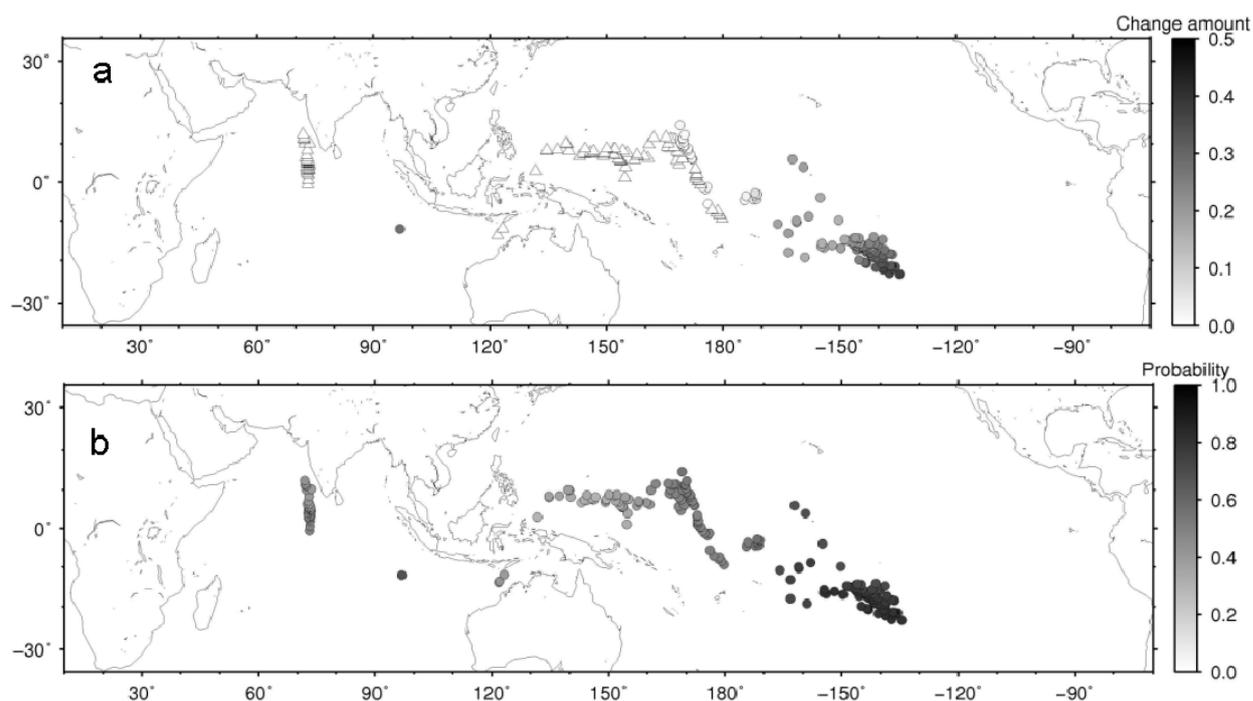


図10 海面が上昇した場合の(a)島面積の変化と(b)島の面積が増加する確率。

図11には、地域的な要因(ランダム項)がすべてプラスに働く場合と、マイナスに働く場合の島面積の増加確率を示す。管理計画が成功し、地域的な要因がすべてプラスに働くと、海面が上昇してもすべての島が面積を増大させるポテンシャルがあることがわかる。一方、管理計画が失敗し、地域的な要因がすべてマイナスに働くと、全ての島が面積を減少させてしまう。このことは、以下

の上記でも示された、環礁州島の脆弱性が地球規模の要因と地域規模の要因の複合によるものであることを補完する結果であり、地域的要因の理解が適応策の立案に必要であることを示すものである。

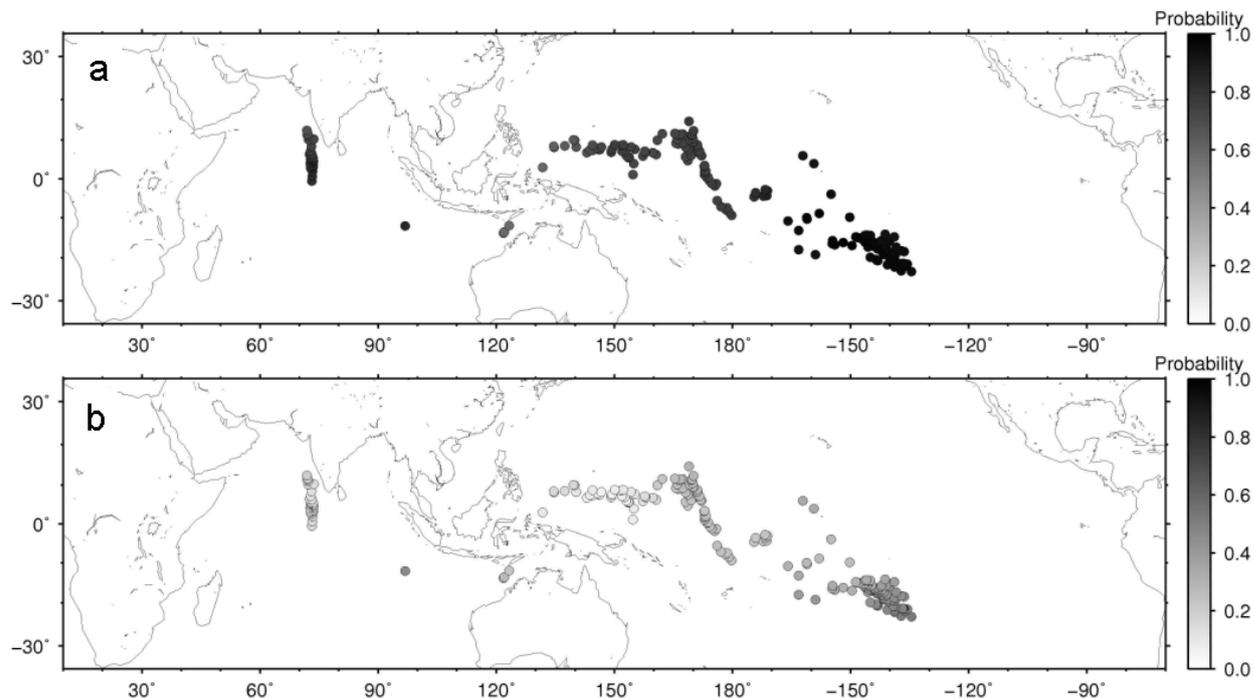


図11 (a)地域的要因がプラスに働いた場合と(b)マイナスに働いた場合の島面積が増加する確率。

2) ハザードマップの作成

図12にツバル政府に提供したハザードマップを示す。このことにより、海面上昇に対して脆弱な地域が明らかとなった。

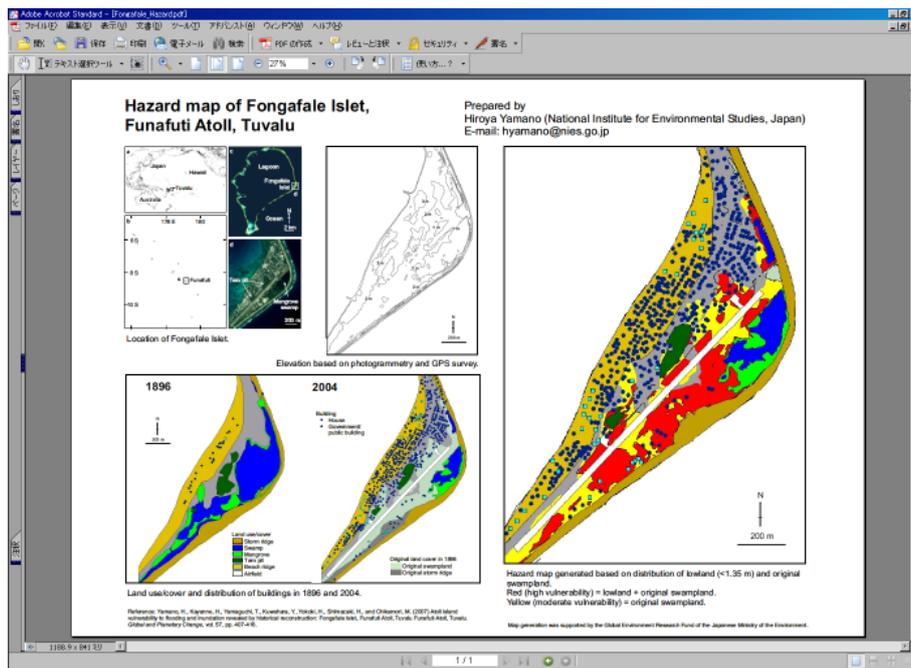


図12 歴史情報と現在の地形に基づいて作成されたハザードマップ。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

- ・ 州島のマッピングに関して、リモートセンシングの能力を定量的に明らかにした。
- ・ 全球データベースの整備により、州島の立地条件と形態は多様であることを明らかにするとともに、類型化を行う方法を開発した。
- ・ 空間構造・歴史情報に基づく脆弱性評価の方法を開発し、適用した。時系列の空間データと社会経済・人口データを解析することにより、現在の環礁州島の脆弱性が、地球規模の要因（海面上昇など）と地域規模の要因（土地条件と社会経済条件）の複合によるものであることを示した。また、初期居住年代が州島の脆弱性を反映している可能性を指摘した。空中写真・衛星データや人口データは1940年代から現在まで揃っており、考古学的知見も蓄積されつつあるため、この歴史の再構築という手法はツバルのみならず、他の環礁州島に適用することが可能であり、今後の脆弱性評価に役立つものである。
- ・ 全球データベースを用いた解析により、州島の形成に重要な要因を定量的に明らかにするとともに、各環礁における将来予測を可能とした。その結果、地域的な要因の重要性が示された。

(2) 地球環境政策への貢献

- ・ 本研究は、現在の脆弱性をもたらす要因をモデル化し、重要な監視項目を設定するとともに、地域規模での要因の重要性を示すもので、当該地域での具体的な温暖化に対する適応策の立案に資するものである。

- ・ 歴史の再構築に基づいて土地条件図を作成してゾーニングを行い、適切な利用計画を行う施策の立案が可能となることが期待される。
- ・ 本研究で得られた成果（ハザードマップ等）は、マーシャル諸島共和国及びツバル共和国に提供され、沿岸管理計画に活用された。
- ・ 環境省・JICAが計画しているツバル支援策に際し、情報提供を行った。

6. 引用文献

- (1) 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.: Efforts to generate maps of atoll countries. *Global Environmental Res.*, **9**, 37-46 (2005).
- (2) Tompkins, E.L., Nicholson-Cole, S.A., Hurlston, L.-A., Boyd, E., Hodge, G.B., Clarke, J., Gray, G., Trotz, N., and Varlack, L.: Surviving Climate Change in Small Islands: A Guidebook. Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich (2005).
- (3) Sem, G., Campbell, J.R., Hay, J.E., Mimura, N., Ohno, E., Yamada, K., Serizawa, M., and Nishioka, S.: Integrated Coastal Zone Management Programme for Fiji and Tuvalu. Coastal Vulnerability and Resilience in Tuvalu. Assessment of Climate Change Impacts and Adaptation. Phase IV, Environment Agency of Japan, Tokyo (1996).
- (4) Church, J.A., White, N.J., Hunter, J.R.: Sea-level rise at tropical Pacific and Indian Ocean islands. *Global and Planetary Change*, **53**, 155-168 (2006).
- (5) Patel, S.S.: A sinking feeling. *Nature*, **440**, 734-736 (2006).
- (6) Yamano, H., Chikamori, M., and Kayanne, H.: An overview of the nature and dynamics of reef islands. *Global Environmental Res.*, **9**, 9-20 (2005).
- (7) BPAQ: *Green Island Data Report*. Beach Protection Authority, Queensland. (1989).
- (8) Coral Reef Committee of the Royal Society: The Atoll of Funafuti. Borings into a Coral Reef and the Results. Royal Society of London, London (1904).
- (9) 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).
- (10) Munro, D., Bedford, R.: Historical background. In: Government of Tuvalu (Ed.), *A Report on the Results of the Census of the Population of Tuvalu 1979*. Government of

Tuvalu, Funafuti, pp. 1-13 (1980).

(11) Secretariat of the Pacific Community: Tuvalu 2002 Population and Housing Census: Volume 1 Analytical Report. Secretariat of the Pacific Community, Nouméa (2005).

(12) Andréfouët, S., Muller-Karger, F.E., Robinson, J.A., Kranenburg, C.J., Torres-Pulliza, D., Spraggins, S.A., and Murch, B.: Global assessment of modern coral reef extent and diversity for regional science and management applications: a view from space. *Proceedings of the 10th International Coral Reef Symposium*, 1732-1745 (2006).

7. 国際共同研究等の状況

Pacific Islands Applied Geoscience Commission (SOPAC) (フィジー) と太平洋域の環礁州島マッピングに関する共同研究を開始し、空中写真や衛星データの提供を受けた。また、マーシャル諸島共和国及びツバル共和国の現地機関と共同で空中写真や衛星データの解析を行い、沿岸管理計画の支援を行っている。

南フロリダ大 (アメリカ) およびフランス開発研究所 (フランス、ニューカレドニア) がおこなっているMillennium Coral Reef Mapping Projectに参加し、Serge Andréfouët博士 (フランス開発研究所) と共同で全球サンゴ礁データベースの解析を行った。

州島の形成維持に関して、Guy Cabioch博士、Christophe Chevillon博士、Jean-Lambert Join博士 (フランス開発研究所) と共同研究を開始した。また、Colin Woodroffe博士 (オーストラリア・ウロンゴン大)、Marshall Weisler博士 (オーストラリア・クイーンズランド大)、Paul Kench博士 (ニュージーランド、オークランド大) と環礁州島の形成維持と人間居住に関する情報交換を行った。

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ユ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. : The use of multi-temporal satellite images to estimate intertidal reef-flat topography. *Journal of Spatial Science*, **52**, 71-77 (2007).
- 15) 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).
- 16) 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).
- 17) 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).
- 18) 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) 大西俊次, 今枝良平, 佐野滋樹, 伊藤和弘, 山野博哉, 茅根 創: マーシャル諸島マジュロ環礁におけるGPS測量とジオイド. *先端測量技術*, **96**, 48-51 (2008).
- (2) 口頭発表 (学会)
- 1) 山野博哉, 田村正行, 横木裕宗, 近森正, 山口 徹, 茅根 創: 衛星データによるマーシャル諸島共和国における環礁州島の形態分類. 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, 53).
 - 2) Yamano, H., Shimazaki, H., Yokoki, H., Yamaguchi, T., Chikamori, M., Tamura, M., Kayanne, H., Watanabe, S., and Yoshii, S. : Satellite-based typology of atoll islands, environmental controls, and human settlement. 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa, June-July, 2004; (Abstract, 350).
 - 3) 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. 10th International Coral Reef Symposium, Okinawa, June-July, 2004; (Abstract, 111).

- 4) 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. CoastGIS' 06, Wollongong, Australia, July 2006; CD-ROM.
- 5) Yamano, H.: The use of multi-temporal satellite images to estimate intertidal reef-flat topography. CoastGIS' 06, Wollongong, Australia, July 2006; CD-ROM.
- 6) Shimazaki, H., Yamano, H., Andrefouet, S., Tamura, M., and Kayanne, H.: Size and shape analyses of atolls and atoll islands over a global spatial scale. CoastGIS' 06, Wollongong, Australia, July 2006; CD-ROM.
- 7) Yamano H., Kayanne H., Yamaguchi T., Kuwahara Y., Yokoki H., Shimazaki H., and Chikamori M.: The nature of Tuvalu's vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction for 108 years. GeoHab 2007, Noumea, New Caledonia; (unpaginated Abstract).
- 8) Yamano H., Kayanne H., Yamaguchi T., Kuwahara Y., Yokoki H., Shimazaki H., Chikamori M.: The Nature of Tuvalu's vulnerability to sea-level rise revealed by historical reconstruction. 21st Pacific Science Congress, Okinawa, June 2007; (Abstracts, 209).
- 9) 大西俊次, 今枝良平, 佐野滋樹, 伊藤和弘, 山野博哉, 茅根 創: マーシャル諸島マジュロ環礁におけるGPS測量とジオイド. 第108回日本測地学会秋季大会, 2007年11月; (講演要旨集).
- 10) 島崎彦人, 山野博哉: 空間統計モデルに基づく州島の形成維持要因の検討. 第17回生研フォーラム, 東京, 2008年3月; (論文集).

(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回太平洋学術会議 (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

山野が日本サンゴ礁学会川口奨励賞を受賞（2007年11月）。受賞内容「リモートセンシングを用いたサンゴ礁環境の解析に関する研究」の一部に、本プロジェクトの成果が含まれる。

