

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2006～2009

課題番号：18251003

研究課題名（和文）

環礁立国におけるサンゴ礁の防災機能と礁－洲島系の構造維持に関する研究

研究課題名（英文）

Study on disaster protection function of coral reefs and maintenance of structure for reef-island system in atoll nations

研究代表者

菅 浩伸 (KAN HIRONOBU)

岡山大学・大学院教育学研究科・教授

研究者番号：20294390

研究成果の概要（和文）：

本研究課題では、インド洋モルディブ共和国で津波に対する環礁洲島の応答、環礁洲島の地盤、洲島地形についての現地調査を行い、太平洋の環礁立国（マーシャル諸島共和国・キリバス・ツバル）での地形調査とあわせて、環礁立国の持続的発展へ向けての見通しを得た。津波に対する環礁や洲島の構造的な強さと、洲島上のインフラストラクチャーの脆さが明らかになった。また、世界で初めて環礁洲島で発生した地盤崩壊より、続成作用による堅固な礁構造が重要であることが明らかになり、洲島における国土開発に限度があることが示された。

研究成果の概要（英文）：

This study aims to observe prospects for sustainable development of atoll nations. Surveys were conducted for atoll islands on the response against tsunami, substrate geology and topography in Maldives in the Indian Ocean along with the topographic surveys in atoll nations in the Pacific (Republic of Marshall Islands, Kiribati and Tuvalu). We observed the structural strength of atoll and coral islands in contrast to the vulnerability of infrastructures on islands against tsunami. We also observed a large-scale underwater collapse of a reef wall at Malé, the capital city of the Republic of Maldives. Our findings point out the importance of hard geological structure of Holocene reef with submarine cementation for substrate geology for atoll islands, and also a geohazard risk that may be common in seriously overpopulated coral cay cities around the world.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	9,600,000	2,880,000	12,480,000
2007年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
2008年度	9,000,000	2,700,000	11,700,000
2009年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
総計	32,900,000	9,870,000	42,770,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：地理学・地理学

キーワード：サンゴ礁, 環礁, 海面上昇, 地盤崩壊, 津波, 都市化, 地形, 地質

### 1. 研究開始当初の背景

太平洋・インド洋には環礁と呼ばれるサンゴ礁上に成立したサンゴ洲島によって国土を構成している環礁立国がある。海面上昇に対する環礁洲島の脆弱性は1980年代後半以降指摘され続けている。1989年11月、モルディブ共和国マーレにて開催された海面上昇に関する14カ国の政府レベル会議にて、温暖化と海面上昇に関する「マーレ宣言」が採択された。そこで海面上昇が低平な国の国土とインフラストラクチャーに対する甚大な被害を及ぼし、いくつかの島嶼国は存続の危機にさらされるとのアピールがなされた。

さらに2004年12月26日、スマトラ沖地震によるインド洋大津波が発生した。モルディブ共和国では死者82名、不明者26名、3,997戸の住宅・建造物被害が発生し、国民の約三分之一が深刻な影響を受けた。この津波は環礁立国にとって歴史上最大の津波であった。環礁で津波がどのような現象を引き起こし、環礁の上に乗るサンゴ洲島がどのような影響を受けるかについての研究報告はこれまでにない。

モルディブ共和国の首都マーレ島では、津波による災害に加えて、洲島の基盤をなすサンゴ礁の一部が崩壊し、その周辺に多数の亀裂が発見されるという事態が発生した。洲島の開発が原因と考えられる。このような問題が生じたのは、世界的にもマーレ島が始めてである。

### 2. 研究の目的

これまで、防災基盤としてサンゴ礁の研究が行われることはなかった。サンゴ礁の防災機能について検討し、礁一洲島系の構造維持を図ることは、環礁立国の持続的発展を支える基礎となる。本研究課題では、津波に対する環礁洲島の応答、環礁洲島の地盤、環礁洲島の地形についての現地調査を行い、環礁立国の持続的発展へ向けての重要な知見と見通しを得ることを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず2004年インド洋大津波で被災したモルディブ諸島北部から南部の43島にて、モルディブ政府環境リサーチセンターと共同で、水位痕の計測、地形断面測量を行い、あわせて津波の襲来状況や避難行動についての住民への聞き取り調査を行った。

次にマーレ島のサンゴ礁崩壊現場より、洲島基盤のサンゴ礁の堆積構造の観察と岩石試料の微細構造の検討等を行った。マーレ島では地盤構造を明らかにするためのボーリ

ング調査も行った。完新世サンゴ礁の構造のうち、地盤構造として特に重要な固結層をつくる続成作用（サブマリンセメント作用）については、エネルギー分散型X線分析装置付き走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）を導入して観察を行った。

さらに、モルディブ諸島の結果を太平洋の環礁立国に適用する基礎として、東経170～180度の間に、ほぼ南北方向でならぶ3つの国（北緯7度のマーシャル諸島・マジュロ環礁、北緯1度のキリバス・タラワ環礁、南緯8.5度のツバル・フナフティ環礁で礁一洲島系の地形調査を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 津波に対する環礁洲島の応答

モルディブ諸島では南部の島々が甚大な被害を被った。我々が計測した津波の遡上高（図1）も南部ほど高い。

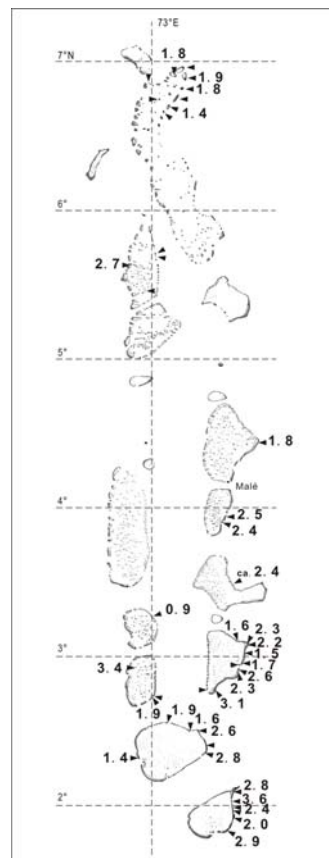


図1  
モルディブ諸島で計測した津波遡上高の分布

北部環礁群の東側に位置する洲島では外洋側に高度が平均海面上2～3mのビーチリッジが形成されていること、環礁の縁が不連続なため津波が容易に礁湖内に進入したことが、環礁東側の洲島での被害を軽減した。しかし、環礁西側の島や礁湖側の集落で大き

な被害が発生した。

中部に位置する南北マーレ環礁の洲島は、高度が平均海面上1m程度と低く、ビーチリッジの発達も見られない。これらの洲島ではまず、東側から押し寄せた津波の第一波で大きな被害が発生している。それにつづいて、礁湖側から押し寄せた水塊にも襲われ、浸水や塀の崩壊がおこった。中部環礁群では環礁の縁が北部より連続しているが、複数の水路によって外洋と礁湖がつながっている。中部環礁群でも津波が礁湖へ進入し、水位の上昇があったとみられる。

南部環礁群の洲島は高度が平均海面上1m程度と概して低平である。この地域では東の環礁群(ミーム環礁、ター環礁、ラム環礁)の東側に位置する島々で遡上高が高く(最大3.6m)、被害が甚大であった。ここでは津波が連続性の良い環礁の縁にぶつかり、環礁上の洲島を襲ったことが被害を大きくしたと考えられる。ただし環礁西側や礁湖内での被害も少なかった。環礁東縁とその上に載った洲島が防波堤の役割を果たしたと考えられる。

津波遡上高は、南部の環礁東縁に載る洲島で高くなっており、津波被害の分布と一致する。以上のような地形の違いが、環礁における津波の挙動と洲島の被災規模の違いを生じさせていると考えられる。北ほど高く南で低い潮位計の値については、これらの設置場所が礁湖側に位置する港であることから、礁湖の水位上昇を記録していたと考えれば現地の状況と整合的である。

インド洋大津波では波源域の西側地域では前兆を伴わずに襲来したと一般にいられている。しかし、南部モルディブにおける聞き取り調査では、津波襲来前に浅いサンゴ礁の上で海水が泡立つ現象(バブリング)や、洲島上で水が地面から泡立ちながら音をたてて沸いてきたなど、多孔質の環礁洲島の構造によるとみられる現象も住民の証言から復元された。以上に加えて、津波前の轟音などの前兆があったこともわかった。

環礁とその上に載る洲島の津波に対する応答を模式的にあらわすと図2のようになる。モルディブ諸島ではほとんどの洲島で津波による大きな地形変化はみられなかった。また顕著な津波堆積物もみられなかい。洲島の表面は細粒の砂であるにもかかわらず、津波後その姿にほとんど変化はなかった。広範な海域でのサンゴ礁調査では、現生サンゴへの影響もモルディブ全域をとおしてわずかであったことが確認されている。モルディブ諸島の環礁および洲島の礁-堆積物の地形・地質システム、および海面下の生態系は、津波に対しては大きな影響を受けなかったといえよう。しかし洲島上の建造物・植生そして住民たちは大きな被害を受けた。このように津波に対

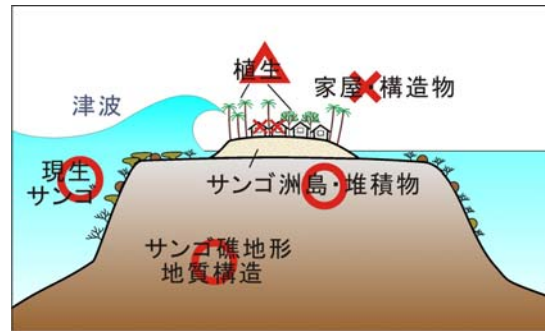


図2 環礁・洲島の津波に対する応答  
○: 津波に対して大きな被害なし, △: 一部で被害あり, ×: 被害大。

する環礁や洲島の構造的な強さと、その上に載るインフラストラクチャーの脆さが浮き彫りになった。この津波によってモルディブ共和国が受けた被害は、今後の大津波によって太平洋・インド洋の環礁立国・環礁地域が被る可能性のある被害を示唆しており、より安全な国土とはどのような島であるかを考える基礎となる。

## (2) サンゴ礁の地盤崩壊にみる洲島開発の危険性

2002年2月6日、マーレ島北東部にて洲島の基盤となっているサンゴ礁の一部が崩壊し、その周辺に多数の亀裂が発見された(図3)。崩壊は幅60m深さ44mに達する。その後、2004年1月15日、2006年11月に小規模な崩壊が起こった。最初の崩壊によって発生した巨大な崩落ブロックは、水深40~45m付近に堆積している。



図3 マーレ北東部の崩壊  
上: 2002年崩壊地(白矢印)を北(礁湖側)より望む(2008年9月撮影)。下左: 崩壊地、下右: 崩壊地周辺のサンゴ礁でみられる亀裂。礁縁部(手前側、水深3m)から礁湖側斜面深部まで亀裂が連続する。

砕屑物と、砂よりなる未固結の堆積物が堆積している。最上部(水深3m)では、厚さ2~3mの固結した堆積構造が礁の内側まで連続する(図4)。

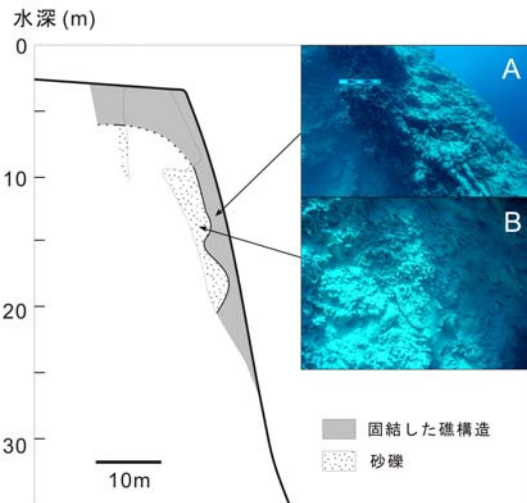


図4 崩壊地から観察できる礁湖側斜面の内部構造。右側が礁湖側。実線は露頭で確認できた境界。破線は推定。点線は露頭で確認できた範囲(右)および陸側の露頭断面(左)。A: 壁状の固結礁構造(スケールは50cm)、B: 内部の砂礫。

礁湖側斜面の表層部は原地性の塊状・枝状サンゴ・石灰藻が重なった堆積構造を形成している。壁状構造の内側部では主に枝サンゴやハリメダ(礁湖によくみられる緑藻類)破片の固結堆積物によって硬い構造を形成している。壁状構造内側より採取した試料を電子顕微鏡で観察すると、海中の続成作用によって生じる高マグネシウム・カルサイトの結晶が、堆積物を固結させていることがわかった(図5)。

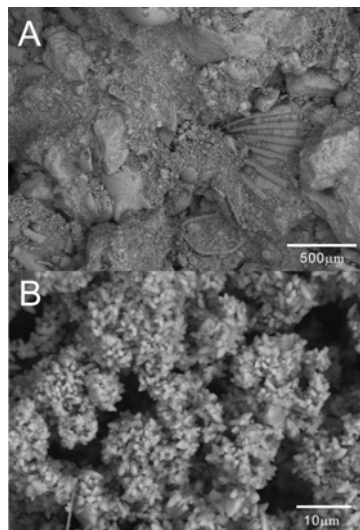


図5 礁湖側斜面の壁状構造内側より採取した試料の走査型電子顕微鏡写真。上: 固結した堆積物、下: 固結堆積物の間にみられる高マグネシウム・カルサイトの結晶。

この崩壊地の周辺部を調査したところ、東側に別の崩壊地が認められた(図3上の左側の矢印)。崩壊地壁面にあらわれたサンゴ礁の内部構造は2002年崩壊地で見られた構造と同様で、固結した斜面表層部の内側は砂礫質の堆積物であった。このほかマーレ島対岸の空港島でもサンゴ礁に亀裂が入っていることが、地元のダイバーによって発見されている。

礁湖に面したマーレ島北部はモルディブの表玄関として、ビルの建設や埋め立て、港湾整備に伴うサンゴ礁の開削などの開発が盛んに行われている場所である。ここでは薄い壁状の礁構造が天然の防護壁として、礁内の未固結堆積物を保持する役割を果たしている。堅い天然防護壁が失われた北東岸の一部では、むき出しになった礁内の砂礫が小規模な崩落を続けている。

世界で初めて環礁の洲島で発生した地盤問題は、環礁立国における国土開発に限度があること、洲島だけでなくサンゴ礁によってつくられた地盤も国土保全の対象とする必要があることを示唆している。

### (3) 環礁洲島の地形 ~ 環礁立国の持続的発展へ向け

環礁洲島では海岸侵食が懸念されている。しかしモルディブ諸島をはじめ世界の環礁立国では現在のところ、長期にわたる海岸線の変化は観測されていない。

モルディブ諸島での調査より、南部ラーム環礁のいくつかの島で海岸侵食の地形的痕跡がみられた。ビーチロックは潮間帯の海浜が炭酸カルシウムのセメント作用で固結したものであり、過去の海岸線を示す。カルハイドゥ島東岸では現在の海岸線より80m海側に(図6)、マーバイドゥ島東岸では20m海側に

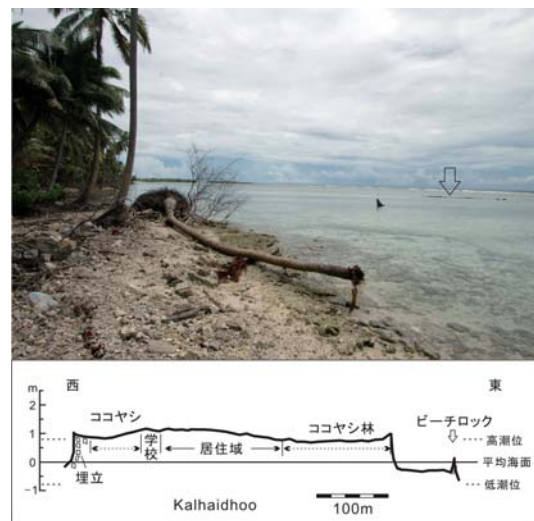


図6 モルディブ南部・ラーム環礁カルハイドゥ島東岸でみられた海岸侵食。リーフ上の矢印はビーチロック。

ビーチロックが位置しており、海岸ではサンゴ礁が露出し椰子の木が倒れている。細粒の砂はわずかしかない。モルディブ諸島の一部ではすでに海岸侵食が進行しているとみられる。

世界の主な環礁国（キリバス・ツバル・マーシャル諸島共和国・モルディブ共和国）にて洲島の地形と居住域の高度を計測し比較したところ、太平洋の環礁洲島よりインド洋モルディブ諸島で洲島高度が低いことがわかった。特に中部モルディブの首都マーレ付近の緯度帯で洲島面積が小さく、高度も低い。ビーチリッジの発達もみられないことから、海面上昇に対して最も脆弱性が高い地域と位置づけられる。

また、ツバル・フォンガファル島の地形はモルディブ諸島北部の地形分帯が明瞭な島の地形に類似している。ただしモルディブ北部でココナツ林として利用されているビーチリッジ背後の低地は、フォンガファル島では新興住宅地や新たな公共施設立地スペースとして利用されている。土地利用の変化による災害脆弱性の増大が懸念される。

今後の海面上昇によって環礁洲島では沿岸域の建物や防波堤・港湾施設などのインフラストラクチャーへの被害が発生し、これに対する整備費の増大が懸念される。限られた予算で整備を行うためには、インフラ投資の対象となる洲島を限定せざるをえない。実際、モルディブ・ミーム環礁のムリ島のように、環礁の主島を整備して周辺洲島の住民の移住を促す計画も進められつつある。住民側もインフラ整備が進んだ島への移住を希望している。このような政府の思惑と住民の要望が合致して、特定の洲島での都市化が進むことになる。

環礁上に成立する洲島の規模は小さく、都市化に伴って洲島周囲では埋め立てや浚渫など、礁-洲島系の改変が行われ、堆積物の再配置も進んでいる（図7）。世界で最も過密なサンゴ洲島であるマーレにて発生した海面下の地盤災害は、いままで誰も気づかなかった洲島基盤のサンゴ礁構造の問題点を

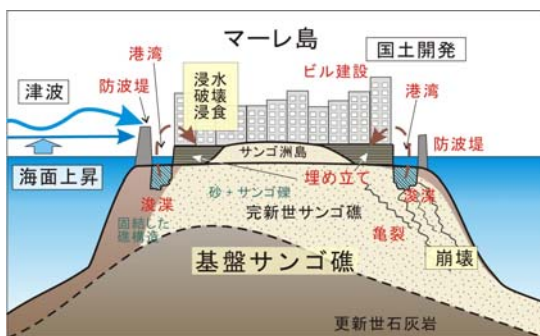


図7 サンゴ洲島を舞台とした災害と開発の連鎖（マーレ島の事例をもとに模式化）

可視化した。このことは、今後の温暖化対策・海面上昇対策として実行される都市化やインフラ整備などの施策が、次の応答・連鎖を導く可能性があることを示唆している。

温暖化にともなう環境問題は、今後の人間社会をどのようにつくっていくかという問題を我々に突きつけている。今後の温暖化対策としての開発や保全をどのように進めるか、人口の偏在化に対して人々がどのような住み方をするのかについて、それぞれの自然条件・社会条件をよく見極めて適切な対応を模索する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計11件）

① Suzuki, A., Yokoyama, Y., Kan, H., Minoshima, K., Matsuzaki, H., Hamanaka, N. and Kawahata, H. (2008) Identification of 1771 Meiwa Tsunami deposits using a combination of radiocarbon dating and oxygen isotope microprofiling of emerged massive *Porites* boulders. *Quaternary Geochronology*, Vol. 3, pp.226-234.

② Kan, H., Ali, M. and Riyaz, M. (2007) The 2004 Indian Ocean Tsunami in the Maldives: scale of the disaster and topographic effects on atoll reefs and islands. *Atoll Research Bulletin*, No.554, pp.1-65.

(<http://www.sil.si.edu/digitalcollections/atollresearchbulletin/>)

〔学会発表〕（計24件）

① 菅浩伸, 中島洋典, Riyaz, M., Ali, M., 鈴木淳, 横山祐典, インド洋・太平洋の環礁洲島の地形－温暖化時代の脆弱性とその地域差－. 日本地理学会2010年春期学術大会. 2010年3月27～29日(法政大学)

② 菅浩伸, 鈴木淳, 横山祐典, 中島洋典, 鈴木倫太郎, 安達寛, マーシャル諸島共和国・マジュロ環礁における洲島の基盤となるサンゴ礁の構造と形成過程. 日本地理学会2009年春期学術大会, p.42. 2009年3月28～29日(帝京大学)

〔図書〕（計2件）

① 菅浩伸 (2009) モルディブ諸島にみる環礁立国崩壊の危険性－災害と開発の連鎖－. 日本地理学会災害対応委員会・平井幸弘・青木賢人編「温暖化と自然災害－世界の六つの現場から」, 古今書院, pp.59-84.

② Suzuki, A., Gagan, M.K., Kan, H., Edward, A., Sirigan, F.P., Yoneda, M. and Kawahata, H. (2006) Coral records of 1990s in the northwest Pacific: El Niño, coral bleaching, and global

warming. In: Kawahata, H. (ed.) *Global Climate Change and Response of Carbon Cycle in the Equatorial Pacific and Indian Oceans and adjacent landmasses*. Elsevier Oceanography

〔その他〕

アウトリーチ活動

「2004年インド洋大津波で被災したサンゴ礁の島モルディブ」(2009年12月)

・Yahoo災害情報「災害時のワンポイント」

(<http://rescue.yahoo.co.jp/column/point/20091216.html>)

・Rescuenow@nifty「災害・防災コラム」

(<http://rescuenow.nifty.com/cs/column/detail/091210000874/1.htm>)

・イツコム「防災コラム」

(<http://www.itscom.net/safety/column/index.html>)

「水と人の環境史：研究最前線」(2009年8月5～23日, 岡山市デジタルミュージア

ム)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

菅 浩伸 (KAN HIRONOBU)

岡山大学・大学院教育学研究科・教授

研究者番号：20294390

### (2) 研究分担者

鈴木 淳 (SUZUKI ATSUSHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・地質情報部門・主任研究員

研究者番号：60344199

### (3) 連携研究者

横山祐典 (YOKOYAMA YUSUKE)

東京大学・海洋研究所・准教授

研究者番号：10359648

中島洋典 (NAKASHIMA YOSUKE)

有明工業高等専門学校・一般教育科・教授

研究者番号：90172303