

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  
 (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研究部 谷口真人  
 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研究部 (客員研究員) 梅澤 有  
 <研究協力者>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研究部 中田聡史

平成20～22年度累計予算額：20,300千円 (うち、平成22年度予算額：6,701千円)

予算額は、間接経費を含む。

[要旨] 本サブテーマでは、小島嶼域の環礁州島における水資源の利用実態調査と、長期・中期・短期の水資源・水収支観測・解析およびその評価・予測を実施し、気候変動下での環礁島における水資源政策の適応策オプションを提供した。様々な時間スケールでの水収支/資源解析を実施した結果、30年で潮位は7.2 cm 上昇しており、降水量は26 mm/月 減少していた。また海面上昇による環礁島淡水レンズは、今後100年でその体積が20%減少すると予想された。環礁島住民の水消費活動の詳細な実態調査からは、先進国と比較して良好とは言えない水消費量で生活していることが明らかになった。またエルニーニョなどの中期的な気候変動により淡水レンズの体積は最大50%増減することも予想される。ローラ島では揚水による淡水レンズへの塩水侵入がみられ、降水量減少に伴い塩淡水境界深度が浅くなっている。また各種トレーサーによる地下水年代評価により、ラグーン側では5年未満の新しい水が、島中央部では10年以上前に涵養された古い水があり、外洋側程滞留時間が長くなり汚染が蓄積しやすい環境であることが推察された。温暖化により海面上昇する環礁での水需要量増大へ適応するためには、都市化・近代化した島嶼域の水資源管理と、都市化の可能性の少ない9割以上の人口を占めるローカルな島嶼域の水資源管理との関係を精査して、降水量減少や地下水塩水化現象などの影響評価を進めることが重要である。

[キーワード] 水資源管理、淡水レンズ、塩淡水境界、エルニーニョ、トレーサー

## 1. はじめに

太平洋にはおよそ3万の島が存在し、そのうち1,000が居住されている<sup>1)</sup>。これらのほとんどが発展途上である島嶼域 (小島嶼発展途上国) であり<sup>2)</sup>、パプアニューギニアとフィジーを除いて、国連が定義する「小島嶼」の範疇に含まれる<sup>3)</sup>。小島嶼発展途上国の総人口は約600万にのぼり、太平洋の小島嶼国の多くが100 km<sup>2</sup>未満かつ島幅3 km未満の「非常に小さい島」の範疇に入る<sup>2)</sup>。小島嶼国の島々は慣習的に「高い島」か「低い島」かに分類される。高い島は主に堡礁に囲まれた起伏の多い火山島であり、低い島は主に平均標高数メートルの低平で面積の小さい環礁島である<sup>2)</sup>。

まず、環礁州島で利用される水資源について簡単に紹介する。水資源は海水位 (潮位) や降水量の変動に極めて大きく影響を受けることが知られている<sup>1)</sup>。主な住民は、飲料水や調理用水を貯水タンクに貯めた僅かな雨水に、沐浴や洗濯用水を地下水に依存しており、農業用灌漑水に地下水を揚水し散布している<sup>3,4,5,6,7)</sup>。環礁州島では水資源は非常に脆弱である。

### (1) 地下水

環礁州島の地質は、堆積した未固結の有孔虫やサンゴ破砕片を主体とする砂礫から構成されており完新統 (Holocene) と呼ばれている。一般に地表面の浸透性は高く (5~400 m d<sup>-1</sup>) ため、河川や湖沼はほとんど形成されない。ゆえに表層水の利用は難しく、降水量から蒸発散量を差し引いた涵養量のみが帯水層に貯留される。涵養された淡水は、その直下にある更新統 (Pleistocene) に浸み込んでいる海水との密度差から凸レンズ状に浮かんでいるため、“淡水レンズ” と呼ばれる。

### (2) 降雨

環礁島にもたらされる降水は、主に民家の屋根によって集水され、プラスチック製の貯水タンクに貯留される<sup>8)</sup>。また、空港の滑走路を集水面として利用してプールに貯水する大がかりな集水設備もあり、マーシャル諸島共和国のマジュロ環礁などでみられる<sup>9)</sup>。赤道域には熱帯収束帯 (intertropical convergence zone: ITCZ) と呼ばれる南北両半球の低緯度帯を東から西に吹く貿易風が収束する降水帯や、南太平洋収束帯 (south Pacific convergence zone: SPCZ) と呼ばれるインドネシアから東南東に伸びる降水帯が分布している (図1a)。これらの降水帯と環礁島の位置関係が、淡水レンズへの涵養量や貯水タンクへの注水量に決定的な降水量を支配する。

太平洋においては、西太平洋では平年より少雨、東太平洋では多雨という空間パターンを示すエルニーニョ現象が発生する。これはよく知られているエルニーニョ・南方振動 (El Niño-Southern Oscillation: ENSO) と呼ばれる大気海洋相互作用現象の一部で、環礁州島の降水変動を支配している。南方振動指標 (Southern Oscillation Index: SOI) などによって ENSO の強弱の代表性を知ることができる。

### (3) その他の水資源

海水や塩水化した地下水を汲み上げて淡水化することや、生活・工業排水などの汚染水を処理することで水資源を開発し、降水や地下水以外の代替水資源としている島嶼域もある<sup>20)</sup>。ツバルでは極めて厳しい渇水時にのみ淡水化処理施設を稼働させて飲料水を得ている。降水や地下水の利用が困難な渇水期には、伝統的な智慧として飲料水をココナッツから得ていることがキリバス、マーシャル諸島共和国では知られている<sup>20)</sup>。

## 2. 研究目的

気候変動に関する政府間パネル (IPCC, 2007)<sup>10)</sup> によれば、地球温暖化の影響を受けて100年間に最大で約0.6mの海面上昇が予測されている。この予測は、海面上昇によって平均標高数メートルの環礁州島における帯水層の塩水化が進行し、生活水としての地下水のみならず植生などの生活環境をも脅かす。また、地球温暖化は地域によっては降水量を減少させる可能性があり、気温上昇によって蒸発散量が増加して地下水が減少することも危惧される。また、都市化および近代化され人口密度の高くなった環礁島を維持するために、島民がどの程度まで降水と地下水を使用可能かという問題が深刻化している。そのため、淡水供給量としての降水量、地下水の賦存量や、貯水タンクなどの貯留量、水消費量を様々な時間スケールで定量的に把握する必要がある。この

ように環礁島によって成り立つ島嶼国の水資源は気候変動や人為活動に対して極めて脆弱であり、その適応策を講じることが正に喫緊の課題である。

適応策策定に資する水資源評価のため、本研究では、

- 1) 長期の気象・観測井データを用いて短中長期の水収支解析を実施した（4節）。
- 2) 電気探査によって帯水層の水資源評価を試みた（5節）。
- 3) 環礁州島の地下水流動モデルを構築した（7節）。
- 4) 同位体・水質分析によって地下水滞留時間など水循環動態解析を実施した（6節）。

### 3. 研究方法

#### （1）水資源調査

##### 1) 電気探査・観測井調査による水資源評価

淡水レンズの比抵抗鉛直断面を得るために、島を横断するいくつかの観測線で電気探査を実施した。電気探査法は、地盤の電氣的性質を測定して地盤状況を把握する手法であり、その中でも比抵抗法は帯水層内の淡水と塩水領域の判別にも使用され、地表面下における塩水と淡水の境界である塩淡境界の推定や塩水浸入には2次元比抵抗法が多用される（例えば、Swarzenski et al., 2006）<sup>11)</sup>。

##### 2) 長期気象データによる降雨・涵養量評価

それぞれの環礁州島において、降雨による正味の淡水供給量を推定するためには降雨量と蒸発散量が必要である。蒸発散量の推定には、Penman-Monteith<sup>12)</sup>の推定式とNOAAから入手した30年以上蓄積された気象データを使用した。降水データは気象データから抽出し、異常値を適切に除去するなどデータクオリティコントロールを施して使用した。図1bは緯度による降水量(P)の分布と環礁島および代表的な降水帯の位置を示した図である。マーシャル諸島共和国のマジュロはITCZに、ツバルのFunafutiはSPCZの中心に位置するが、キリバスのTarawaはこれらの降水帯から大きくはずれている。Tarawaの年降水量はFunafutiより約2000 mmも少ない。このように降水帯の位置はPに対して決定的格差を生む。Eに関しては熱帯域においては年間1,600～1,800 mmである。

#### （2）水資源解析（供給 - 貯留 - 消費）

水資源解析の一つにバケツモデルと呼ばれる手法がある。ある時間スケール  $t$  において淡水を貯留できる仮想的な貯水槽  $S$  を考える。一般的な  $S$  は淡水レンズとして仮定することであるが、貯水タンクや天蓋の無い貯水プール、タロイモを耕作するタロピットに対しても適用可能である。次式により  $S$  における淡水増加量  $\Delta S$  が決定される。

$$\Delta S = P - E - L - Q \quad (1)$$

ここで、 $P$  は淡水供給量（降水量）、 $E$  は蒸発散量、 $L$  は  $S$  から外部への漏水量（流出量）、 $Q$  は人為的消費（給水）量 ( $Q > 0$ ) である。ここで、 $S$  を淡水レンズと仮定した場合、 $\Delta S$  は帯水層（飽和層）への涵養量であり、 $L$  は帯水層から海へ流出する側面流出や潮汐による淡水拡散の損失量、 $Q$  は揚水量である。一般に低平な環礁島における  $L$  は島側面からの海底湧水のみと近似できる<sup>12)</sup>。 $S$  が貯水タンクの場合は、 $L$  は配管システムに生じる漏水量、 $Q$  はタンクからの給水量（消費量）であり、 $E$  は貯水タンクに天蓋がある場合は無視できる。 $\Delta S > 0$  となれば貯水槽  $S$  への増加（補充）量となる。

LはQに比べて1オーダー以上小さい場合もあり無視できる場合もあるが、Lは必ず発生しうる要素であるため、Lへの効果的な対策をすれば $\Delta S$ の増量が可能である。

Qが定量的に示されれば、島民の水使用可能量がおのずと決定され、 $\Delta S < 0$ とならないようにQを制御しなければならない。PやEは気候変動や気象条件、土地利用、植生分布などの自然および社会環境に支配されているため一般に制御困難である。

### (3) 同位体・水質分析

環礁州島の地下水の資源としての利用性を考える場合、農耕用に対しては塩分の大きさが、飲用水用に対しては、重金属や有機ハロゲン化合物、硝酸、大腸菌等の微生物量が、健康被害を引き起こさないレベル以下に保たれている必要がある。鉱山や重工業、化学工業などの汚染源がなく、一般の居住区と家畜、畑地で構成される環礁州島においては、硝酸汚染と大腸菌汚染が懸念されるため、本研究では、糞尿由来のアンモニア量と大腸菌量には相関があるという仮定の下に、地下水や沿岸水の栄養塩（硝酸態窒素、アンモニウム、リン酸）濃度を水質評価の指標として用いた。分析用試料は、採水後に速やかに0.2  $\mu\text{m}$ のセルロースアセテートフィルターで濾過し、冷凍して持ち帰り、栄養塩自動分析器（AACS4; BLTEC）を用い比色法によって分析した。

地下水の汚染を考える場合、汚染物質の流入量に加えて、地下水の貯留量と滞留時間が、汚染物質濃度を規定する要因として重要となる。本研究では、若い地下水（滞留時間10年から50年程度）の年代を推定できるトレーサーとして、トリチウム ( $^3\text{H}$ )、CFCs、および $\text{SF}_6$ の分析を行い、地下水の涵養年代の推定を試みた。この手法は、降雨中の各物質濃度が、年代によって大きく異なる各物質の大気中濃度と気温を反映しており、その濃度が土壌に涵養した後も一定条件下では保存されるため、地下水中の濃度を測定することで涵養年代を推定できることを利用したものである。

### (4) 数値モデリング（地下水流動シミュレーション）

数値解析には塩水侵入や多成分化学種の輸送解析が可能なSEAWAT<sup>13)</sup>を用いた。本モデルは、地下水の流動解析が可能なMODFLOWと物質輸送解析が可能なMT3DMSとのカップリングモデルであり、塩水侵入に有効である。本解析は環礁州島を単純化した鉛直2次元場と現実的な3次元場で実施した。2次元場は海面上昇に対する淡水レンズの応答問題を調べるために、3次元場では現実的な水資源量の推定するために供された。両次元場において、環礁州島における帯水層がHoloceneとPleistoceneであることから、透水係数の均質・等方性を仮定した。解析に用いた地下水流動の基礎方程式と移流分散方程式を下記にそれぞれ示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \rho k_f \left( \frac{\partial h_f}{\partial x_i} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \right) \frac{\partial Z}{\partial x_i} \right] = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial t} - \rho_s q_s \quad (2)$$

ここで、 $x_i$  [L]は物質*i*の*x*座標、 $K_f$  [ $\text{LT}^{-1}$ ] は透水係数、 $h_f$  [L] は淡水の圧力水頭、 $\rho$  [ $\text{ML}^{-3}$ ]は流体の密度、 $S_f$  [ $\text{L}^{-1}$ ]は比貯留係数、 $\theta$  は有功空隙率、 $\rho_s$  [ $\text{ML}^{-3}$ ]と $q_s$  [ $\text{T}^{-1}$ ] はそれぞれ、海水の密度と流速を示している。

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_k^s + \sum R_n \quad (3)$$

ここで、 $C_k$  [ $\text{ML}^{-3}$ ] は溶存物質 $k$ の濃度、 $D_{ij}$  [ $\text{L}^2\text{T}^{-1}$ ]は水理拡散係数、 $v_i$  [ $\text{LT}^{-1}$ ]は間隙水の流速（実流速）velocity、 $C_k^s$  [ $\text{ML}^{-3}$ ] は溶存物質 $k$ の原濃度、 $R_n$  [ $\text{ML}^{-3}\text{T}^{-1}$ ] は反応項である。

時間的に不変な海水を境界条件として島周囲に配置し、島内への塩水浸入の強制力とした。実測された降水量時系列（NOAA気象データ）から蒸発散量を差し引いた量を島表面に与え地下水涵養量として浸透させた。多くのパラメータや細かな境界条件の修正について、おのおのの島で異なった設定がされており、説明は大きくスペースを要するため割愛する。

#### （5）調査地域

全海洋上に408箇所ある環礁のうち、294箇所（72%）が太平洋に、73箇所（18%）がインド洋にある（Bryan, 1953）<sup>14,15,16,17</sup>。本研究では、太平洋に位置するマーシャル諸島共和国のマジュロ環礁におけるローラ島（Laura islet）、ツバルのフナフチ環礁におけるフォンガファレ島（Fongafale islet）を調査対象地域として選択した（図1f）。

マジュロ環礁におけるローラ島（図. 1c）では、過去2回にわたって米国地質調査所（U.S. Geological Survey: USGS）がエルニーニョ現象後に淡水レンズ評価調査を実施している（Presley, 2005）<sup>18</sup>。本研究では彼らの調査時期とは対照的に、ラニーニャからエルニーニョへの移行期（2009年8月4日～12日）およびラニーニャ期（2010年9月3日～9日）に調査を実施した。季節的には雨季から乾季に変わる時期である。

フナフチ環礁のフォンガファレ島では、大潮の満潮時近くになると島内で地下水が噴出し、低気圧時と時期が重なった場合、家屋が浸水することがある。そこで、フォンガファレ島における地下環境の現況を把握するため、帯水層が潮汐の影響を最も受けやすいと想定される春季の大潮時期（3月11日～17日）に調査を実施した。

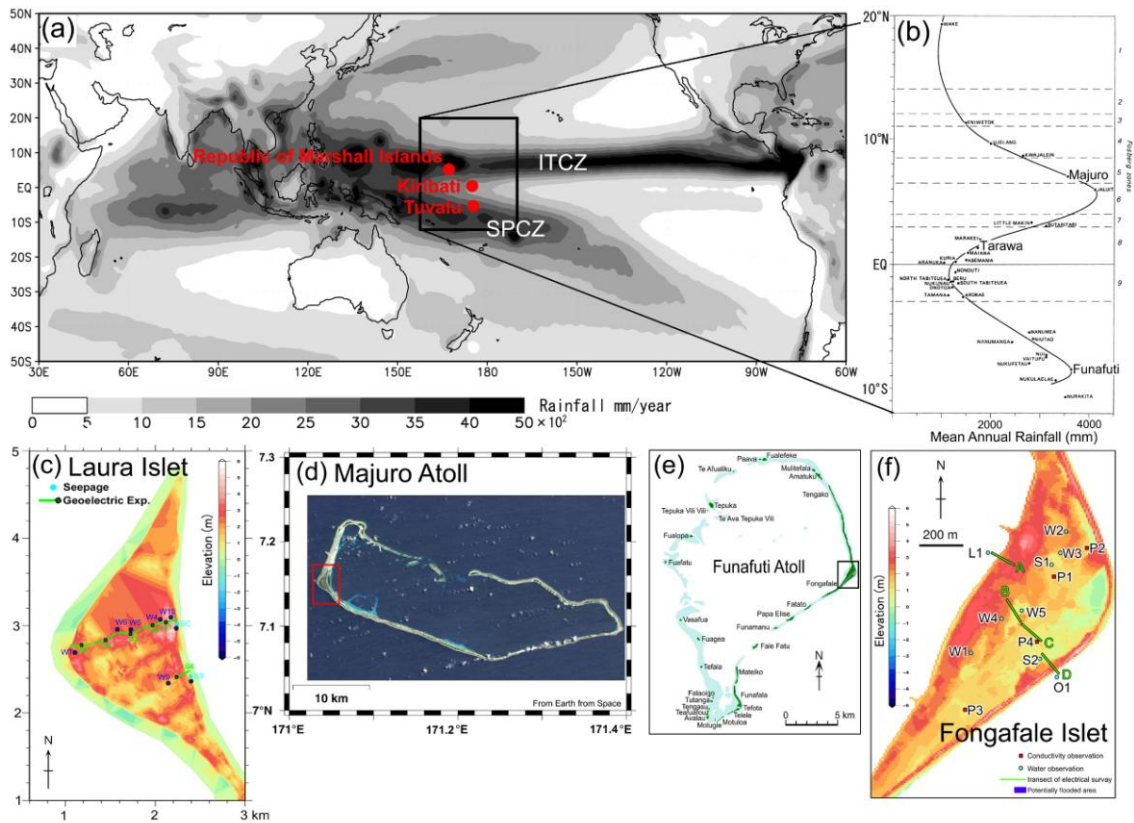


図1 (a) 北太平洋における年平均降水量の水平分布、(b) 環礁における年平均降水量の緯度分布、(c) マジュロ環礁ローラ島における陸上地形標高と電気探査測線、(d) マジュロ環礁、(e) フナフチ環礁、(f) フナフチ環礁フォンガファレ島における陸上地形標高と電気探査測線。

#### 4. 結果・考察

##### (1) 電気探査・観測井による地下水塩水化調査

###### 1) 観測サイト

島幅約1200 mのローラ島では、過去（例えば、Presley, 2005）<sup>18)</sup>にも電気探査がなされた、島中央部を横断する6観測線（以後、中央線）で調査を実施した（図1c）。島幅約270 mのカラリン島においては浜辺から沖合へ海岸線と直交する2測線（280 m）によって横断観測を実施した。島幅約700 mのフォンガファレ島（図1f）では、電気探査を4本の測線（A～D）において実施した。Aはラグーン側を、Bはタロイモ畑（Taro swamp）を、C及びDは滑走路とマングローブ域の地下構造を把握するために設定した。これらの観測線は、フォンガファレ島の代表的な土地利用域をカバーしている。Yamano et al. (2007)<sup>20)</sup>によると、マングローブ域（測線D）や滑走路（測線C）は大潮の満潮時の潮位よりも低い位置にあり、海面変動に対して脆弱で、浸水が発生する可能性が高い地域（以後、脆弱域）であると指摘されている。脆弱域の地下構造を把握することは、噴出水の発生要因を同定するためにも重要な情報となる。

一般的に、海水の比抵抗値は0.25～0.3 Ωmであり、淡水を示す比抵抗値は1～400 Ωmの範囲をとることがわかっている（島ら, 1995<sup>19)</sup>）。本研究では、比抵抗値が1以下を海水の占める帯水層と

定め、1~400  $\Omega\text{m}$ の範囲をとる比抵抗値については島ら (1995)<sup>19)</sup>に基づいて汽水あるいは淡水が占める帯水層と解釈した。

ローラ島における淡水レンズの経年変化と降水量および潮位を比較するため、米国国立海洋気象局 (NOAA) から降水量データを、ハワイ大学潮位センター (UHSLC) と英国海洋データセンター (BODC) から潮位データを入手し、気圧補正して使用した。

## 2) 土地利用変化による塩水化 (フォンガファレ島)

図2aは、上げ潮時におけるフォンガファレ島を横断する各測線における比抵抗値の鉛直二次元断面図である。各測線において汽水または海水を示唆する低比抵抗領域 (4  $\text{m}\Omega$  以下) が大部分を占めており、環礁州島で一般的にみられる淡水層はフォンガファレ島の帯水層には存在しないことを示している。タロイモ畑 (測線B) においては、高比抵抗領域 (15  $\text{m}\Omega$  以上) が表層 (0~4 m) に薄い層として存在している。タロイモ畑Tで電気伝導度を測定した結果、ほとんどの地点で10  $\text{mS/cm}$ 以下であったため、この高比抵抗領域は淡水に近い汽水を含んだ土壌である。海域観測点LやOでは海水の電気伝導度が50~56  $\text{mS/cm}$  であり、マングローブ域Sでは電気伝導度が16~24  $\text{mS/cm}$ であることから、Sでは海水を29~48%含んだ汽水に占められていることがわかる。W1、W2の井戸は1~10  $\text{mS/cm}$ であり淡水に近いものの、1.5~2.5  $\text{mS/cm}$ が飲料水として用いることができる限界値であることを考慮すると (Webb, 2007)<sup>19)</sup>、フォンガファレ島における地下水をそのまま飲料水として使用することは困難である。

浸水が発生する可能性が高い脆弱域 (Yamano et al., 2007)<sup>9)</sup> とされる滑走路を横切る測線Cにおける比抵抗値は、上げ潮時に外洋側 (右側) から減少していき、島内側 (左側) に向かって低比抵抗領域が拡大していく現象がみられた (非表示)。比抵抗観測を開始した17:00には滑走路周辺では噴出水が確認されなかったが、17:40になると噴出水がみられ、電気伝導度は18  $\text{mS/cm}$ 程度で推移していたことから、汽水性の地下水が上げ潮と同期して地中より噴出したと推察される。このことから観測された低比抵抗域は塩水化した地下水であり、この汽水性の間隙水が移動することによって塩水化が島内部へと拡大していったと考えられる。

Underwood et al. (1992)<sup>21)</sup>の数值実験結果とは対照的に、フォンガファレ島の帯水層ではその涵養量と島幅の長さが十分であるにもかかわらず、淡水レンズが形成されない。Yamano et al. (2007)<sup>19)</sup>やMcQuirrie (1994)<sup>22)</sup>によると、現在滑走路がある場所は1896年にはマングローブ湿地帯 (Original swampland) であり、第二次大戦中の米軍が滑走路を建設するため1942年に高透水性のサンゴ礫などで埋め立てら、実際に試掘すると地下1mで多数のサンゴ礫が発見された。比抵抗観測結果は、埋め立てられた湿地帯では恒常的に塩水化していることを示唆しており、高間隙率のサンゴ礫によって構成された地盤は高い透水性を持ち、潮汐と同期して浸入した海水と降雨によって涵養された淡水が容易に混合 (地下水塩水化) していると推察される。これが脆弱域で淡水層が形成されない主因であろう。脆弱域における汽水性間隙水は人為的に作られた高透水性の帯水層に存在するため、海面変動に対して敏感に応答し、満潮時に発生するフォンガファレ島固有の噴出水となっている。

## 3) 人為活動による塩水化 (ローラ島)

淡水レンズの淡水と海水は互いに平衡を保っているが、海岸近くで地下水が大量に採取される

と、海水が引き込まれ塩水化が進行することがある。図2bはローラ島の中央線における比抵抗値の鉛直2次元断面図である。水平スケール750 m程度の下に凹型構造の高比抵抗領域が観測された。450 m付近では塩水堆の形成を示す構造がみられる。

図3 の1984～1985年の淡水レンズの鉛直構造を比較すると、塩淡境界が下に凸型の形になっており一般的で自然に近い形の淡水レンズがみられる。一方、1998～1999年のエルニーニョ後や2009年の塩淡境界は下に凹型の形を呈しており、塩水堆を示唆している。これは塩水堆の真上の1998年から稼動した揚水所が原因である（Presley, 2005）<sup>16)</sup>。近年、マジユロの都市域では人口が増加したため（現在16670人）、都市域への給水も増加して淡水レンズからの揚水が過剰となり、揚水所付近では地下水塩水化が危惧されていた。塩水化した帯水層が淡水性に戻るには数十年を要すると言われる<sup>22)</sup>。

#### 4) 気候変動による塩水化（ローラ島）

観測井において測定された塩分データから淡水レンズの塩淡境界深度をPresley（2005）<sup>16)</sup>の推定方法によって推定し、潮汐周期平均して淡水レンズの鉛直断面構造を推定した（図3）。顕著なエルニーニョ現象後の1984～1985年と1998～1999年における淡水レンズの鉛直断面（Presley, 2005）<sup>16)</sup>、南方振動指数（Southern Ocean Index: SOI）とマジユロにおける潮位と降水量の時系列も合わせて示した。SOIは1983年と1997年に顕著なエルニーニョ現象を示唆する負の値を示しており、同時に潮位の低下と降水量の減少が観測されている。1984～1985年の淡水レンズの構造を比較すると、それぞれの塩淡境界が下に凸型の形になっており、一般的で自然に近い淡水レンズの形を保ったまま塩淡境界が約一年かけて2～3 m深くなっている。この期間には降水量が増加傾向を示している。1998～1999年のエルニーニョ後の塩淡境界も同様に降水量の増加とともに深くなっており、淡水レンズに雨水が順調に涵養されたことを示している。

これらの調査時期とは対照的に、本調査時のラニーニャからエルニーニョに移行期（2009年8月）における塩淡境界は1998年よりも浅くなっている。1999年から2009年までの降水量と潮位変動の経年変化をみると、潮位は上昇傾向にあり降水量は減少傾向にあることがわかる。潮位は30年で7.2 cm 上昇しており、降水量は26 mm/月 減少している。年平均降水量は280 mm/月、乾季では220 mm/月、雨季では336 mm/月であった。このように環礁州島では2009年までに海面上昇し降水量は減少している。2009年までの降水量の減少及び地球温暖化に伴う蒸発散量増加・海面上昇によって淡水レンズの体積が減少したことを示唆しており、水資源状況は厳しさを増しているものと考えられる。



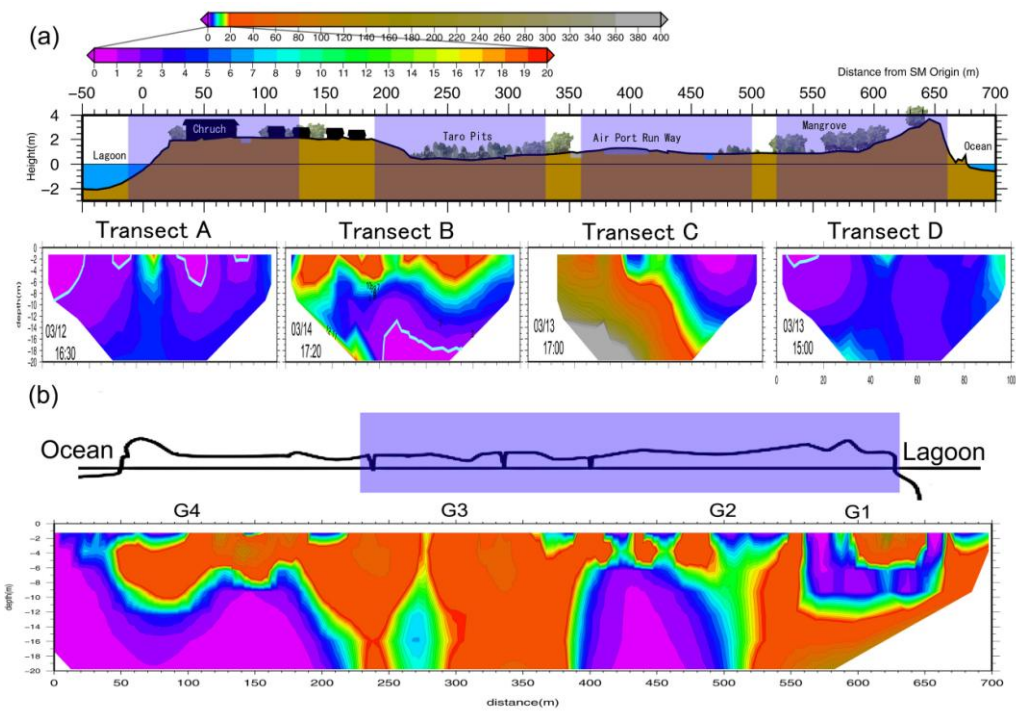


図 2 (a)フォンガファレ島、(b)ローラ島における電気探査測線における断面地形と比抵抗値

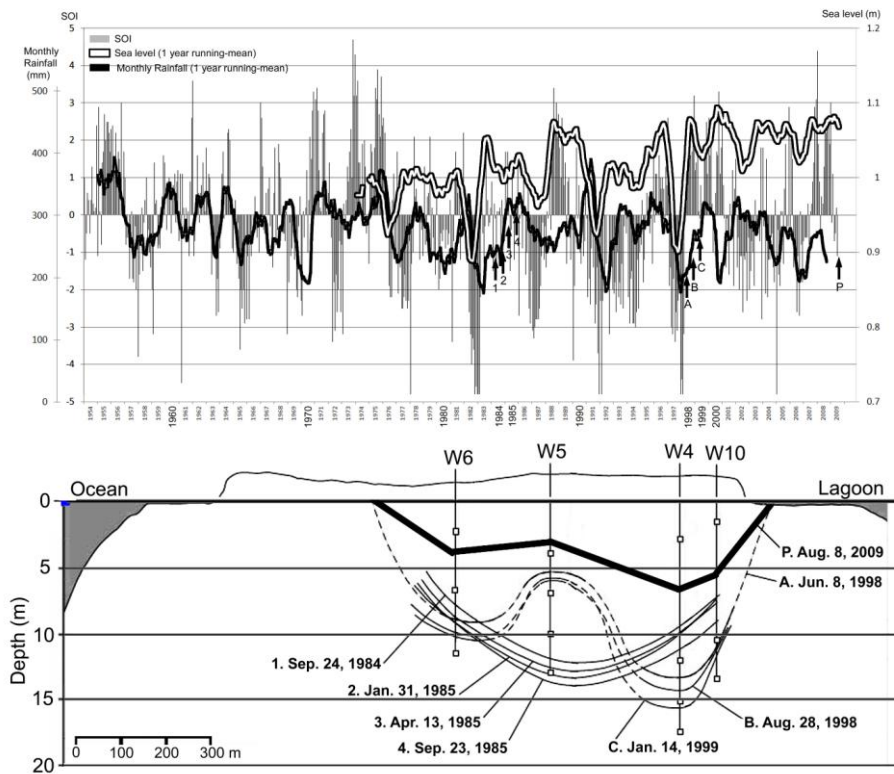


図 3 (上) マジュロ環礁における降水量 (縦バー) と1年の移動平均した降水量 (黒線) 及び潮位 (白線)、(下) ローラ島における淡水レンズの塩淡境界面の経年変化

## (2) 正味の淡水供給量

図4はマジュロ環礁における降水量から蒸発散量を差し引いた正味の淡水供給量である。正の値は淡水が帯水層へ涵養されたことを示し、負の値は帯水層から植物を通して行われる蒸発散量が降水量に比して多かったことを示す。特に負の値が集中して目立つ時期が、例えばエルニーニョ現象が発生した1998年あたりにみられ、降雨による正味の淡水供給が無かったことを示している。この淡水が無供給である継続期間は1年程度である。また、一年以下の数か月の無供給期間はほぼ毎年のように季節的にみられ、乾季に発生する頻度が高い。

IPCCによるとエルニーニョのようなイベントが2100年までに増加する予測を提示しており、水資源利用にあたっては、淡水の無供給期が今後頻発する可能性がある。適応策オプションを策定するにあたり、この無供給期間をどのように扱うべきかを考える時、重要なファクターは何かを精査する必要がある。また、無供給期間を過ごしてきた島民達はどのように生活を維持してきたのかを抽出する必要がある。この要因調査には、センサスデータや水道統計資料、気象データから水収支を計算し、収支状況からどのように水が使用されたかの水資源解析が有効である。

そこで、次節ではマジュロ環礁を例に、淡水が無供給期には利用可能な水資源をどのように確保してきたのか調べた。

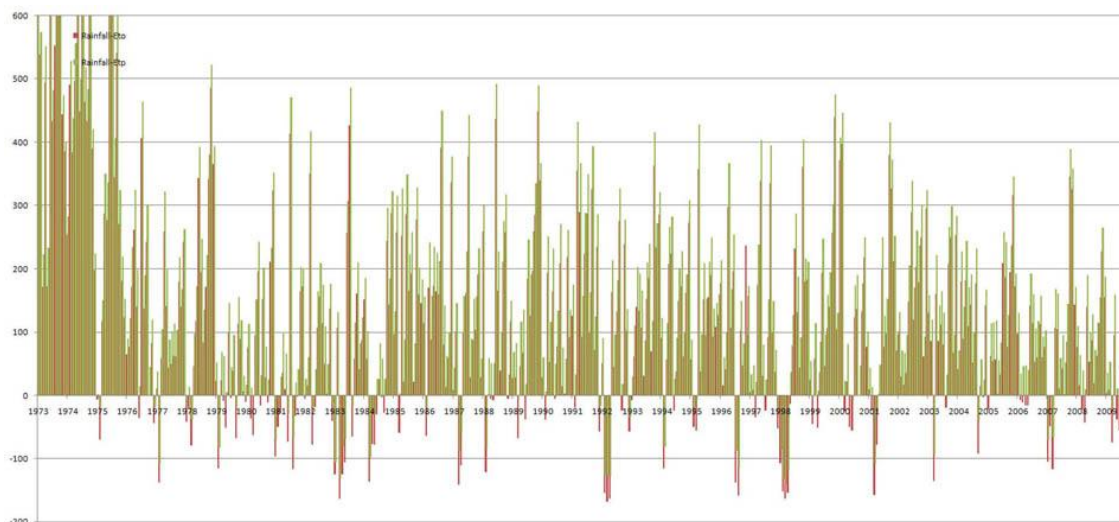


図4 マジュロ環礁における涵養量（＝降水量－蒸発散量）の経年変化

## (3) マジュロ環礁における水資源解析

水資源解析を実施するにあたり、(1)式における時間スケールを次のように設定した。海面上昇の時間スケールとして長期（ $t \sim 100$ 年）、エルニーニョなどの気候変動スケールとして中期（ $t \sim 4-8$ 年）、短期（ $t \sim 1$ 年以内）は季節変化～1週間程度に分け、それぞれ解析を実施した。

### 1) 平年的（気候值的）水収支

図5はマーシャル諸島共和国の首都であるマジュロ環における水資源解析結果である。マジュロ環礁は、東端に位置する都市域であるUlugaとDalap、農村地域であり豊富な淡水レンズを抱える

Laura、その地域間を結ぶLong Islandが主要な水資源供給を担っている。Long Islandにはマジュロ国際空港があり、滑走路を集水面として活用した集水システムと貯水プールがある。また、Laura島の淡水レンズから取水した淡水を貯水プールへ合流させて都市域に送水するシステムを採用している。この水供給システムは乾季やエルニーニョイベント時の渇水期に、降水に頼らなくても淡水レンズや貯水プールからある程度の生活用水を確保できるというメリットがある。滑走路の集水面はマジュロ環礁における全集水面積（1.62 km<sup>2</sup>）の24%（0.39 km<sup>2</sup>）を担っている。利用可能な全淡水貯留量（2226 ton）の93%を淡水レンズが占めており、貯水プールはわずか約6%（138 ton）である。都市域における世帯の71%が貯水タンクを保有しており（約1500個）、その集水面積と貯留量はそれぞれ全体の少なくとも2%（0.03 km<sup>2</sup>）と0.4%（9 ton）である。このようにマジュロにおけるSは、淡水レンズ、貯水プールおよび貯水タンクの三つから構成されている。

淡水収支の計算方法を、本論ではマジュロでの調査文献を多く残している南太平洋応用地球科学委員会（SOPAC）の知見や経験則を元に導出した。(1)式の各要素において、前節で求めたPやEの推定値に淡水レンズ、貯水プール及び貯水タンクのそれぞれの合計面積を乗じた。Qの計算には、マジュロ Water and Sewer Company (MWSC)から入手した水道使用量を基に計算した、一人当たりの水使用量（実際の消費量）を水需要量として用いた。水道水は主に飲料用や料理用に使用されている<sup>6, 7)</sup>。Lの推定はSOPACの結果を引用した<sup>23)</sup>。例えば、貯水タンクの漏水量は降水が貯水される際の降水量に乘じる集水効率係数0.8に含まれている。

淡水収支の計算結果の一例を図5aに示す。ここでは、気候値（1996～2008年の長期平均値）を平常時として想定した。解析するイベントとタイムスケールを、乾季（1～4月における120または121日間の平均値）、雨季（9月～11月における91日間の平均値）、エルニーニョイベント年（1998年の平均値：365日）として設定した。これらの各期間における平均値を計算し、平常時との差を議論する。雨季の降水量（ $P=\Delta S+Q+L+E$ ）は平常時より多く、乾季はエルニーニョ時と同程度に少ない。Eはどの時期においても8000 m<sup>3</sup>/日程度でありほとんど差はない。LをみるとPが多ければ漏水も多くなりPの量に比例するようである。降水量Pはどの時期においてもEによって46～67%、Lによって約6%損失する。 $\Delta S$ とQは、それぞれ9～36%と12～20%を占める。

グラフでは示していないが、Pにおける淡水レンズの占める割合は全体の8割で、貯水プールは2割であり、集水面積に比例する。貯水タンクは2%以下である。Eについても同様であり、この割合は各時期によってほとんど変わらない。しかし、Qについては人為的に制御されるため各時期によって差異があり、結果的に $\Delta S$ の量にも差異が現れる。

図5bは各時期における給水量Qを構成する各要素の量である。平常時に比べて乾季ではQが多く、貯水タンクからの消費量は減少し、貯水プールと淡水レンズからの給水量が多くなっている。貯留量増加量 $\Delta S$ をみると(図5c)、貯水プールは $\Delta S < 0$ となって貯留量が減少し、淡水レンズへの涵養も平常時の半分以下の増加量となっている。これは各世帯にある貯水タンクからの水供給量だけでは水需要量を満たせないために、平常時に貯水プールや淡水レンズに蓄積した淡水を各世帯に不足分だけ補填したものと考えられる。ところがエルニーニョ時では、降水量Pは乾季と同程度であるにもかかわらず、Qの配分は乾季とは異なる。エルニーニョ時には貯水プールからの給水を控え、Qを平常時の70%程度に抑えている。その結果、貯水プールでは $\Delta S > 0$ となり平常時よりも貯水されており、淡水レンズは乾季と同程度の貯留量増加を示している。これは乾季よりも長い期間水不足に見舞われるエルニーニョ発生時に、可能な限り水資源が枯渇しないように給水量に配

慮し、市民に対して節水政策を施行した結果であると考えられる。乾季よりもエルニーニョ時の方が持続期間は長いので水資源状況は厳しいと推察される。

## 2) 短・中・長期における水収支

短・中・長期および各ENSOイベントにおいて綿密に水収支解析した結果を表1にまとめた。平均的な降水量・蒸発散量にはマジュロ・フナフチともに明確な差異はみられないが、涵養量を人口で割った涵養/人口量はフナフチではマジュロの2倍以上ある。マジュロの人口（25400人）の水資源は貯水プールと淡水レンズで支えていることが供給量収支から理解できる。一方、淡水レンズが期待できないフナフチでは貯水量の少ない貯水タンクに頼っており、マジュロの供給量の7分の1程度となる。捕捉できていない潜在的な淡水量がまだ多く残されていることが推察される。この傾向は、比較的降水量が少なく短期的な乾季や長期渇水期が続くエルニーニョ期でも同様である。ただし乾季とエルニーニョが重なった時期はマジュロの供給量はフナフチの平年値とほぼ同じ値を示し、供給量は著しく低下する。

これらの結果から、マジュロの総人口（25400人）と一日あたりの総水使用量（1092 m<sup>3</sup>/日）から計算される一人当たりの平均的な水消費量は42 L/人/日であり、UNESCOが提唱する生活必要量の下限（50 L/人/日）をやや下回る。フナフチに関してはさらに下回り37 L/人/日となる。

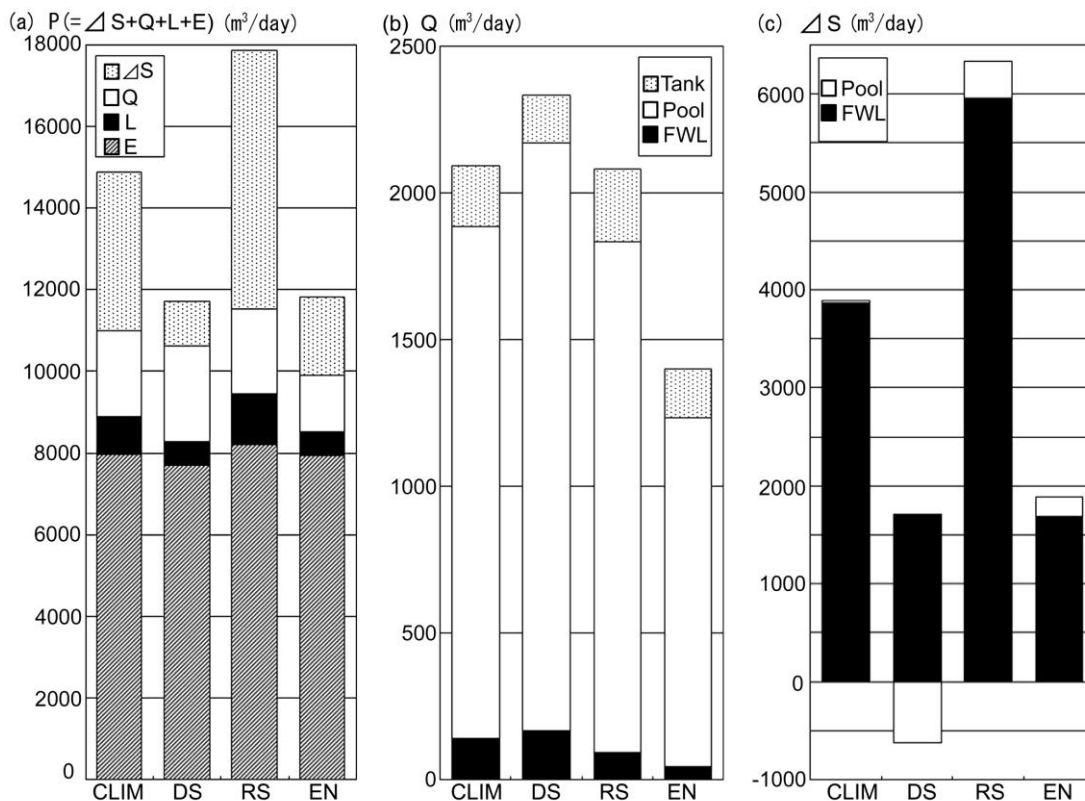


図5 平年値 (CLIM)、乾季 (DS)、雨季 (RS)、エルニーニョ期 (EN) におけるマジュロ環礁における(a) 水収支 (降水量P、蒸発散量E、水損失L、水供給量Q、水資源増加量 $\Delta S$ ) b) 水資源毎 (貯水タンク、貯水プール、淡水レンズ) の水収支 c) 淡水レンズと貯水プールの水資源増加量。

表1 マジユロおよびフナフチ環礁における水資源解析結果（速報値）

		マーシャル諸島・マジユロ				ツバル・フナフチ			
		短期		中期		中期		長期	
		1996-2008		Std El-nino		Dry El-nino		Climate Change	
		std		Dry Season		Rain Season		1996-2008	
		Dry Season		Rain Season		Dry Season		Rain Season	
降水Flux	Pf	280	220	222	170	336	293	230	352
蒸発Flux	Ef	167	167	167	173	165	205	206	203
涵養Flux	Rf	113	53	56	-3	171	88	25	148
消費率	C	43	43	38	39	45	37	29	44
淡水レンズ	RI	4530	2115	2226	-126	6834	2320	649	3917
貯水ブール	Rp	1457	680	716	-41	2199	0	0	0
貯水タンク	Rt	0	0	0	0	0	267	210	321
合計	R	5988	2795	2942	-167	9032	2333	670	3923
淡水レンズ	SI	141	165	44	35	93	0	0	0
貯水ブール	Sp	1742	2003	1190	226	1739	0	0	0
貯水タンク	St	0	0	0	0	0	267	210	321
合計	S(X)	1883	2168	1234	261	1832	267	210	321

#### (4) 同位体・水質分析

##### 1) ローラ島における地下水汚染状況と地下水年代

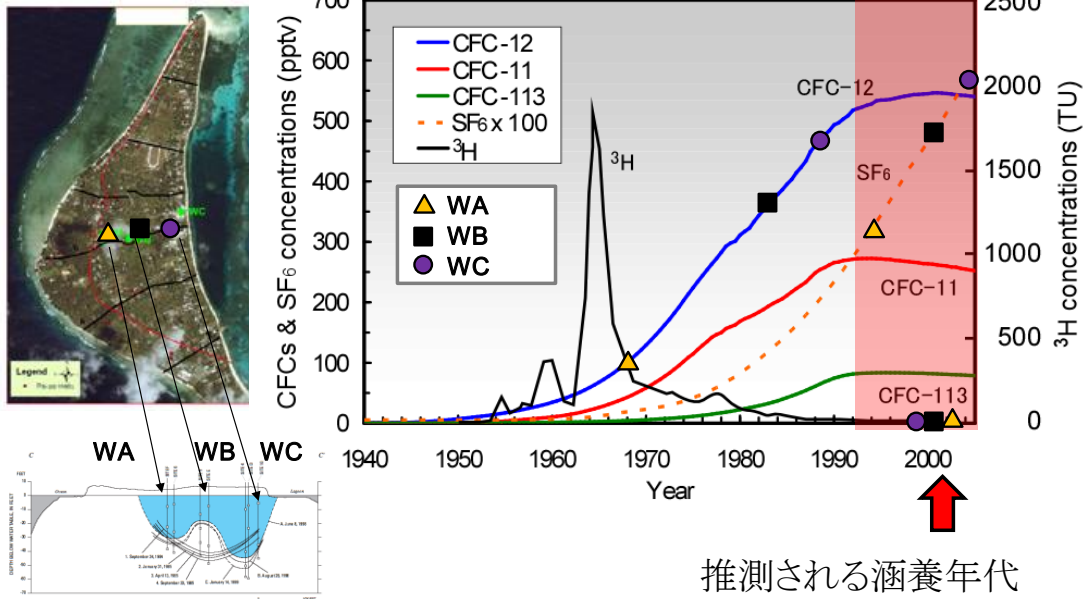
マジュロ環礁の都市域UlugaやDalapにおいて井戸水を採取し、硝酸態窒素 ( $\text{NO}_3+\text{NO}_2$ ) 量を指標にして汚染度の定量化を試みている。その結果、下水道設備の敷設がほぼ皆無であるためか、世界保健機関の基準値 ( $\text{NO}_3$  濃度で  $50 \text{ mg-NO}_3/\text{L} \approx 806 \text{ } \mu\text{M}$ ) を超える地下水汚染 ( $917 \sim 1055 \text{ } \mu\text{M}$ ) が複数地点で計測された (2007年8月時)。これは飲料水として、地下水資源の利用が極めて難しい状況である。このように、都市化した島嶼域においては下水道が普及されない限り、地下水は汚染され続けることになる。

いっぽうで、淡水レンズの豊富なLaura島の地下水汚染状況は、島の中央部を横切る側線上では、島の外洋側地下水の硝酸態窒素濃度 ( $260 \text{ } \mu\text{M}$ ) がラグーン側 ( $22.1 \text{ } \mu\text{M}$ ) の10倍以上であった (2007年9月調査時)。図6aに、北半球で観測される各種トレーサースガスの年代別の分圧を示し、それぞれのライン上に、同じ側線上のWA(海側)、WB(中央)、WC(ラグーン側)で観測されたCFCsと $\text{SF}_6$ の濃度をプロットしている。還元環境で劣化しやすいCFCsの結果では実際よりも古い年代が見積もられたと考えられるが、地下水中の $\text{SF}_6$ 濃度から地下水の涵養年代、つまり地下水年代を推測した結果、海域への海底湧水のあるラグーン側では5年以内に涵養した比較的新しい水が、島中央部では10年以上前に涵養した古い水が観測された。実際の硝酸濃度に反映されているように、外洋側へ向かうに従って滞留時間が長くなり汚染が蓄積しやすいと推察された。Laura島における水質状況は都市域に比較して良好ではあるが、島中心域では汚染が徐々に蓄積していると考えられる。一方で、2010年9月の調査時に行った島全域での地下水水質調査では、 $200 \text{ } \mu\text{M}$ を超える硝酸態窒素濃度は、島の海側や中央部に限らず、ラグーン側でも局所的に確認された。空港近くに建設した人工的な貯水プールとは異なり淡水レンズの形状が均質ではなく、混合速度も小さいことや、揚水に伴う局所的な流れがあることから、排泄物などの局所的な汚染源が、ラグーン側の井戸水の水質も悪化させていることが推測された。

##### 2) フォンガファレ島における地下水年代

図6bに、図6aと同様に、本調査において井戸W1、W2、W4で観測されたCFCsと $\text{SF}_6$ の濃度をプロットしている。プラスチック等からのコンタミのためか、どの地点でも高濃度のCFC-12 ( $1100 \sim 1500 \text{ pptv}$ ) が観測され、大気中の値を大きく上回る結果となった。一方で、CFC-113とCFC-11の結果からは、W2では0-10年前に涵養した新しい地下水、W4でも10-20年前に涵養した比較的新しい地下水であることが示唆された。一方で、全ての観測井戸の $\text{SF}_6$ 濃度は、現在の大气とほぼ平衡状態であり、地下水の涵養時期は5年以内である結果が得られた。ローラ島の地下水 (図6a) や、W1の地下水について顕著にみられるように、CFCsは還元環境においては微生物分解を受けて劣化し、古い地下水年代を示すことがある。今後の調査において再測定することが望ましいが、 $\text{SF}_6$ がそのような生物作用を受けにくいことから判断すると、島内の淡水地下水の涵養年代は5年以内と推定される。これは、地下水が非常に速い回転時間で交換されていることを示唆している。

(6a)



(6b)

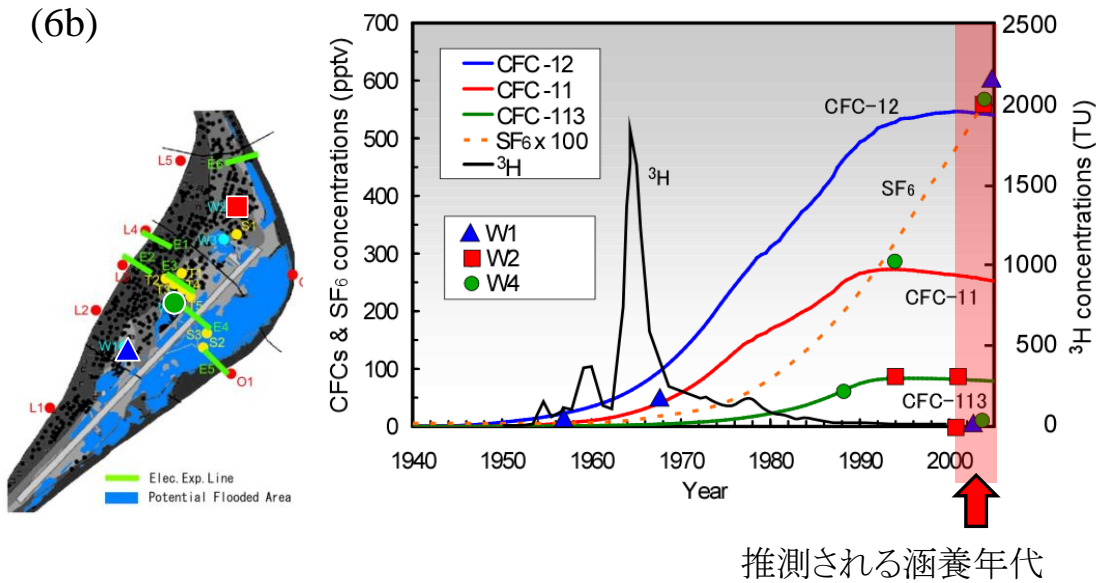


図5 地下水中のCFCsとSF<sub>6</sub>濃度から推測した(a)ローラ島と(b)フォンガファレ島における地下水涵養年代

## (5) 地下水流動モデル

### 1) 鉛直二次元断面地下水シミュレーション

環礁州島の地下水環境を単純に鉛直二次元場と仮定し、海面上昇に対する淡水レンズの応答を調べた。ここではIPCCの予測結果に従って2100年には海面は59cm上昇すると仮定した淡水レンズ予測シミュレーションを実施した(図7)。その結果、淡水レンズの底深度は29mから24mに減少し、淡水レンズ体積は20%減少すると推定された。長期的には海面上昇と降水減少によって水資源状況は厳しさが増すと推察される。

### 2) フォンガファレ島

図8bはフォンガファレ島における地下水流動シミュレーション結果である。現地調査および文献によると、標高1.35m以下の低地(滑走路周辺)では透水性の高い砂礫で構成されているため、潮汐混合が通常のHoloceneよりも大きいと考えられる。この効果を表現するため、標高1.35m以下の低地の透水係数・拡散係数を5倍にした。

水平分布の表層塩分をみると、塩分6以下の薄い淡水シート(濃紫色部)が散在しているのが確認できる。鉛直塩分断面図(図8c)をみるとこの淡水シートの厚さは2m程度であり、電気探査にも捕捉されない程度の厚さである。ほぼ同程度の島幅を持つフォンガファレ島ではローラ島とは対照的に淡水シートが散在しているようである。現地調査結果と比較すると、この淡水シートは観測井や地表噴出水などで測定された塩分値などから実際に確認された。標高1.35m以下の低地はほぼ塩水化しており、淡水シートの存在は期待できない。

島内部で大規模に起きている塩水浸入は避けがたい事実ではあるが、本数値計算結果は、新しい水資源として淡水シートが利用可能であることを示唆している。

### 3) ローラ島

図8eはローラ島における地下水流動シミュレーション結果である。淡水レンズが中央に形成されており、その水平・鉛直スケールは電気探査および観測井による観測結果と概ね一致した。また本数値計算では揚水所の効果を取り入れているため、塩分の鉛直分布図(図8f)をみると塩水堆が形成されていることがわかる。

本数値結果によって、淡水領域と汽水領域とを定量的に区別することが可能となり、環礁州島では一般的な汽水利用も、淡水レンズから可能となる適応策オプションを見出すことができた。



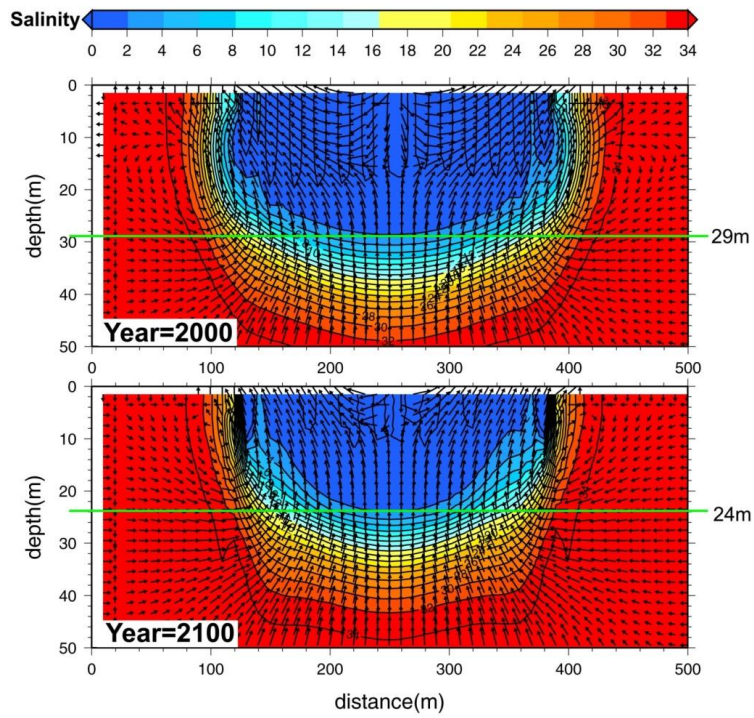


図7 鉛直断面淡水レンズモデルによって計算された海面上昇による淡水レンズの変化

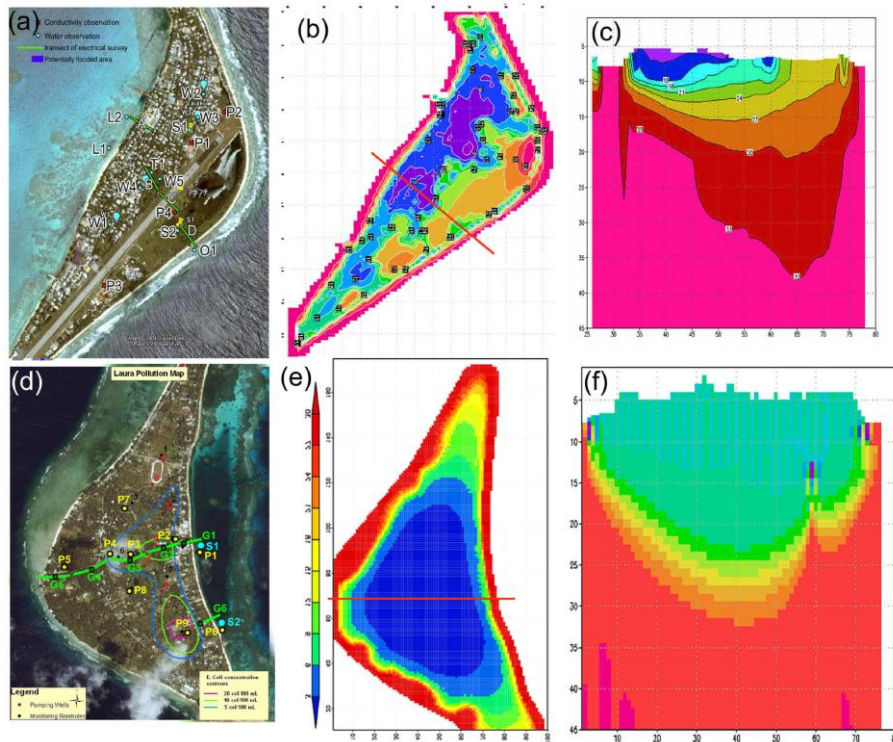


図8 地下水流動モデルによって計算されたフォンガファレ島とローラ島における(a)と(d)航空写真、(b)と(e)塩分の水平分布、(c)と(f)塩分の鉛直断面図((b)の赤線)。

## (6) おわりに

本サブテーマでは、小島嶼域の環礁州島における水資源の利用実態とその評価・予測を実施し、適応策オプションを見出した。環礁島における気候変動に対する適応策に資する一要素として、水資源評価は重要である。また環礁域の地球的／人為的影響による複合的な要因によって劣化する生態系を評価するための基礎知見ともなる。

ローラ島における淡水レンズは下に凸型の形から下に凹型に変化しており、その主因は揚水である。淡水レンズの塩淡境界深度の時間変化に対する潮汐変動の影響は微弱なものであった。一方、エルニーニョ現象等の気候変動による降雨減少、人口増加や都市化に伴う揚水量の増加などの地球的／人為的要因に対して、淡水レンズは大きく影響を受けていることが推察された。ローラ島のような比較的大きい環礁州島の水資源解析・管理の観点<sup>1)</sup>からは、電気探査による調査や観測井による塩淡境界深度の観測データの長期に渡る蓄積と監視が重要である。

フォンガファレ島では、地下水塩水化現象が潮位変動と同期している様子を初めて捉えることができた。脆弱域での比抵抗観測の結果は、外洋側から島内部に塩水が侵入する様子を示していた。たびたび発生する噴出水は、外洋から侵入する海水と降雨によって涵養された淡水が混合した汽水性の間隙水であり、その電気伝導度のとる範囲は1~24 mS/cmと幅広い。本研究では脆弱域における顕著な塩水侵入と淡水層が形成されない理由について、土地利用変化と地質構造の観点から論じた。その主因として、脆弱域は本来湿地帯であり、高間隙率の礫で埋め立てられたため、帯水層が高透水性となったことが挙げられる。

「日本の水資源」<sup>24)</sup>によると、平成18年度における日本の生活用水使用量は305 l/人/日である。小島嶼域が発展する中で都市域では先進国並みの生活様式が徐々に導入されはじめており、それを全島民が求めれば当然ながら水消費量も増大し、環礁域の矮小な水資源を逼迫する。マジュロ環礁における都市域では一人当たり125Lの淡水を毎日消費しているが、これは貯水プールと滑走路と淡水レンズを組み合わせた集水・供給システムがその実現を可能としている。このように水需要量増大へ対応するためには、インフラ整備などによる経済的視点を考慮したうえで、水の再利用等の科学技術を用いることは可能ではある。一方で、都市域以外のローカルな環礁島においては貯水タンクの性能が最良である場合でも、せいぜい40 l/日/人程度の水供給量しか担保できず、その量は都市域の3分の1程度になる。マジュロにおける水資源確保の成功例を他の環礁域にそのまま適用することは、費用対効果と地理条件を考慮すると難しく、先進国並みの近代化と都市化を実現できる環礁島は小島嶼発展途上国の中でも限られる。地球温暖化によって海面上昇した際に、まず降水量減少や地下水塩水化現象などの大きな影響を被るのはこのようなコスト面で科学技術を導入しにくいローカルな島嶼域であろう。今後は、都市化と近代化した島嶼域の水資源管理とともに、都市化の可能性の少ない9割以上の人口を占めるローカルな島嶼域の水資源をどのように確保・利用するかということも念頭に、塩水化の将来予測と適切な地下水利用方法の研究にプライオリティがおかれなければならない。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本調査では、様々な時間スケールでの水収支／資源解析を実施することに成功した。その結果、30年で潮位は7.2 cm 上昇しており、降水量は26 mm/月 減少していた。環礁島の淡水レンズは、

長期的な海面上昇により体積が20%減少すると予想される。都市化した環礁島住民の水消費活動の詳細な実態が明らかになり、先進国と比較するとあまり良好とは言えない水消費量で生活していることがわかった。エルニーニョなどの中期的な気候変動により淡水レンズの体積は最大50%増減する。ローラ島では揚水によって淡水レンズが下に凹状に歪められていた。観測用井戸水のSF<sub>6</sub>濃度分析結果からは、海域への流出のあるラグーン側では5年未満に涵養された比較的新しい水が存在するの対し、島中央部では10年以上前に涵養された古い水があり、外洋側へ向かうに従って滞留時間が長くなり汚染が蓄積しやすい古い水であることが推察された。これにより、淡水資源の管理に向け、動態把握と予測が可能となった。

## (2) 環境政策への貢献

本研究による長期・中期・短期の水資源解析および水収支観測・解析は、気候変動下での水資源政策へのオプションを提供することで地球環境政策に貢献する。本研究結果による知見のフィードバックとして、2009年8月に地域住民向けのワークショップをマーシャル諸島マジュロにて開催した。また2010年5月には地球惑星連合大会において成果発表を実施し、政策担当者へのフィードバックができた。今後も地下環境シンポジウムや定期的な国際学会などを通じて、政策担当者や研究者に成果の普及や広報に努めるつもりである。

## 6. 引用文献

- 1) White, I., Falkland, T. (2010) Management of freshwater lenses on small Pacific islands, *Hydrogeology Journal*, 18, 227–246, DOI 10.1007/s10040-009-0525-0.
- 2) Burns, W. C. G. (2000) Pacific Island developing country water resources and climate change, in “The World’s Water 2002–2003: The biennial report on freshwater resources” (Ed. P. H. Gleick, W. C. G. Burns, E. L. Chalecki, M. Cohen, K. K. Cushing, A. S. Mann, R. Reyes, G. H. Wolff, and A. K. Wong,), pp.113-131, Island Press, Washington, D.C.
- 3) Pernetta, J. C. (1992) Impacts of climate change and sea-level rise on small island states, *Global Environmental Change*, 2(1), 19-31.
- 4) MacCracken, R. S., Jenson, J. W., Heitz, L. F., Rubinstein, D. H. and Mylroie., J. E. (2007) Water resources analysis of Fais Island, Federated States of Micronesia, Technical Report, (111), Water and Environmental Research Institute of the Western Pacific, University of Guam, Mangilao.
- 5) Cox, D. C. (1951) The hydrology of Arno Atoll, Marshall Islands, Atoll Research Bull., (8), The Pacific Science Board, Washington, D.C.
- 6) Stephenson, R. A. (1984) A comparison of freshwater use customs on Ultihi Atoll with those of selected other Micronesia islands, Technical Report, (51), Water and Energy Research Institute, University of Guam, Guam.
- 7) Bailey, R. T., Jenson, J. W., Rubinstein, D. and Olsen, A., E. (2008) Groundwater resources of atoll islands: Observations, modeling, and management, Water and Environmental Research Institute of the Western Pacific, University of Guam Technical Report, (119).
- 8) Falkland A. (2002). From Vision to Action: Towards sustainable water management in the Pacific, Theme 1 overview report, Water resources management, 69.pp, Ecwise Environmental, Canberra.

- 9) White, I., Falkland, T., Perez, P., Dray, A., Metutera, T., Metai, E. and Overmars, M. (2007) Challenges in freshwater management in low coral atolls, *Journal of Cleaner Production*, (15), 1522-1528.
- 10) IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, R. K. Pachauri and A. Reisinger (eds.), IPCC, Geneva, pp.102. IRDB, 2000: Gestión de los Recursos Hídricos, 2007.
- 11) Swarzenski, P.W., W. C. Burnett, Y. Weinstein, W. J. Greenwood, B. Herut, R. Peterson, N. Dimova : Combined time-series resistivity and geochemical tracer techniques to examine submarine groundwater discharge at Dor Beach Israel. *Geophysical Research Letters*, 33: L24405. doi:10.1029/2006GL028282, . 2006
- 12) Monteith, J.L. (1965) Evapotranspiration and environment. In "The state and movement of water in living organs" (Ed. Fogg, G. E.), pp.205-234, Soc. Exp. Biol. Symp., **19**, Cambridge University Press, Cambridge.
- 13) Guo W, Langevin CD. 2002. User's guide to SEAWAT: a computer program for simulation of three-dimensional variable-density groundwater flow. US Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations 6-A7.
- 14) Bryan, E. H. Jr. (1953) Check list of atolls, Atoll Research Bull., (19), The Pacific Science Board, Washington, D.C.
- 15) Ayers, J. F. and H. L. Vacher (1986) Hydrogeology of an atoll island: A conceptual model from detailed study of a Micronesian example, *Ground Water*, **24**, 185-198.
- 16) Bailey, R. T., Jenson, J. W. and Olsen, A. E. (2009) Numerical Modeling of Atoll Island, Hydrogeology, *Ground Water*, **47**(2), 184-196.
- 17) Bailey, R. T., Jenson, J. W. and Olsen, A. E. (2010) Estimating the Ground Water Resources of Atoll Islands, *Water*, **2**, 1-27, doi:10.3390/w2010001.
- 18) Presley, T. K. (2005) Effects of the 1998 Drought on the Freshwater Lens in the Laura Area, Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, Scientific Investigations Report 2005-5098, U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey.
- 19) 島 祐雅, 梶間和彦, 神谷英樹 : 建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法, pp. 206, 古今書院, 東京, 1995.
- 20) Yamano, H., H. Kayanne, T. Yamaguchi, Y. Kuwahara, H. Yokoki, H. Shimazaki, and M. Chikamori: Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstruction: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. *Global and Planetary Change*, 2007, **57**, 407-416, 2007.
- 21) Underwood, M. R., F. L. Peterson, and C. L. Voss : Groundwater tens dynamics of atoll islands. *Water Resour. Res.* 28 (11), 2889-2902 ,1992.
- 22) McQuarrie P. : Strategic Atolls. Tuvalu and the Second World War. pp.187, Macmillan Brown Centre for Pacific Studies, University of Canterbury, Christchurch, 1994.
- 23) Webb, A. (2007) Assessment of salinity of groundwater in swamp taro (*Cyrtosperma Chamissonis*)

“Pulaka” pits in Tuvalu, EU EDF8-SOPAC Project Report, (75).

24) 国土交通省水資源白書 (2009) 日本の水資源,平成 21 年度版.

## 7. 国際共同研究等の状況

UNESCO-IHPプロジェクトGRAPHIC (Groundwater Resources Assessment under the Pressures of Humanity and Climate Change), Alice Aureli, France,

## 8. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文 (査読あり)>

- 1) 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)
- 2) 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).

<その他誌上発表 (査読なし)>

- 1) 中田聡史：環礁島における水資源と淡水レンズの劣化, 水環境学会誌特集号, **33**(8), 239-244 (2010) .

### (2) 口頭発表 (学会)

- 1) 中田 聡史・谷口 真人・山野 博哉 Effect of nearshore bathymetry on submarine groundwater discharge and seawater circulation in the subterranean estuarine. Human Impacts on Urban Subsurface Environment, The 3rd Internationnal Symposium, Nov 17, 2009–Nov 18, 2009, 台湾・台北市.
- 2) Nakada, S., Y. Umezawa H. Yamano and M. Taniguchi. Evaluation of aquifer Salinization in the atoll islands by using Electrical Resistivity, Japan Geoscience Union Meeting 2010, Makuhari, Japan, Mar., 2010.
- 3) 中田聡史, 山野博哉, 梅澤 有, 谷口真人. 環礁洲島における地下水塩水化. 日本サンゴ礁学会13回大会, つくば 2010年12月.
- 4) 梅澤 有, 中田聡史, 谷口真人, 利部 慎, 浅井和由, Greg Wolff, Gunter Koepke, 山野博哉. 環礁洲島における地下水滞留時間の推定. 日本サンゴ礁学会13回大会, つくば 2010年12月.
- 5) Taniguchi M., S. Nakada, Y. Umezawa, H. Yamano. Sustainable use of groundwater in Atoll Islands, American, AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2010.12
- 6) Taniguchi M., International Symposium on “Groundwater as a key of adaptation to climate change”, UNESCO-IHP, Kyoto, 2010.11

### (3) 出願特許

※特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）

Water Resources In Atoll Islands. マーシャル共和国・マジュロ市民セミナー, 2009年08月06日-2009年08月06日, マーシャル共和国・マジュロ環礁・ウリガ島.

(5) マスコミ等への公表・報道等

ネイチャー・クライシス. 日本経済, 2009年9月6日 朝刊, 13.

(6) その他

大学出前講義. 「海面上昇で沈むサンゴ礁国!? ツバル」2009年5月9日, 同志社大学.

中学校出前講義. ツバルは小さな日本, 2009年12月9日, 蜂ヶ岡中学校.

中田 聡史 2009年10月 海面上昇で沈みゆく島々 ツバルから日本への警鐘. 地球研ニュースレター 22 :8-8