

25. ツバル国フナフチ環礁の ラグーン海岸における水質汚濁

藤田 昌史^{1*}・佐藤 大作¹・桑原 祐史²・横木 裕宗¹

¹茨城大学工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

²茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1)

* E-mail: fujita@mx.ibaraki.ac.jp

中部太平洋に位置する環礁州島では、砂の起源は主として有孔虫殻であるが、人為的な水質汚濁等の影響を受けて砂の生産量が低下している。これは、将来の海面上昇に対する国土維持問題をさらに深刻化させる恐れがある。一方、具体的な水質対策を立てるための基礎的な知見は乏しい。そこで本研究では、ツバル国フナフチ環礁のラグーン海岸において、水質汚濁の現況や機構を調べた。多項目水質計による連続観測や底質の細菌群集構造解析の結果から、高人口密度地域の付近では水質汚濁が慢性化していることがわかった。また、それぞれの住居の近くに埋設されているボトムレスの合併浄化槽やピット式トイレから、引き潮のときに汚水が地中を通じて流出していることが、ラグーン海岸の水質汚濁の主要な原因であることが明らかとなった。

Key Words : water pollution, domestic wastewater, *E. coli*, quinone, lagoon-side coast, Funafuti atoll

1. はじめに

気候変動による海面上昇や極端現象などに対し、小島嶼や低平デルタ地帯は脆弱であることが知られている¹⁾。海面上昇が引き起こす物理的影響として、海岸侵食、浸水、洪水などが挙げられているが、ツバル国のように環礁から成り立つ環礁国では、被害が特に深刻化することが懸念されている^{2,3)}。

中部太平洋には、ツバル国、マーシャル諸島共和国などに属する環礁が数多く存在するが、この地域一帯の環礁州島では、砂の起源は主として有孔虫殻である⁴⁾。すなわち、砂の生産は生物プロセスに依存している。一方、環礁国の本島は人口密度が高いことから(例えば、ツバル国フォンガファレ島: 8,300人/km²⁵⁾、マーシャル諸島共和国マジュロ島: 11,724人/km²⁶⁾)、人間活動に起因する水質汚濁やゴミ問題が、砂の生産者である有孔虫の生息に影響を及ぼすことが懸念されてきた⁷⁾。事実、高人口密度地域付近の海水は栄養塩類濃度が相対的に高いことや、このような場所では有孔虫の存在量が相対的に少ないことが明らかとなっている⁸⁾。通常よりも高い濃度で栄養塩類が存在することにより有孔虫の生息環境が変化することや、共生している藻類との関係に悪影響を及

ぼすことが、有孔虫の生息に及ぼす負の要因として考えられている⁹⁾。

将来の海面上昇を想定すると、人為的な影響による砂の生産能力の低下は、国土維持問題をさらに深刻化させる懸念がある。その意味では、環礁国が抱える脆弱性は、IPCCが指摘しているグローバルな影響に加えて、このようなローカルな影響も複合的に関連することから⁹⁾、このような観点も視野に入れる必要がある。しかしながら、環礁における水質汚濁については、前述したような人口密度と水質との関係が議論されているに過ぎず、汚濁の原因や機構についての知見はほとんどない。

そこで本研究では、環礁国において水質対策を図るうえで必要となる基礎的な知見を得ることを目指し、ツバル国フナフチ環礁のラグーン海岸を対象に調査を実施した。まず、人口分布に明らかな違いがあるフォンガファレ島海岸の二地点において、水質汚濁の状況を調べた。既存の研究では、多くのスポット試料を得て水質分析を行い、統計学的な検定を経て考察する手法がとられている^{8, 10)}。これは大変な労力を要するものの、一方で潮汐による濃度変化の取扱いが難しい。そこで著者らは、多項目水質計を用いた連続観測と底質の細菌群集構造を評価する手法を併用した。特に、珊瑚礁海域の調査ではほ

とんど利用されることのない酸化還元電位も測定した。生物指標は長期的な環境の履歴が反映されることから、非常に有効となる。次に、フォンガファレ島海岸で水質汚濁が顕著だった地点に着目し、汚濁源や流出経路を調べることににより、ラグーン海岸の水質汚濁機構を明らかにした。

2. 方法

(1) 調査地点

ツバル国の首都フナフチ環礁のラグーンを対象とした。フォンガファレ島 (8°31'S, 179°12'E) の海岸を対象に、2010年4月と8月に現地調査を実施した (図-1)。フォンガファレ島で最も住居が集中しているアラピ地域付近 (AP) と近くに住居がなく人為的な影響が無視しうると考えられる南端付近 (ST) を調査地点とした。

(2) 多項目水質計による観測

水温、電気伝導度、塩分、溶存酸素、pH、酸化還元電位の各電極を装着した多項目水質計 (Model 6600V2, YSI/Nanotech) を用いて、2010年4月3日にAPで、5日にSTで、それぞれ10分間隔で約1日間連続測定した。APではさらに2010年8月6日から4日間にわたる観測を行った。

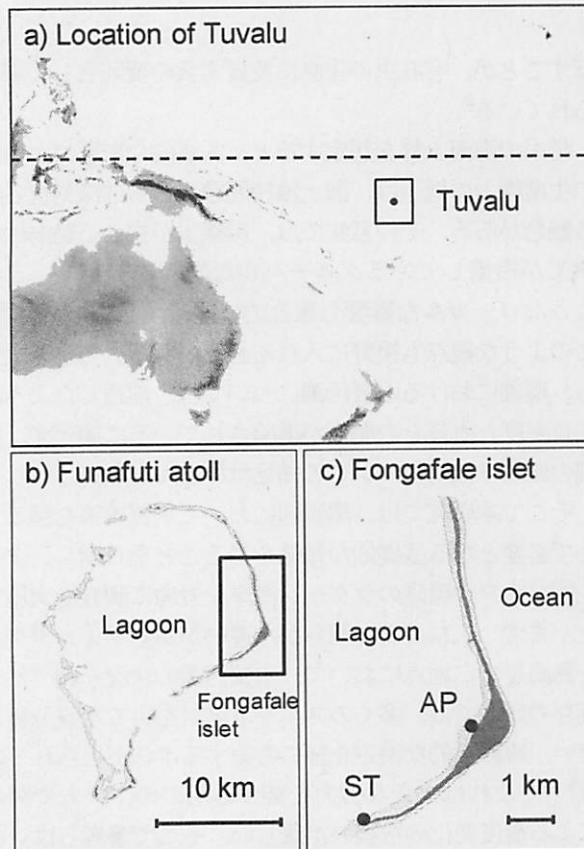


図-1 調査地点

両地点ともに、汀線からラグーン側に約15m程度、礁原の底部から約20cmの高さに各電極面を設置した。観測期間中の水深は40~60cm、潮位は1.0~3.2mであった。

(3) 底質の細菌群集構造解析

a) キノンバイオマーカー

キノンは、細菌の電子伝達鎖において水素キャリアーとして機能する補酵素である。好気性細菌や通性嫌気性細菌が持つユビキノ (Q-n)、通性嫌気性細菌や偏性嫌気性細菌が持つメナキノ (MK-n (H_x)) に大別される。ここで、n, H_x は、それぞれイソプレノイド側鎖数およびその水素飽和度xを表す¹¹⁾。一般的に、一細菌種は一種類の主要キノンを持つ。細菌が含有するキノンは環境条件によらず不変であることや、キノン含有量は細菌の重量と対応することが知られている¹¹⁾。元来、活性汚泥の細菌群集構造解析に利用されていたが^{11, 12)}、化学分析だけで分析が可能なことや定量性に優れていることから、干潟¹³⁾や内湾¹⁴⁾などの環境試料にも広く用いられている。

b) キノンの分析

クロロホルム・メタノール溶液 (2:1, v/v)、ヘキサンを順次用いて、底質試料からキノンを含む脂溶性成分を抽出した。この抽出液を固相抽出カートリッジ (Sep-Pak® Plus Silica Cartridge, Waters) に吸着させた後、2% (v/v)および10% (v/v)のジエチルエーテル・ヘキサン溶液をそれぞれ通過させて、メナキノおよびユビキノをそれぞれ精製・分離・回収した。この回収液をアセトンで溶媒置換した後、高速液体クロマトグラフィーでメナキノおよびユビキノをそれぞれ定量した。一連の方法は既報^{13, 14)}にしたがった。

c) 非類似度の解析

二試料間のキノン組成の類似性を定量的に評価するために、統計学的な指標の一つである非類似度¹¹⁾を算出した (式(1))。

$$D(i, j) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n |p_{i,k} - p_{j,k}| \quad (1)$$

ここで、 $P_{i,k}$, $P_{j,k}$ は、それぞれ試料*i*, *j*のキノン種*k*の存在比 (モル基準) を表す。*n*は、検出されたキノン種の総数を表す。この非類似度は0から1の範囲をとるが、試料*i*, *j*における各キノン種の存在比の差を累積したものであることから、1に近いほど試料間の類似性が低く、逆に0に近いほど類似性が高いことを意味する。非類似度が0.2以上のとき、二試料間の細菌群集構造は実質的に異なると判断できる¹¹⁾。

d) Shannon-Wiener指標を用いた多様性の評価

底質細菌群集の多様性を評価するために、Shannon-

Wiener指標 H' ¹⁹⁾を算出した(式(2))。一般的に、多様性とは種の豊富さとその均等度を意味するが、この指標は両者が加味されている。

$$H' = -\sum_{k=1}^n (p_k \ln p_k) \quad (2)$$

ここで、 P_k はキノン種 k の存在比(モル基準)、 n は検出されたキノン種の総数を表す。 H' の値が大きいほど多様性が高いことを意味する。

(4) 大腸菌数の測定

糞便汚染の指標として広く利用されている大腸菌(*E. coli*)の数を測定した。2010年8月7日の9時にAPで、10時にSTで採水し、試料を10倍希釈した後、MPN法に基づく市販のキット(Colilert 18/QuantiTray™, IDEXX)¹⁰⁾により測定した。マニュアルにしたがい培養の温度、時間はそれぞれ37℃、18時間とした。

3. 結果と考察

(1) ラグーン海岸の水質汚濁の状況

a) 水質

地点AP, STで測定した多項目水質計の結果を図-2に示す。ここでは、現象を説明するうえで有用であった塩分(Salinity), pH, 酸化還元電位(Eh)の結果のみを表示した。STでは塩分濃度が34.7‰であった。4月6日8時頃に一時的に減少したが、これは降雨によるものである。前述したようにこの地点は、人為的な影響が無視しうると考えられることから、自然の海水の塩分濃度を示して

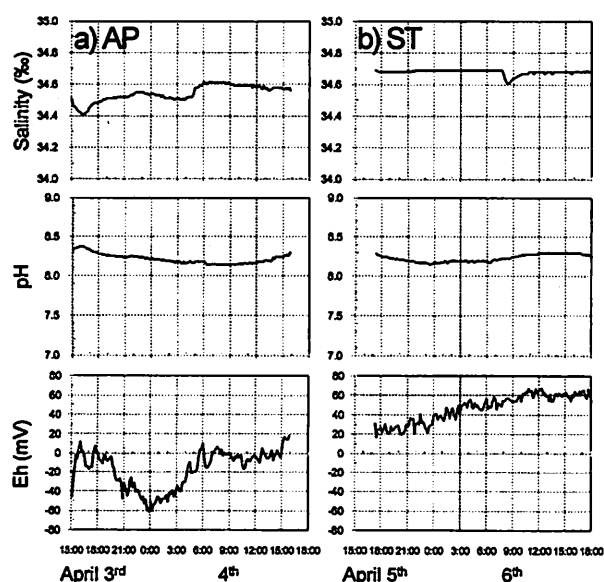


図-2 ラグーン海岸の塩分, pH, 酸化還元電位

いると判断できる。一方、APではこの値よりもやや低い値を示した。この間、降雨は観測されていないことから、海水よりも塩分濃度の低い降雨以外の水が混入したと考えられる。

STの酸化還元電位は終始プラスの値を示していた。しかしながら、APではマイナスの値を示す時間帯があり、驚くべきことに最小値は-61mVに達した。これは、例を挙げると下水処理施設の疑似嫌気槽で測定される値のレベルである。一方、pHはST, APともに夜間に減少し、昼間に上昇する傾向が見られた。したがって、藻類の呼吸や光合成が行われていたと予想される。しかしながら、APの酸化還元電位の最小値は4月4日0時頃に見られたことから、酸化還元電位の変化は藻類の活動に連動しているとは考えにくい。上述した塩分濃度の低い水が混入した可能性とあわせて考えると、酸化還元電位が著しく低下した時間帯に汚水が流入したものと推測される。

b) 底質の細菌群落構造

STの底質のキノン含有量は0.11μmol/kgであったのに対し、APでは0.54μmol/kgであった。つまり、APでは底質中の細菌量がSTよりも約5倍も高かったと解釈できる。明らかに、細菌の炭素源やエネルギー源となる有機物が供給されているものと考えられる。

APとSTのキノン組成を図-3に示した。APの優占キノンはQ-8>Q-10>MK-7, STはMK-6>Q-10>Q-9の順序であった。キノンに基づく細菌の化学分類は、16S rRNAに基づく系統学的な分類と対応することが知られている¹⁷⁾。Q-8を含有する細菌はBetaproteobacteria, MK-6を含有する細菌はLow G+C gram-positive bacteria または Cytophaga/Flavobacterium groupに属する細菌である¹⁷⁾。したがって、それぞれの地点では明らかに異なるグループの細菌が優占していたことになる。MK-7は *Desulfotomaculum*や*Desulfococcus*などの硫酸塩還元細菌が含有するキノン種である¹⁸⁾。APではマイナスの酸化還元

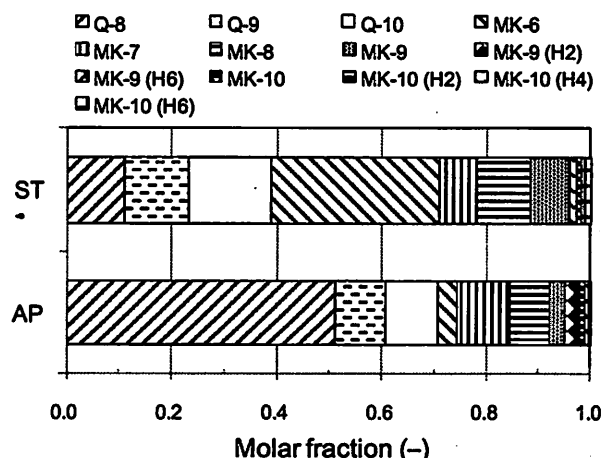


図-3 ラグーン海岸底質のキノン組成

電位が観測されたことや、自然の海岸に比べて約5倍の細菌が生息できるほどの有機物が供給されていた可能性を想定すると、底質に硫酸塩還元細菌が生息していた可能性は十分にある。

APとSTの細菌群集構造の違いを定量的に評価するために、非類似度を算出したところ、0.46と見積もられた。0.2を大きく上回ることから、両者の細菌群構造はまったく異なるといえる¹¹⁾。また、Shannon-Wienerの多様性指標¹²⁾を計算したところ、STは2.0であったのに対し、APでは1.7であった。検出されたキノン種はSTでは11種類、APでは12種類であり、ほとんど違いがないことから、APでは各キノン種の均等度が低いといえる。つまり、Q-8のような特定のキノン種を含有する細菌が多く優占しているため(図-3)、多様性が相対的に低く見積もられた。

多項目水質計や底質のキノン分析の結果から、APには汚水が流入している可能性が大いに考えられ、水質汚濁は慢性化しているものと判断される。

(2) 水質汚濁の機構

a) 汚濁源

一般的に汚濁源は、面源と点源にわけられる。フォンガファレ島の土地利用⁹⁾から判断すると、面源負荷によりラグーン海岸で著しく水質汚濁が起きているとは考えにくい。また、工場や農場はない。フォンガファレ島の人口は4,492人であり、639軒の住居がある⁹⁾。下水処理場のような集合処理施設はないが、424軒は生活雑排水とトイレ排水を受け入れる合併浄化槽を保有しており、地中に埋設されている。ただし、我が国のように送風して好気処理を行うタイプではなく、沈殿処理のみを行っているに過ぎない。残りの163軒はピット式トイレを使用している。つまり、92%の住居は国連ミレニアム開発目標に記載されている改善衛生施設(improved sanitary facilities)を所有していることになり、水質汚濁の原因が見あたらない。そこで、ツバル国政府の公共事業局(Public Works Department)に問い合わせたところ、設置されている合併浄化槽のほとんどは底部が密閉されていない、いわゆるボトムレスであることがわかった。仕様書はオーストラリアから提供されているものであったが、そのとおりには施工されていないということである。

合併浄化槽やピット式トイレから汚水が地中を通じてラグーン海岸に流出しているとする、汚水にはトイレ排水も含まれていることから、海岸の海水からは糞便汚染の指標である*E. coli*が検出されるはずである。STでは検出されなかったが、APでは8,310MPN/100mLであった。したがって、合併浄化槽の汚水がラグーン海岸の汚染源であることが裏付けられた。我が国では生活環境保全の

観点から、海域の大腸菌群数の基準値が設けられている。A類型では1,000MPN/100mL以下である。*E. coli*と大腸菌群の数を直接比較することはできないが、大腸菌群の一部である*E. coli*の数がこれほど高いのは、健康リスクの関連からも懸念がある。

b) 汚水の流出経路

2010年4月に実施した多項目水質計による調査結果をあらためて見直してみると、汚水の流出を捉えるうえで酸化還元電位は有用と考えられる。そこで、2010年8月6日から10日まで4日間にわたり、APで連続観測を実施した(図-4)。8月6日には-42mVに達した時間があったが、周期的な変動を繰り返しながら、次第に上昇していった。観測期間は8月10日の大潮に向かう時期だったため、時間の経過とともに海水交換が促進し、その影響が酸化還元電位の上昇として現れたものと考えられる。酸化還元電位が周期的な変動をするなかで、減少傾向にある時間帯に汚水が流入していたと考えられるが、これは引き潮の時間帯と対応していた。したがって、引き潮のときにボトムレスの合併浄化槽やピット式トイレから汚水が地中を通じてラグーン海岸に流出していると考えられる。

同じプロジェクトチームの井手陽一氏(海洋プランニング株式会社)は、この地点やその周辺で硫化水素臭のする黒色の砂層を発見している。また、この地点と住居の間にある砂浜を約50cm掘ったところ、同様の砂層を

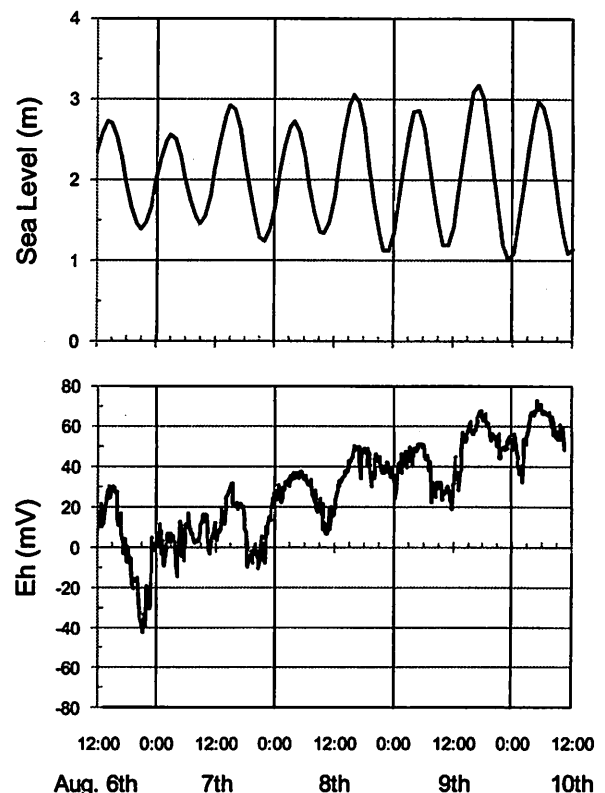


図-4 潮位と酸化還元電位(地点 AP)の変動の関係

見出している。これは硫酸塩還元細菌が含有するMK-7が多く検出された前述の結果と対応するとともに、地中を通じて汚水がラグーン海岸に流出していることを支持する知見である。

4. まとめ

ツバル国フォンガファレ島の高人口密度地域のラグーン海岸では、海水中の酸化還元電位が一時的に-61mVに達するほどの水質汚濁が見られた。底質のキノン分析の結果、自然の海岸の底質よりも約5倍も細菌群の含有量が多いことや、細菌群集構造は実質的に異なるうえに多様性も相対的に低いことがわかり、水質汚濁が慢性化していることが明らかとなった。ラグーン海岸における酸化還元電位の連続観測や糞便汚染指標細菌の測定の結果をもとに、フォンガファレ島の土地利用や合併浄化槽の設置状況を総合的に判断すると、各住居のそばに埋設されているボトムレスの合併浄化槽やピット式トイレに由来する汚水が、引き潮のときに地中を経てラグーン海岸に流出しており、これが主要な水質汚濁の機構であると結論づけられた。

謝辞：本研究は、JST/JICA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学的維持」（研究代表者：東京大学大学院理学系研究科 茅根創教授）の支援を受けた。また、茨城大学における文部科学省平成22年度特別経費「気候変動対応型社会のための適応イノベーション研究—サステナビリティ学と地球変動適応科学の展開」の一環として実施したものである。井手陽一氏（海洋プランニング株式会社）からは、硫化水素臭のする黒色の砂層の情報を得た。また、大川和也氏（平成22年度茨城大学工学部四年）、鈴木準平氏（平成22年度茨城大学大学院理工学研究科博士前期課程二年）には、底質のキノン分析等で協力を得た。ここに記し、深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) Mimura, N., Nurse, L., McLean, R.F., Agard, J., Briguglio, L., Lefale, P., Payet, R., Sem, G.: Small islands. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 687–716, 2007.
- 2) Mimura, N.: Vulnerability of island countries in the South Pacific to sea level rise and climate change, *Climate Research*, 12, 137–143, 1999.
- 3) Yamano, H., Kayanne, H., Yamaguchi, T., Kuwahara, Y., Yokoki, H., Shimazaki, H., Chikamori, M.: Atoll island vulnerability to flooding and inundation revealed by historical reconstructions: Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu, *Global and Planetary Change*, 57, 407–416, 2007.
- 4) Yamano, H., Kayanne, H., Chikamori, M.: An overview of the nature and dynamics of reef islands, *Global Environ. Res.*, 9, 9–20, 2005.
- 5) Secretariat of the Pacific Community: Tuvalu 2002 Population and Housing Census: Volume 1 Analytical Report. Secretariat of the Pacific Community, Noumea, 2005.
- 6) Economic Policy, Planning and Statistics Office: Republic of the Marshall Islands Demographic and Health Survey 2007. SPC and Macro International Inc, Noumea, 2007.
- 7) Richmond, R., Kelly, R., Craig, P., Ennaurois, C., Green, A., Birkeland, C., Davis, G., Edward, A., Golbuu, Y., Gutierrez, J., Houk, P., Idechong, N., Maragos, J., Paulay, G., Starmer, J., Tafleischig, A., Trianni, M., Velde, N.V.: Status of the coral reefs in Micronesia and American Samoa: US affiliated and freely associated islands in the Pacific. In: Wilkinson, C.R. (Ed.), *Status of Coral Reefs of the World: 2002. GCRMN Report*. Australian Institute of Marine Science, Townsville, pp. 217–236, 2002.
- 8) Osawa, Y., Fujita, K., Umezawa, Y., Kayanne, H., Ide, Y., Nagaoka, T., Miyajima, T., Yamano, H.: Human impacts on large benthic foraminifers near a densely populated area of Majuro Atoll, Marshall Islands, *Mar. Pollut. Bull.*, 60, 1279–1287, 2010.
- 9) 山野博哉：グローバル・ローカルな要因による小島嶼国の環境問題，水環境学会誌，33(8)，234–237，2010。
- 10) Fujita, K., Osawa, Y., Kayanne, H., Ide, Y., 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.
- 11) Hiraishi, A., Masamune, K. and Kitamura, H.: Characterization of the bacterial population structure in an anaerobic-aerobic activated sludge system on the basis of respiratory quinone profiles, *Appl. Environ. Microbiol.*, 55(4), 897–901, 1989.
- 12) Furumai, H., Fujita, M., Nakajima, F.: Quinone profile analysis of activated sludge in enhanced biological P removal SBR treating actual sewage, *Advances in Water and Wastewater Treatment Technology*, In: Matsuo, T., Hanaki, K., Takizawa, S., Satoh, H. (Eds.), Elsevier Science, 165–174, 2001.
- 13) Hasanudin, U., Fujita, M., Kunihiro, T., Fujie, K. and Suzuki, T.: The effect of clams (*Tapes philippinarum*) on changes in microbial community structure in tidal flat sediment mesocosm, based on quinone profiles, *Ecol. Eng.*, 22, 185–196, 2004.
- 14) Hasanudin, A., Fujita, M., Koibuchi, Y., Fujie, K.: Dynamic changes in environment condition and microbial community structure in trench and flat seabed sediments of Tokyo Bay, Japan, *Wat. Sci. Technol.*, 52(9), 107–114, 2005.
- 15) Shannon, C.E., Weaver, W.: The mathematical theory of communications. University of Illinois Press, Urbana, pp. 117, 1963.
- 16) Fricker, E.J., Illingworth, K.S., Fricker, C.R.: Use of two formulations of

- Colilert and QuantiTray™ for assessment of the bacteriological quality of water, *Wat. Res.*, 31 (10), 2495–2499, 1997.
- 17) Collins, M.D., Jones, D.: Distribution of isoprenoid quinone structural types in bacteria and their taxonomic implications, *Microbiol. Rev.*, 45 (2), 316–354, 1981.
- 18) Collins, M.D., Widdel, F.: Respiratory quinones of sulfate-reducing and sulfur-reducing bacteria: a systematic investigation, *System. Appl. Microbiol.*, 8 (1–2), 8–18, 1986.

(2011. 4. 11 受付)
(2011. 7. 3 受理)

Water Pollution in Lagoon-side Coast on Funafuti Atoll, Tuvalu Masafumi FUJITA¹, Daisaku SATO¹, Yuji KUWAHARA² and Hiromune YOKOKI¹

¹Dept. of Urban and Civil Engineering, Ibaraki University

²Center for Water Environment Studies, Ibaraki University

In Central Pacific atolls, shells of large benthic foraminifers are the primary components of sand-sized sediments. However, populations of large benthic foraminifers are decreasing due to human impacts such as water pollution, which reduce the rate of sediment supply to reef-islands. This will acceralate the onset of serious problems against the future sea-level rise. Thus, it is urgently required to obtain basic findings for development and implementation of countermeasures against water pollution in the coast. In this study, the current status and mechanism of water pollution are examined in lagoon-side coast on Funafuti atoll, Tuvalu. We demonstrate that the lagoon seawater near densely populated area in Fongafale islet is in chronic water pollution and also elucidate that domestic wastewater originating from bottom-less septic tanks, which are buried in the ground just outside households, and pit toilets seeps into the coast during ebb tides.