

データが必要である。そのため南太平洋大学やフィジーに本拠を置くSOPAC (South Pacific Applied Geoscience Commission) で既往の調査資料をできるだけ収集した。

影響検討は首都であるフナフチ島フォンガファレを対象とした。1995年11月24日～28日現地調査を行った。

図-2に示すように、フナフチ島は直径約20 kmの環礁の島である。首都フォンガファレはこのリングの東側の一端にあたり、ラグーンと外洋に挟まれた島の幅は狭いところで約20 m、最大で約700 m程度しかない。民家、政府施設は、ラグーンに面した西側の海岸線に集中している。この海岸では、後浜のすぐ背後にココナツ林が広がりその間に民家が点在しているが海岸に最も近い民家は浜の岸端から10 mと離れてなく海に近接している。

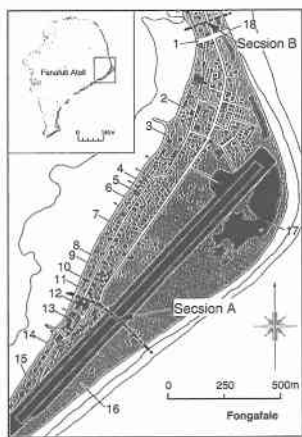


図-2 フナフチ島フォンガファレの調査対象地点



写真-2 海岸侵食による倒木と海岸護岸 (No. 8 地点付近)



写真-3 最近のコンクリートブロック護岸 (No. 10 地点付近)

これを守る海岸保全施設は貧弱である。大半の区間は無施設の自然海岸であり、古くに設置された石積み護岸、蛇籠の護岸は崩れている。比較的最近では写真-2にあるように汀線付近にコンクリートブロックを積み上げた海岸護岸が広い範囲でつくられているが、それらはブロックの散乱など、多くに被災の跡が見られた。一部には写真-3のように一辺30 cmの立方体のコンクリートブロックを積み上げた最新の護岸があるが、天端高が低く波は容易に乗り越えるだろう。また汀線ぎわには海岸侵食によって浜が削られて木が倒れているのが随所で見られた(写真-2)。これは第2次大戦中、滑走路建設用の骨材としてラグーンのサンゴ礁を掘削したため現在でもその穴を埋め戻すように砂が沖に移動し、海岸の侵食が進行しているためである(Xue・Malologa, 1995)。

ツバルには整った地形図がなく陸域の標高が定かではない。そこで図-2に示すように沿岸部の18地点を定め、ポールを用いてその陸域の端部の地盤高と砂浜の断面を測量した。測量方法は2本のポールを用いて海面位置を基準に高さを計測し、後で測量時刻の潮位から補正した。この基準水位はオーストラリア・フリンダース大学がラグーン内で実施している潮位観測記録を入手し算定した。地形の断面図をつくった結果、ラグーン側の測量地点の標高は平均潮位時の海面上1.1～2.7 m、満潮時の海面上0.5～1.9 mしかないことが明らかになった。

4. 海面上昇の物理的影響の検討

4.1 影響検討項目と海面上昇のシナリオ

当地は現在でも暴風雨時のラグーン内からの風浪により波の打ち上げと越波が内地を浸水している。このため、海面上昇の直接的影響としてはまず、低地の水没・氾濫、そして越波による災害がひどくなることが心配される。また、水深増加によって岸の波高と波力が増大して護岸が破壊されるおそれが強い。さらに地下水位の上昇、地盤下からの浸水も心配される。そこで以下では、図-2のラグーン側の調査地点を対象に、測量で得られた地形データをもとに波高や波のうねりなどを計算し、水没・氾濫、越波、海岸保全施設、地下水に対する海面上昇の影響を検討した。

海面上昇量のシナリオとして0.3 m, 0.5 m, 1.0 mの3通りを設定した。波浪条件は現状から変化しないと仮定する。実際には、温暖化に伴う、風の変化、台風の進路の変更や巨大化などの気象変化も考えられるが、不確定要素が高いためここでは考慮しない。

4.2 水没・氾濫、越波・うち上げ

海面上昇が生じた場合の、各調査地点の地盤高と海面位置の関係を調べた。海象条件として、波浪が静穏で潮位が平均潮位にある「平常時」と、満潮時に再現期間 $R_t =$

10年のサイクロンが来襲した「異常時」の2つを設定した。さらに「異常時」の条件に波の打ち上げ高を加えたものも調べた。表-1にこれらの水位と波浪条件を示す。オーストラリア・フリンダース大学がラグーン内で実施している潮位観測の記録から算出したフナフチの平均潮位 M.S.L.は、C.D.L.(海図基準面上)+2.0mであった。これを「平常時」とする。平均満潮位 H.W.L.は M.S.L.+0.8mであり、「異常時」はこれに、サイクロンの高潮偏差=0.19mを加えた高潮位 H.H.W.L.とし、M.S.L.+0.99mとした。以下、潮位と地盤高は平均潮位(M.S.L.)を基準に表す。

サイクロンの諸元は、沖波波高 $H_o=1.2$ m, 周期 $T=4.2$ sec, 高潮偏差=0.19mと設定した。この波浪条件は、Carter (1986) が1950年～1984年の34年間の当地の気象観測所の風記録とラグーンのフェッチからSMB法で推算した結果を使っている。高潮偏差についても同様に、彼の推算結果を利用した。

波の打ち上げ高の計算方法は、改良仮想勾配法(全国海岸協会, 1987)を用いた。その際、海浜断面形は海面上の部分と現地調査の測量結果を用い海底部分は勾配1/10の一樣斜面と仮定した。打ち上げ高は陸域端部の位置を計算対象とし、地盤高を上回る場合にはそこに仮想的な鉛直壁があるものと仮定した。

また、サイクロンの再現期間を変化させて越波災害の頻度についても検討したが、その場合の波浪と潮位条件

表-1 海面上昇によるシナリオと水位・波浪の条件

		平常時 M.S.L.	異常時 H.H.W.L.	異常時の 打ち上げ
水位 M.S.L.上	現況	±0.0 m	+0.99 m	+0.99 m
	海面上昇量 0.3 m	+0.3 m	+1.29 m	+1.29 m
	0.5 m	+0.5 m	+1.49 m	+1.49 m
	1.0 m	+1.0 m	+1.99 m	+1.99 m
再現期間 R_i		—	10 年	10 年
波浪		—	$H_o=1.2$ m $T=4.2$ s	$H_o=1.2$ m $T=4.2$ s
高潮偏差		—	0.19 m	0.19 m

表-2 再現期間を変化させた場合の波浪・水位の条件

再現期間 R_i (年)		5	10	15	20	30	50
波浪条件	H_o (m)	0.8	1.2	1.4	1.6	1.9	2.2
	T (m)	3.5	4.2	4.6	4.8	5.2	5.6
高潮偏差 (m)		0.10	0.19	0.23	0.26	0.30	0.38
水位 H.H.W.L.= H.W.L.+高潮偏差 (m: M.S.L.上)	現況	+0.90	+0.99	+1.03	+1.06	+1.10	+1.18
	海面上昇量 0.3 m	+1.20	+1.29	+1.33	+1.36	+1.40	+1.48
	0.5 m	+1.40	+1.49	+1.53	+1.56	+1.60	+1.68
	1.0 m	+1.90	+1.99	+2.03	+2.06	+2.10	+2.18

もCarter (1986)の推算より表-2のように設定した。以下に検討結果を示す。

図-3(A), (B) は、それぞれ「平常時」と「異常時」の海面高さと各調査地点の地盤高を比較したものである。「平常時」の場合、1.0 mの海面上昇量で海面が地盤高すれすれまで来る箇所がある。「異常時」では、わずか0.3 mの海面上昇量で一部の地点が浸水しはじめ、以後0.5 mの海面上昇量で全地点の約1/3が、1.0 mの上昇量で約2/3が浸水する。これに波の打ち上げを加えたものが図-3(C)である。この条件では現況においてすでに大半の地点で打ち上げ高が地盤高を越えている。これに0.3 mの海面上昇でほとんどの地点が浸水し、0.5 mの海面上昇では全地点が浸水されることがわかる。

ここで、土地の断面に対して越波がどう影響するかを調べた。インフラ施設が集中するA区間のラグーン側から外洋側への横断地形に対して、平常時、異常時、打ち上げ時の海面位置との関係が図-4(A), (B), (C)である。横断地形はすり鉢状になっていて、内陸部の最も低い領域には国際空港の滑走路がある。ラグーン側の土手の最高点の高さはM.S.L.上1.9 mしかない。図-4(B)にあるように1.0 mの海面上昇で「異常時」の海面はここを乗り越える。実際には波の打ち上げが加わり、図-4(C)となる。海面上昇がなくても波はすでにこの最高地点を越えており、内部の広い窪地はほぼ冠水する状況がうかがえる。さらに窪地では浸水した水が逃げ場をもたない。

図-5は、海岸のすぐ背後に政府施設があるNo.12地点について、再現期間5年～50年の範囲でサイクロンの規模を変化させた計算を行い、打ち上げ高の再現期間が海面上昇によってどのように短縮されるかを示したものである。図中の一本の線が同一の打ち上げ高を表す。図より、現況の30年に一回の規模のものの再現期間が、0.3 m, 0.5 m, 1.0 mの海面上昇量で20年, 15年, 7年になる。同様に、現況の20年の規模のものの再現期間は14年, 9年, 4年になり、10年の規模のものは6年, 5年, 2年の頻度に短縮されていく。いずれも最初の0.5 mまでの上昇分だけで災害の発生頻度がほぼ倍増することを表している。

4.3 海岸保全施設

海面上昇に伴って水深が増大すると碎波点が岸に近づき、汀線付近の波高を増大させる。波力が増えることで護岸施設が危険になる。そこで、コンクリートブロック護岸を取りあげて、その安定性を評価した。

方法は、波の打ち上げの検討と同様の再現期間10年のサイクロンが満潮時にやってきた状況を対象とし、沖波波高 $H_o=1.2$ m, 周期 $T=4.2$ s, 潮位 H.H.W.L.=M.S.L.+0.99 mとした。まず護岸の堤前波高 $H_{1/3}$ (設置

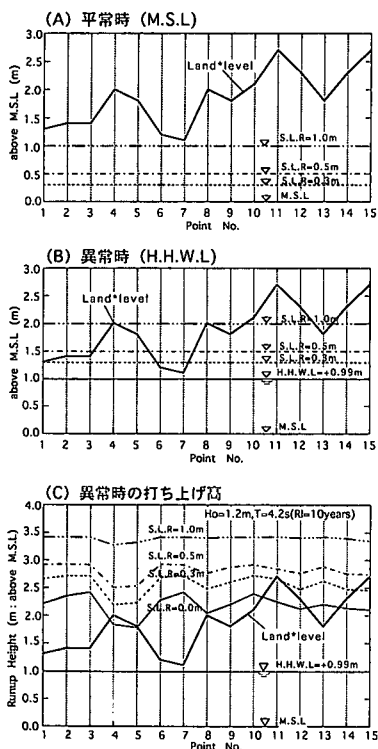


図-3 各調査地点の海面上昇後の水位と地盤高の関係

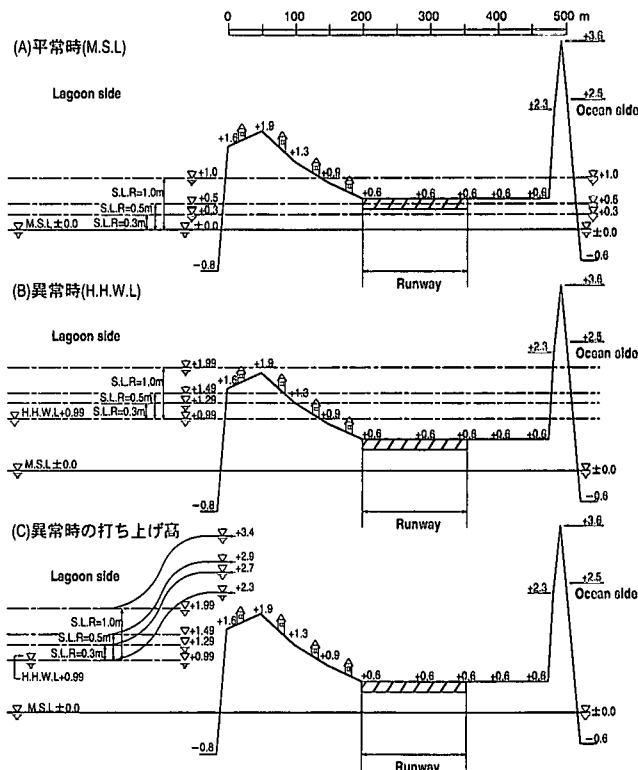


図-4 A 区間の横断面と海面上昇後の水位の関係

位置での波高)を合田(1977)の砕波帯内の波高算定図で求め、この波高からハドソン公式を使ってコンクリートブロックの必要重量を算出した。計算に使うコンクリートブロック護岸と地形条件は、現地踏査より写真-3の最近建設された護岸の状況を踏まえて定めた。海底勾配は1/10、護岸の設置水深はM.S.L.+0.2m、天端高はM.S.L.+1.5m、護岸の法面勾配は1:2である。このコンクリートブロックの K_D 値は、その形状が単純な立方体であることから $K_D=5$ と仮定した。以下に検討結果を示す。

図-6は、海面上昇による護岸の堤前波高 $H_{1/3}$ の増大率を示す。現況で0.83mの堤前波高が0.3m、0.5m、1.0mの海面上昇で、それぞれ25%、38%、48%増大している。コンクリートブロックの必要重量はハドソン公式によれば波高の3乗に比例して増大する。この必要重量と増大率を図-7に示した。図より現況の必要重量0.07tに対し、0.3m、0.5m、1.0mの海面上昇量でそれぞれ0.13t、0.18t、0.23tと増大し、増大率はそれぞれ1.9倍、2.6倍、3.2倍となる。しかし、実際のブロック重量は0.06tと、算出された現況の必要重量0.07tにすでに不足している。そこで、このコンクリートブロック護岸がどのくらい被災するかを見積もるために、テトラポットの被災率(ブロック設置個数に対する波によって

移動される個数の割合)を図-6に示した。これは現況条件の堤前波高に対する被災率が0~5%の水準にあるとしたときの波高増大率と被災率の関係を示している。図より海面上昇量0.3m、0.5m、1.0mで被災率は15~20%、20~40%、40~50%の水準へと増大する。Shore Protection Manual (CERC, 1984)によれば砕波帯内に設置した護岸の場合30%以上の被災率は実際には堤体の全壊を意味するとされるから0.5mの海面上昇で全壊の水準に達する。

いま現在も脆いコンクリートブロック護岸はさらに破壊が進む。海岸侵食の被害はますます大きくなる。

4.4 地下 水

海面上昇は、透水性の高い地盤を介して島の地下水位を上昇させる。そこで、地下水位が海面の平均潮位に等しいとみなして、地下水位と内陸部の地盤高の関係を比較した。これは、A区間の横断面を示した図-4(A)からわかる。図より、滑走路付近一帯は地下水面上わずかに0.6mの高さしかない。1mの上昇量では完全に水没してしまう。また図の地下水面上の断面積は0.3m、0.5m、1.0mの海面上昇により、現況の69%、50%、23%へと著しく減少している。水没しない場合でも滑走路の排水能力の低下、海水の侵入により土質が塩分化して地盤の支持力の低下など滑走路の耐久性に悪影響を及ぼし得る。

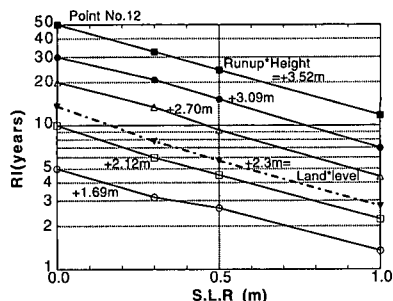
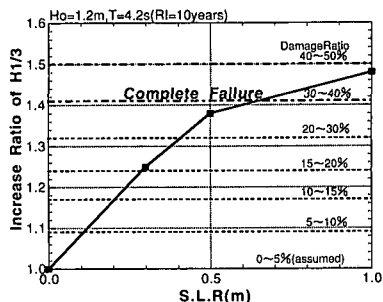
図-5 打ち上げ高の再現期間 R_t の変化

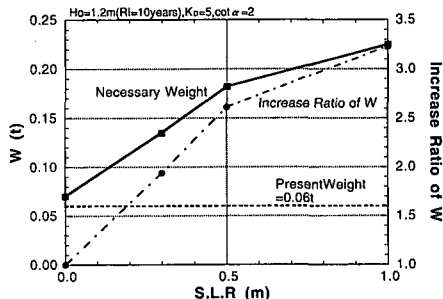
図-6 波高増大率とコンクリートブロックの被災率

一方、現在でもフナフチの地下水位は高く、海水が地表近くまで迫っているため、ココナッツや限られた植物しか生育しない。タロ、プラカなど主食の作物の生育も限られる。これ以上塩水の地下水位が高くなると、植生に著しい影響がでることになる。

5. おわりに

以上の結果より、フナフチ島は低平な地形と狭小な国土に起因して、海面上昇に対して予想をはるかに越えて脆弱であることが明らかになった。

海面上昇は、30 cm の上昇でさえ、人口増大傾向にあるフナフチの住民の日常生活に大きな影響を与え、50 cm では氾濫、越波の被害は甚大で、土地、建物、人々の生活に壊滅的な打撃を与え得ることが予想される。1 m ではほとんど水没する。とくに、すり鉢状の地形の底部に位置する国際空港は今でも暴風雨時は脆く、被災すれば災害時の物資や人の輸送に大きな影響を与えると予想される。温暖化により台風の規模や発生頻度が変化し、高潮や波浪の厳しさが増すようになれば、以上の検討結果はさらに重大なものになる可能性が高い。海面上昇の影響は、海岸保全施設、家屋、政府施設の被災にとどまらず、飲み水の不足、自給自足経済を支える農業にまで及ぶ。被害によっては復旧再生は不可能となり、ツバルの国家存続に重大な危機を与える。ツバルの社会、経済、制度、文化への広義の影響については山田ら (1997)、SPREP, EAJ, OECC (1996) が論じている。

図-7 コンクリートブロックの必要重量 W と増大率

フナフチ島のようなサンゴ礁の島は島全体が海面上昇や気候変動の影響下に入ることになる。したがって島内の高地に移動する撤退策といった対応策をとる余地はない。土木工学的には、現在も進行中の海岸侵食を止め、少しでも気象災害に対する安全性を高める方策を考えるべきである。しかし、もし海面上昇や気候変動が最悪の予測コースで進んだ場合、住民は他の安全な島あるいは他国に移住する以外にはない。本研究は、サンゴ礁の島国が世界で最も脆弱であるという指摘を具体的に裏づける結果になった。

最後に、本研究は 1992~96 年に環境庁の支援で南太平洋地域環境計画 (SPREP) と日本により行われた共同調査「南太平洋地域の沿岸域管理計画策定支援調査」の成果である。いっしょに現地調査された西岡秀三国立環境研究所統括研究官、大野栄治名城大学都市情報学部助教授、海岸での簡易測量方法を教えてくださった宇多高明建設省土木研究所河川部長と(株)エムエーシーの神田康嗣氏をはじめ、そのほか協力、資料を提供して下さったすべての関係者に謝意を表する。

参考文献

- 合田良実 (1977): 港湾構造物の耐波設計—波浪工学への序説, 鹿島出版会, pp. 58-65.
- 全国海岸協会 (1987): 海岸保全施設築造基準解説, 269 p.
- 山田和人・芹沢真澄・大野栄治・三村信男・西岡秀三 (1997): 気候変動・海面上昇に対するツバルの脆弱性—南太平洋の極端に標高の低いサンゴ礁島嶼国の例として—, 第 5 回地球環境シンポジウム講演集, 土木学会, pp. 127-132.
- Coastal Engineering Research Center (1984): Shore Protection Manual Second Printing, U.S. Army Corps of Eng'rs., U.S. Govt. Printing Office, Vol. 2, pp. 7-211-212.
- Ralf Carter (1986): Wind and Sea Analysis Funafuti lagoon, Tuvalu, SOPAC Technical Report, No. 58, 9 p.
- SPREP, EAJ, OECC (1996): Integrated Coastal Zone Management Programme for Fiji and Tuvalu, Coastal Vulnerability and Resilience in Tuvalu, Assessment of Climate Change Impacts and Adaptation, 130 p.
- Xue and Malologa (1995): Coastal Sediment and Coastal Management of Fongalale Atoll Tuval, SOPAC Technical Report, No. 221, 54 p.