農研機構
NARO 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構

トンガ王国ババウ島およびリフカ島における淡水レンズ地下水塩水化の要因と課題

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所 公開日: 2026-07-17 キーワード: 作成者: 石田, 聡, 吉本, 周平, 幸田, 和久, 小林, 勤, 白旗, 克志, 土原, 健雄 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/0002001720

(c) 国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構
National Agriculture and Food Research Organization, Japan

〔農工研技報　217
〕1 ～ 12，2015〕

トンガ王国ババウ島およびリフカ島における淡水レンズ地下水塩水化の要因と課題

石田　聡*　吉本周平*　幸田和久**　小林　勤**　白旗克志*　土原健雄*

*資源循環工学研究領域水資源工学担当
**（独）国際農林水産業研究センター農村開発領域

要　旨

トンガ王国ババウ群島ババウ島およびハアパイ諸島リフカ島において，淡水レンズ地下水中の電気伝導度（EC）測定およびイオン濃度分析を行った。調査の結果，ババウ島においては一部の揚水井戸で150mS/mを超えるECが観測された。リフカ島においては，水道水源施設である暗渠（ギャラリー）および井戸のECは150mS/mを下回っていたが，塩水化によって揚水を停止した施設が存在した。測定結果と既往の記録等により地下水塩水化の要因を分析したところ，ババウ島ではそれまで分散して配置されていた揚水用の井戸が減少し，1箇所あたりの揚水量が増加したことでアップコーニングが発生したと推定された。リフカ島では，ギャラリーの一部が海岸近くに配置されていることでECが高くなっていると推定された。塩水化の抑止のためには，ババウ島においては井戸の分散が，リフカ島についてはギャラリーを淡水域の中心部に再配置することが有効であると考えられた。

キーワード：地下水，淡水レンズ，アップコーニング，塩水化，井戸

Ⅰ　緒　言

島嶼域の地下水は地質条件により，地表から涵養された淡水と，海から侵入する塩水が帯水層内で塩淡境界を形成する。この塩淡境界の深度は，淡水と塩水の密度差と圧力バランスによって決定される。淡水域は島の中央部で厚く，縁辺部で薄くなるレンズ状を呈することから，淡水レンズと呼ばれる形で存在する。このような地域において淡水地下水を利用するには帯水層上部の淡水域に設置した井戸や集水暗渠（ギャラリー）により揚水を行うが，揚水によって周辺の圧力が低下するため，帯水層下部から井戸に向かって塩水が遡上するアップコーニングと呼ばれる現象が発生し，地下水が徐々に塩水化する。この塩水化は通常，揚水を停止し，降雨によって淡水が涵養されれば回復するが，揚水量が過大であった場合にはその後の降雨によっても回復しないことが知られている（Presley, 2005；石田ら，2010など）。地下水の塩水化を許容範囲に収めつつ揚水量を確保することは，水源を地下水に依存する島嶼にとって共通の課題となっている。

Table 1に小島嶼における淡水レンズ地下水を対象とした既往研究例を示す。小島嶼という用語に厳密な定義はないが，例えばユネスコの国際水文学プログラムにおける小島の水文学に関する技術報告書によれば，面積2,000km^{2}以下か幅10km以下の島を「small island」，面積100km^{2}以下か幅3 km以下の島を「very small island」と分類しており，「small islands」にはグアム（面積549km^2），バルバドス（430km^2），ニウエ（259km^2），トンガタプ（257km^2），グランドケイマン（196km^2）などが含まれ，「very small islands」にはバミューダ諸島（50km^2），ナウル（22km^2），ロットネスト島（19km^2）ほか，無数の環礁，堡礁および裾礁島が含まれる（Vacher, 1997a）。しかし島の大きさによる定義は便宜的なもので，Falkland（1991）は非常に限られた地表水および地下水しか存在せず，内陸における水源開発手法や

Table 1　小島嶼における淡水レンズ研究例
Some previous researches of fresh water lens on small islands

対象地	内　容
バルバドス[1)]	地下水かん養量と地域気象との関係解明
トンガタプ（トンガ）[2)]	エルニーニョ・ラニーニャの影響評価
バミューダ[3)]	不均一な透水性による淡水レンズの偏在
ケイマン[4)]	淡水レンズ水収支解析
バミューダ[5)]	揚水による淡水レンズ厚の減少計算
タラワ（キリバス）[6)]	淡水レンズ分布調査とモデル解析
ホーム（ココス）[7)]	井戸群による揚水の解析
ローラ（マーシャル）[8)]	干ばつ時の地下水塩水化

[1)]Jones and Banner (2003), [2)]Velde (2006), [3)]Vacher and Rowe (1977b), [4)]Chidley and Lloyd (1997), [5)]Rowe(1984), [6)]Lloyd et al. (1980), [7)]Ghassemia et al. (1998), [8)]Presley (2005)

水文学的アプローチが適用できない島としている。淡水レンズの賦存形態や，地下水の利用可能量は水文地質条件，降水量，揚水量，土地利用状況等によって変わるため，各島嶼において詳細な調査・解析が必要となる。

本研究では現在淡水レンズ地下水の塩水化が発生しているトンガ王国ババウ群島ババウ島およびハアパイ諸島リフカ島において，現地井戸およびギャラリーにおける地下水中の電気伝導度（EC）測定およびイオン濃度分析を行い，測定結果と既往の記録等より塩水化の要因分析を行うとともに，塩水化の解消に向けた今後の課題について考察した。

Ⅱ　調査地区の概要

2.1　概要

調査地が存するトンガ王国は南太平洋に位置する約170の島群を有する島嶼国で，総面積は約720km^2，人口は約10万人である。首都ヌクアロファの存するトンガタプ島は南緯21°西経175°に位置している（**Fig.1**）。調査地の一つであるリフカ島はトンガタプ島より北北東に約160km，トンガ王国中部に位置するハアパイ群島の主島であり，群島の主都パンガイが存する。面積は約11km^2，人口は約3千人である。もう一つの調査地であるババウ島はトンガタプ島より北北東に約275km，面積約121km^{2}のババウ群島に存する。主都であるネイアフの人口は約6千人である（SDT, 2011）。年間降水量は北部ほど多く，ババウ島では約2,200mmであり，降水量の約2/3は11月から4月の雨期にもたらされる。リフカ島の年間降水量は約1,700mmである（Furness, 1997）。

2.2　水理地質

トンガはインド－オーストラリアプレートの最東縁に位置しており，太平洋プレートの沈み込みによる圧力によって，インド－オーストラリアプレート縁辺部が隆起して形成された弧状列島である（Gatliff, 1990）。ババウ群島，ハアパイ群島，トンガタプ群島を結ぶ一連の島々の火山活動は不活発であるが，これより西部には比較的若く活動的な火山弧（Tofua Arc）が連なる。ババウ群島，ハアパイ群島，トンガタプ群島は主に更新世の珊瑚起源の石灰岩で構成されており，基盤岩は露出していない。石灰岩はTofua Arcを起源とする細粒の火山灰で覆われており，ババウ島での厚さは9 mである（Furness, 1997）。

ババウ島，リフカ島ともに表層に分布する石灰岩は透水性が高く，降水は速やかに地下に浸透し，川や湖などの表流水は殆ど存在しない。このため主要な水源は石灰岩の中に形成される淡水レンズ地下水となっている。本稿では地下水中の塩分濃度に焦点を当てているが，地下水中の炭酸カルシウム濃度も高く，しばしばWHOの基準値である500mg/Lを超えた値が観測されている。代替水源が存在しないことから，地下水質はトンガの切迫した課題となっている（Furness, 1997）。

2.2.1　ババウ島

ババウ島は全体的に南に傾斜しており，北海岸は切り立った海食崖が続いており，南海岸は不規則な溺れ谷を形成している（**Fig.2**）。地質は海食崖の最下位に分布する鮮新世以降の石灰岩，これを覆う珊瑚起源の石灰岩，石灰藻を起源とする石灰岩から成る。これらを火山灰起源の赤褐色土が覆っており，その層厚は10m未満である（Roy, 1990）。

島の基盤は火山岩であると考えられているが露頭して

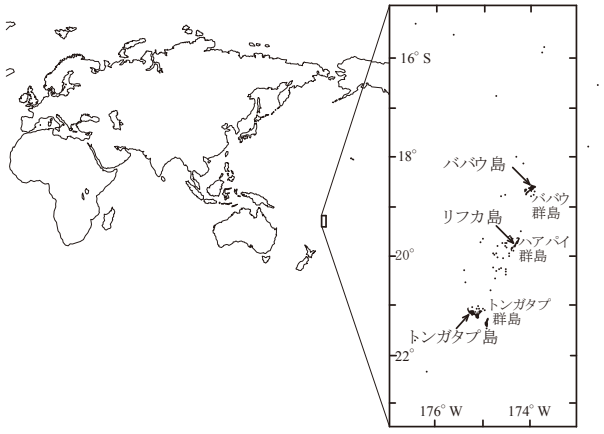


Fig.1　調査地位置図
Location map of study area

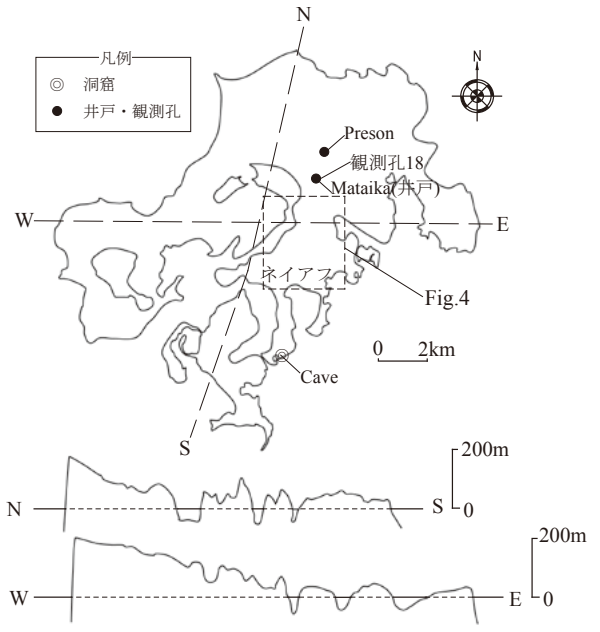


Fig.2　ババウ島平面図・地形断面図（Roy, 1990に加筆）
Map and geographical section of Vava'u Island (retouched to Roy, 1990)

おらず，地下水は島全体に分布している石灰岩を帯水層とした淡水レンズが分布しており，その下位に塩水が分布している。バハウ島の総人口の7割以上が居住しているネイアフでは，井戸によって揚水された地下水を水源とする上水道が整備されている。

2.2.2　リフカ島

リフカ島は低平で，主な構成地質は多孔質な珊瑚起源の隆起石灰岩である。島の標高が比較的高い領域では火山灰が石灰岩を覆い，良好な耕土となっている。層厚は3 m以内である。島の西沿岸ではより新しい時代の未固結な貝殻を含む珊瑚起源の石灰砂が石灰岩を覆っている。ババウ島同様，基盤岩は露出していない。**Fig.3**にリフカ島の地質断面図を示す。帯水層は石灰砂および石灰岩であり，淡水レンズは石灰砂中に存在している（SPC, 2013）。リフカ島の人口の殆どはパンガイに居住しており，井戸やギャラリーによって揚水された地下水を水源とする上水道が整備されている。

Ⅲ　研究方法

3.1　ババウ島

ババウ島においてトンガ上水道公社（Tonga Water Board, 以下TWBと呼ぶ）が管理している揚水井戸および近傍に設けられた地下水観測孔，近傍の洞窟内の地下水（Cave），およびネイアフ市内のホテルの水道水（Hotel）のEC，pH，DO，ORPを現地で測定するとともに，井戸で揚水した地下水を採取し研究室に持ち帰り，溶存イオン濃度を測定した。分析項目は地下水の主要溶存成分であるNa^+，K^+，Ca^{2+}，Mg^{2+}，Cl^-，HCO_3^-，SO_4^{2-}，NO_3^-とした。

Fig.4にババウ島におけるTWB井戸位置図を示す（一部**Fig.2**に掲載）。地下水を採取した井戸のうち，No.10，15，19はネイアフに給水している井戸であり，それ以外（Preson, Mataika, Mangia）は周辺の集落に給水している井戸である。淡水レンズからの揚水は，一般に地下水面直下に直径100mm程度の有孔塩ビ管を水平に埋設したギャラリーを用いる場合が多いが，本地区では井戸が用いられている。これは地表から地下水面までの距離が20m以上あり，ギャラリーの設置が難しいことによると考えられる。井戸の地上部は数十cm～2 m弱四方のコンクリート枠で保護されており，口径の大きな井戸では地下水面付近の口径は孔口より大きい。設置されているポンプはヘリカルローターポンプで，動力源はディーゼルエンジンまたは電気モーターである（Kawai, 2013）。**Fig.4**には井戸の稼働・非稼働の別を示している。非稼働の井戸の幾つかを調査したところ，No.5は道路工事によって井戸が撤去されており，No.6，7，11，12は井戸が閉塞されていた。また観測孔18（**Fig.2**）は直近に井戸がなく，井戸17はポンプが故障していた。

Fig.5にババウ島の地下水観測孔構造図を示す。地下水観測孔はそれぞれの揚水井より数mの位置にあり，観測地点1箇所あたり直径40mm程度の塩ビ管が深度別に設置されている。

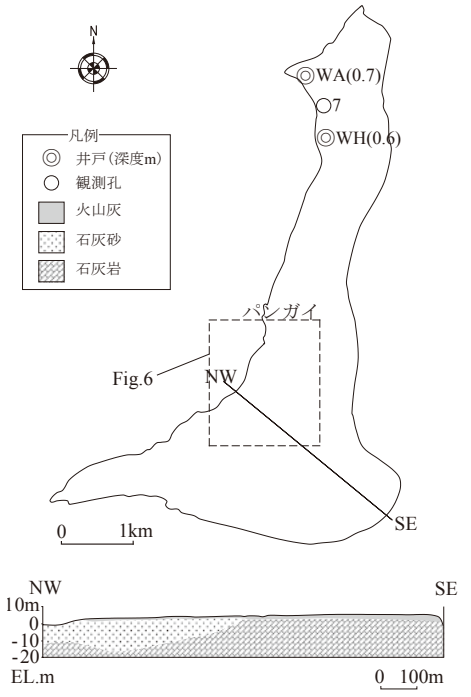


Fig.3　リフカ島平面図・地質断面図（SPC, 2013に加筆）
Map and geological section of Lifuka Island (retouched to SPC, 2013)

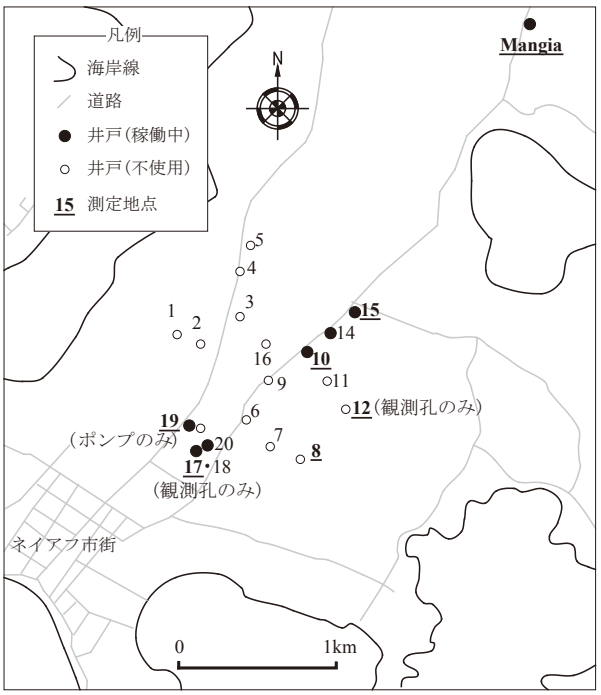


Fig.4　ババウ島井戸位置図（Fry and Falkland,2011に加筆）
Location map of wells on Vava'u (retouched to Fry and Falkland, 2011)

地下水の採取は2014年7月30日に行った。観測孔においては細径の地下水採取器（ベーラー）を用いて孔底付近の地下水を採取し，井戸においてはポンプを稼働させ余水口を開放して採取した。また7月31日にはネイアフ市内のホテル（Puatakanave Hotel）の蛇口から水道水を採取するとともに，海岸沿いの洞窟内の地下水測定を行った。ECおよびpHの現地測定はTOA-DKK社製WM-32EP，DOはHACH社製HQ30d，ORPはTOA-DKK社製RM-30Pでそれぞれ行った。また溶存イオン濃度はイオンクロマトグラフ装置（TOA-DKK 社製ICA2000）で測定した。

3.2　リフカ島

リフカ島においてTWBが管理しているギャラリー，地下水観測孔，農家井戸において，地下水のECを現地で測定するとともに，井戸で揚水した地下水を採取し研究室に持ち帰り，溶存イオン濃度を測定した。測定に使用した機器類はババウ島と同様である。地下水の採取は2014年8月1日に行った。

リフカ島では地下水面の深度がGL.－2～5m程度と比較的小さいため，水道水源の揚水にはギャラリーが用いられている。**Fig.6**にギャラリー，ポンプ，地下水観測孔，農家井戸の位置を示す。ギャラリーはコの字状または直線状で配置されており，末端または屈曲部に集水枡が設けられ，直径約300mmの塩ビ管が立ち上げられている。またリフカ島北部の地下水観測孔1箇所，井戸2箇所の採水も併せて行った（**Fig.3**）。

地下水観測孔は西海岸の海岸線から100～200mの位置に，海岸線に沿って配置されている。地下水観測孔の構造を**Fig.7**に示す。**Fig.7**はココス島に設置された観測孔構造図（Woodroffe and Falkland, 1997）を模しており，地下水位の測定を可能とするために，最上位のガラス濾過器とナイロンチューブを硬質有孔塩ビ管に替えた孔も見られた。地下水は，それぞれの深度に設置されたガ

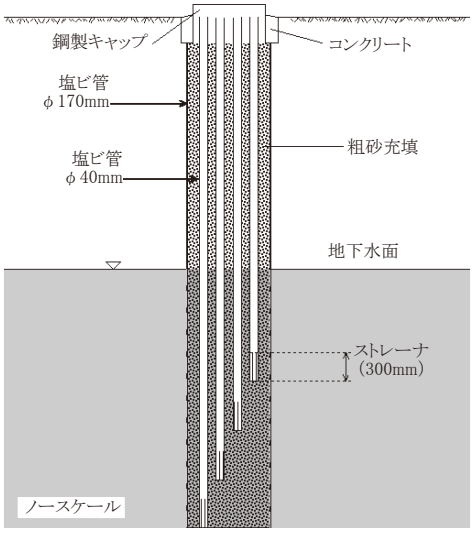


Fig.5　ババウ島地下水観測孔構造図（Fry and Falkland,2011に加筆）
Structure of observation holes (retouched to Fry and Falkland, 2011)

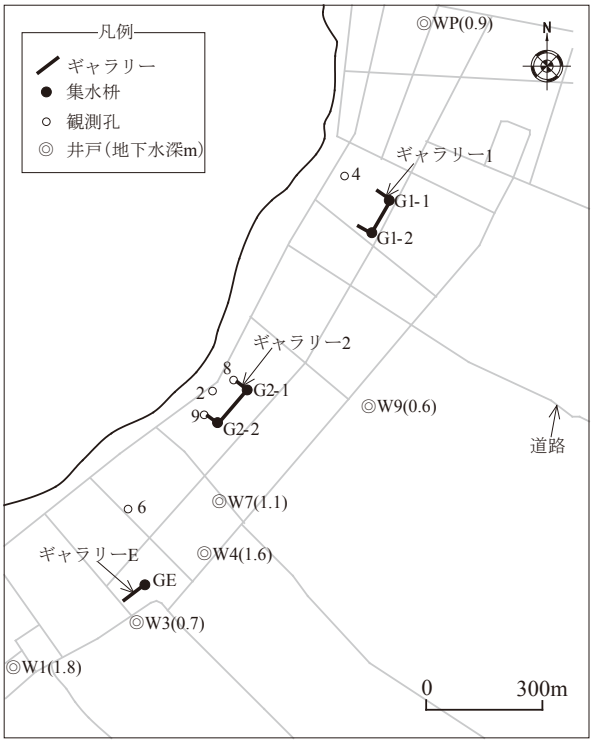


Fig.6　リフカ島観測孔・井戸位置図（SPC, 2014に加筆）
Location map of wells on Lifuka (retouched to SPC, 2014)

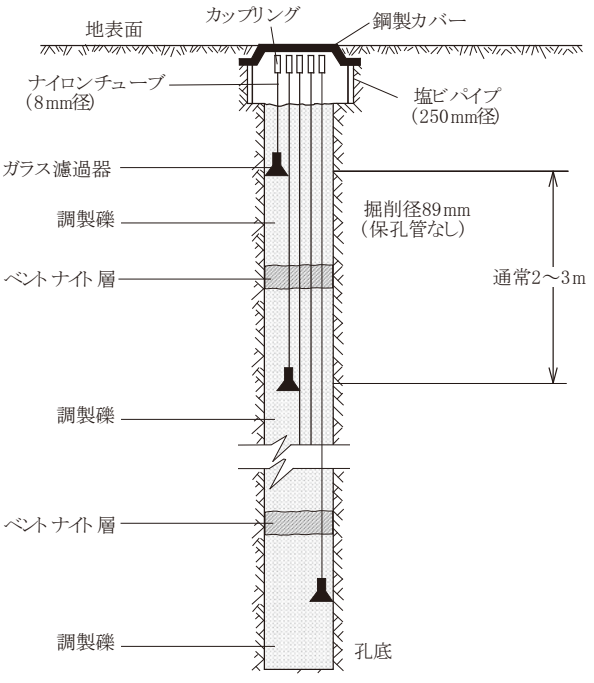


Fig.7　リフカ島地下水観測孔構造図（Woodroffe and Falkland, 1997）
Structure of observation holes

ラス濾過機に接続されているチューブにバッテリー駆動の真空ポンプを接続し，3分間揚水を続けた後に採取した。揚水量は測定地点によって異なるが，概ね 2 L/min であった。また，ポンプの吸引のみでは採水出来ない場合は，チューブ内に呼び水を充填した後吸引し，ECが変動しなくなるまで待ってから採水した。

農家井戸は地表から地下水面下1 m程度まで掘り込まれ，孔口をブロックやコンクリートで保護した構造となっている。口径は数十cmから1 m以上のものまで様々である。採水は地下水採取器を用いた。

Ⅳ　測定結果

4.1　ババウ島

Table 2にババウ島の井戸，洞窟水，上水のEC測定結果を示す。

ネイアフに給水している井戸水のECは121～219 mS/mであった。トンガ国では淡水の基準をEC150 mS/m以下としており（Fry and Falkland, 2011），これに当てはめると3井のうち2井のECが超過していた。上水のECは219mS/mであった。集落井戸のECは3箇所とも100mS/m未満であった。海岸に隣接している洞窟内のECは1,650mS/mと海水の1/3程度であった。

Fig. 8に観測孔における深度別EC分布およびEC150mS/mに対応した深度を示す。

全ての観測地点において淡水域は存在したが，その厚さは様々であった。No.17のECは全体的に低く，地下水面下13.2mにおいても11.3mS/mであった。また，No.18では最も深い孔（地下水深13.2m）においてもECの上昇が観測されず，淡水域の厚さを把握することはできなかった。これに対してNo.8, 10, 12, 15においては最も深い観測孔の値が2,000mS/mを超える比較的高いECが観測されており，ECが深度に応じて増加する領域の存在が確認された。

Table 3にババウ島の井戸・観測孔の地下水，洞窟水，上水の溶存イオン濃度を示す。

Table 2　ババウ島のEC等測定結果（井戸，洞窟，上水）
Results of EC measurement in Vava'u (well, cave, drinking water)

地点名	EC (mS/m)	水温 (℃)	pH	DO (mg/L)	ORP (mV)
10	160	25.6	7.33	7.59	111
15	121	25.7	7.25	7.49	63
19	219	25.0	6.78	7.55	61
Preson	59.8	25.6	6.94	−	104
Mataika	88.2	24.3	7.16	8.12	160
Mangia	92.3	24.0	7.28	7.14	191
Cave	1650	24.3	−	−	−
Hotel	219	24.4	7.07	6.99	524

*水温はpH計で測定　**地下水は孔底付近で採取

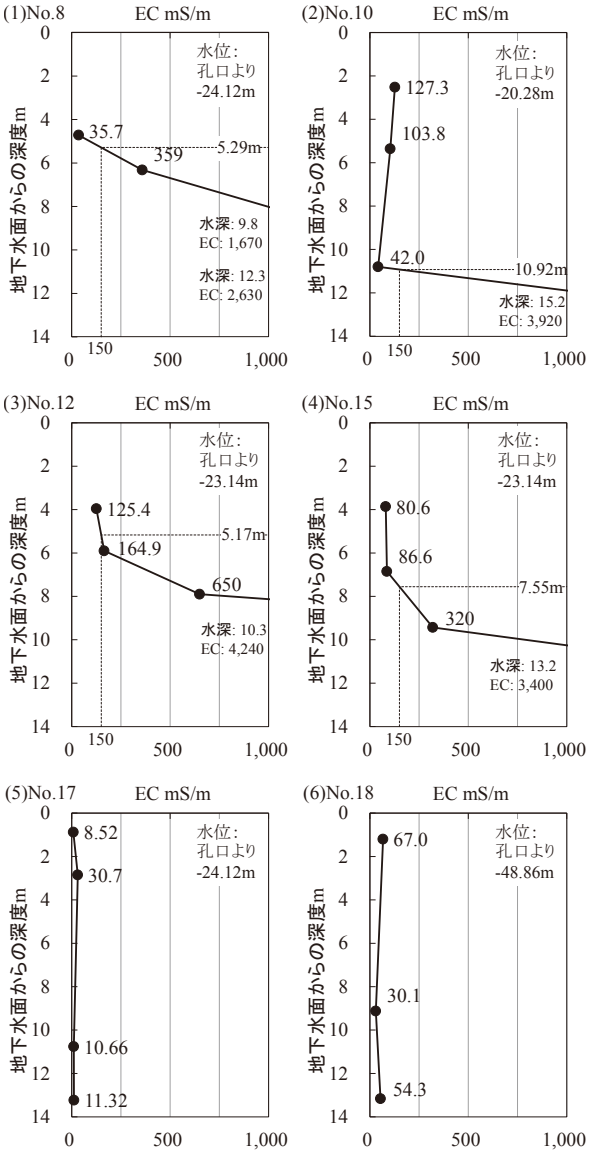


Fig.8　ババウ島における観測孔内のEC分布
Distribution of EC in observation hole in Vava'u Island

Table 3　ババウ島のイオン濃度測定結果
Concentration of dissolved ion observed in Vava'u

地点名	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
No.8	42.3	1.7	24.4	2.2	33.8	131	5.33	11.1
No.10	117	2.7	109	14.2	201	344	32.3	2.69
No.10P	168	4.1	123	18.9	299	357	35.9	nd
No.12	151	3.8	118	18.6	267	344	39.2	nd
No.15	41.4	0.7	118	5.9	69.7	344	11.8	2.26
No.15P	107	2.9	118	13.0	179	348	24.7	nd
No.17	3.16	1.5	5.14	0.50	8.06	0.0	3.33	16.2
No.18	32.1	6.0	82.6	6.3	69.2	159	13.9	73.5
No.19P	271	6.3	132	30.6	476	363	57.3	nd
Preson	12.8	0.5	108	3.2	13.8	335	12.3	11.3
Mataika	65.7	2.0	118	8.8	116	327	15.7	nd
Mangia	63.0	1.3	111	8.7	118	338	15.9	2.47
Cave	2930	117	157	323	5290	223	660	nd
Hotel	317	7.8	155	36.3	561	352	60.0	5.78

単位mg/L，Pは井戸水を示す
観測孔ではFig.8に示す最浅の孔より採水

全体的にHCO_3^-とCa^{2+}が卓越している石灰岩帯水層特有の水質であり，ECが比較的高い箇所ではNa^+とCl^-濃度が高い。No.17は全体的に濃度が低く，HCO_3^-が含まれない。また，No.17には蓋が設けられておらず，雨水浸透防止措置も施されていなかったので，雨水が孔内に混入している可能性が高い。このためNo.17の観測結果は考察外とする。

4.2　リフカ島

Table 4にリフカ島の井戸およびギャラリーのEC測定結果を示す。

地下水位はGL－2.05～－4.67mであった。リフカ島に3箇所設置されているギャラリーのECは112～176mS/mであり，1箇所（G1－2）で150mS/mを超過していた。パンガイ以南の井戸のECは69.6～130mS/mであり，150mS/mを超過している井戸はなかった。これに対してリフカ島北部のWAおよびWHのECはそれぞれ318mS/m, 702mS/mと比較的高い値を示した。

Fig. 9に観測孔における深度別EC分布およびEC150mS/m，250mS/mに対応した深度を示す。

測定した地下水観測孔6孔のうち，保孔管が立ち上げてあり地下水位計を挿入できる構造であったものはNo.7およびNo.9のみであった。No.2, 4, 6, 8では地下水位を測定できなかったので，No.9との水位差が掘削時の記録（Turner, 1998）と同じであると仮定して水深を求めた。

ギャラリー1海側に位置するNo.4では最も浅い測定箇所（水深1.5m）においてもECが444mS/mと高く，EC150mS/m以下の領域は確認出来なかった。ギャラリー2海側に位置するNo.2, 8, 9の中では，やや海に近いNo.2のECが全域で1,000mS/m以上と高かった。ギャラリー2南西端近傍のNo.9ではEC150mS/m以下の領域が確認でき，その厚さは1.96mであった。ギャラリー2北西端近傍のNo.8では水深4m弱でのECが300mS/m前後であったが，より浅い2孔は地下水を吸引できず，データが得られなかった。しかし，水深3.8mでのECが357mS/mと比較的低い値を示していたので，浅層には150mS/m以下の地下水が存在する可能性は高いと考えられる。No.6はこれらの観測孔より海から離れており，水深6m付近までECが200mS/m前後であった。リフカ島北部のNo.7については水深1.1mでECが603mS/mと，パンガイ周辺の観測孔より高い値を示し，EC150mS/m以下の領域は確認出来なかった。

Table 5にリフカ島のギャラリー，井戸，観測孔における地下水中の溶存イオン濃度を示す。

全体的にHCO_3^-とCa^{2+}が卓越しており，ECが比較的高い箇所ではNa^+とCl^-の濃度が高いのはババウ島と同様であるが，ババウ島と比べてMg^{2+}の濃度が比較的高い。またNO_3^-の濃度が比較的高い箇所が散見された。

Table 4　リフカ島のEC等測定結果（井戸，ギャラリー）
Results of EC measurement in Lifuka (well, Gallary)

地点名	水位（GL.m）	EC（mS/m）	水温（℃）	pH	DO（mg/L）	ORP（mV）
G1-1	－2.62	137	25.7	7.28	5.21	129
G1-2	－2.96	176	26.3	7.48	3.96	166
G2-1	－2.80	112	26.5	7.31	4.14	130
G2-2	－2.30	131	26.2	7.33	4.29	156
GE	－3.61	146	27.0	8.15	6.43	86
WA	－2.05	318	26.3	7.22	2.29	21
WH	－3.00	702	25.5	7.34	5.20	94
WP	－2.46	104	22.1	7.56	1.49	75
W9	－3.50	83.1	24.8	7.54	4.98	47
W7	－2.50	69.6	23.8	7.61	2.81	103
W4	－2.16	130	25.9	7.38	4.84	80
W3	－4.67	114	24.6	7.80	6.65	86
W1	－4.15	97.4	24.0	7.68	4.04	97

＊水温はpH計で測定

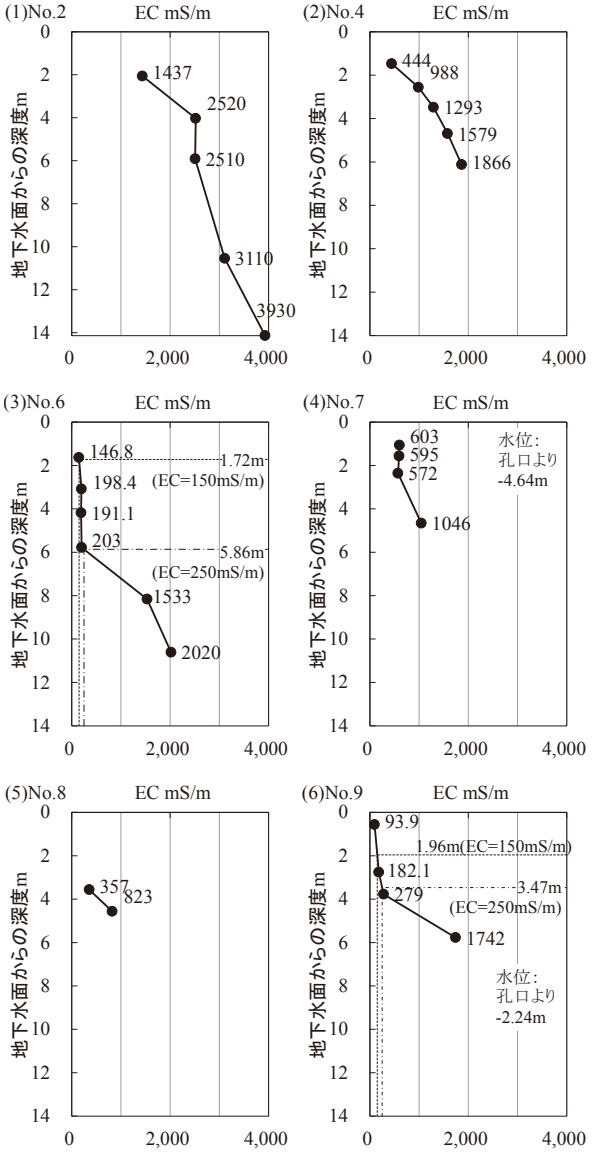


Fig.9　リフカ島における観測孔内のEC分布
Distribution of EC in observation hole in Lifuka Island

Table 5　リフカ島のイオン濃度測定結果
Concentration of dissolved ion observed in Lifuka

地点名	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
G2-1	65.7	18.9	106	27.8	152	346	26.6	34.6
G2-2	87.3	24.6	117	34.9	189	373	33.4	45.5
G1-1	113	12.7	84.7	34.9	247	324	39.3	24.1
G1-2	187	15.0	90.6	46.9	366	328	58.1	21.8
GE	119	15.9	78.3	46.8	258	276	32.8	49.5
WA	355	7.1	146	81.8	769	352	72.3	nd
WP	69.0	12.4	96.3	23.9	195	275	7.06	nd
W9	45.4	5.3	60.1	43.9	70.6	371	14.6	nd
W7	36.1	5.2	70.0	23.0	75.4	255	11.0	13.9
W4	106	26.5	74.6	38.2	203	317	38.4	44.7
W3	102	8.3	51.9	42.4	208	256	34.5	16.1
W1	41.4	12.2	88.2	39.4	81.8	222	16.3	206
No.2								
（2.1m）	8010	119	141	321	13900	275	634	nd
No.4								
（1.5m）	620	21.5	104	88.4	1180	275	153	14.9
（2.6m）	1510	44.6	93.9	175	2670	269	400	6.56
（3.5m）	3140	10.7	114	269	5560	259	551	nd
（4.7m）	4600	13.6	123	351	7780	258	721	nd
（6.1m）	4780	15.0	130	384	8130	237	866	nd
No.6								
（1.6m）	122	28.8	82.0	53.7	241	347	73.1	10.3
No.7								
（1.1m）	1080	39.8	152	120	1880	380	221	nd
No.8								
（3.6m）	437	8.4	43.5	115	714	300	365	nd
No.9								
（0.6m）	36.7	14.2	104	21.0	82.6	382	15.2	35.6
（3.8m）	369	58.0	41.9	80.9	529	370	171	nd

単位mg/L，観測孔の（　）内の数字は地下水面からの深度

Ⅴ　考　察

5.1　ババウ島

5.1.1　地下水塩水化の要因

Table 2よりネイアフに給水している井戸のECは121～219mS/mであり，3井の平均は167mS/mである。水道水（Hotel）はこれより高いが，殺菌のための塩素が付加されているのがその一因であると考えられる。

ババウ島では1970年代にTWBによって5箇所の掘り込み井戸が設けられ，上水道の給水が始まった。井戸の位置は**Fig.4**のNo.17を含む近傍の4箇所と，No.5付近である。その後，1990年代後半にオーストラリアの援助によってネイアフに給水するための15箇所の管井・ポンプ，8箇所の観測孔が整備された。**Fig.4**に示すNo.1～15の井戸群はこのとき整備されたものである。その結果，それまで200～300mS/mであった上水道水源のECが，2001年には100mS/m程度まで低下した（Fry and Falkland, 2011）。**Fig.10**に1995年から2001年までの上水道水源（全タンクの平均値）のECの変動と今回の測定結果を示す。2007年以降の観測データは少ないので直線補間せず，×で示した。また2010年に300mS/mを超える値が観測されているが，これは揚水井戸のうちの1本が顕著に塩水化したことによるもので，この井戸は現在稼働していない（Fry and Falkland, 2011）。

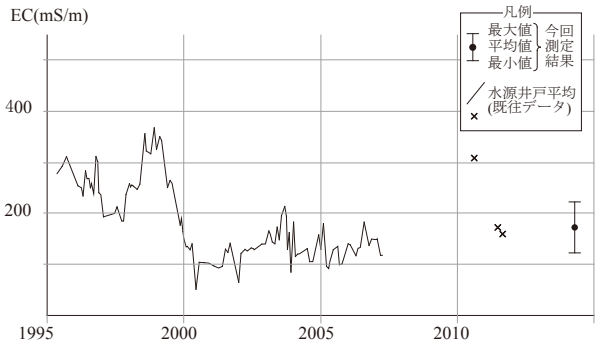


Fig.10　ババウ島における上水道水源のEC変化（Fry and Falkland（2011）に加筆）
Fluctuation of EC of groundwater resources in Vava'u Island (retouched to Fry and Falkland (2011))

2000年以降ポンプの故障や井戸の閉塞等により，次第に稼働する井戸の数が減少した（Fry and Falkland, 2011）。2000年以降ECが漸増傾向にあるのはこのことが原因と考えられる。今回の調査結果は2000年以降のEC漸増の延長線上にある。調査時に稼働していた井戸は4～5箇所であった。他方，ネイアフにおける2011年度の給水量は$1.7 \times 10^5 m^3$であるが，海外移住や出稼ぎ等によって人口が若干減少していることに伴って近年の給水量は横ばい傾向である（Fry and Falkland, 2011）。これらを勘案すると，近年のババウ島では，井戸数の減少によって1井あたりの揚水量が増加していると考えられる。

揚水量とアップコーニングの関係は，一般に揚水量が大きいほど水位低下が大きくなり，アップコーニングが顕著になるとされている。Fry and Falkland（2011）はババウ島の揚水井戸について，揚水量と水位降下量についての記録を残している。**Table 6**にFry and Falkland（2011）によるNo.17, 19井戸の揚水量と水位低下の関係を示す。No.17では，揚水量と水位降下量がほぼ比例している。このことから，1井あたりの揚水量が大きくなれば，アップコーニングによる塩水化が進むと考えられる。

以上より，1999年から2001年にかけてECが低下した理由は，取水地点を分散させた結果，1箇所からの揚水量が低下し，塩水のアップコーニングが緩和されたことであり，近年のEC上昇の原因は，稼働井戸数の減少による1井あたりの揚水量の増加であると考えられる。

5.1.2　淡水域の分布と透水性の不均一性

Fig.8より，観測孔におけるEC150mS/m深度を比較すると，東海岸に近いNo.8, 12においては，近傍で揚水を行っていないにも関わらず，深度5m程度である。これ

に対して，井戸群中央部のNo.10, 15のEC150mS/m深度はそれぞれ10.9m，7.6mであり，淡水域は比較的厚い。このことは，井戸群の東海岸寄りでは揚水によるアップコーニングが，井戸群中央部より発生しやすくなることを示している。

Table 2に示すように，北部の井戸Preson, Mataika, Mangiaはいずれも ECがネイアフに給水する井戸群より低い。また，観測孔No.18においては地下水面下13mまでECが低い（**Fig.8**(**6**)）。さらに，ネイアフに給水する井戸3井についても，北に位置する井戸ほどECが低い。これらの観測結果は，ババウ島北部に厚い淡水域が存在することを示している。

Table 6でNo.17の揚水量3.27L/sに対する水位降下量と，No.19の揚水量3.20L/sに対する水位降下量を比較すると，揚水量はほぼ同じであるにも関わらず，水位降下量には2倍の差がある。これはそれぞれの井戸周辺の帯水層の透水性が異なることを示している。比較的近傍に位置しているNo.17とNo.19との間にこれだけの差があるということは，井戸配置にあたって，帯水層の透水性の不均一性は無視することはできないことを示している。今回の調査でTWBより聞き取った2014年7月21日における井戸毎の揚水量は，No.10, 14, 15, 17, 18, 19でそれぞれ2.8，1.4，1.0，2.3，6.7，2.0L/sであり，各井戸の揚水量の違いは不均一な透水性に起因していると考えられる。

5.1.3　塩水化抑止策と課題

5.1.1に示した塩水化の進行を抑止するには，1箇所あたりの揚水量を抑えることが肝要である。そのためには井戸数を増やし，互いの井戸が干渉しないように井戸配置を分散させることが有効である。

井戸の配置は淡水域が厚い北部ほど低いECが期待出来る。また，淡水域が比較的薄い東海岸に近い領域への配備は避けるべきである。

透水性の不均一性については注意が必要である。淡水域が厚くても，透水性が小さい箇所に井戸を設置する場，水位降下量が大きくなり，それに応じてアップコーニングも発生するので，井戸配置計画の策定にあたって，予定地の透水性を把握し，透水性の高い箇所に井戸を配置する必要がある。森ら（1997）は沖縄県宮古島の地下ダム貯留域において，粘土流入に起因する石灰岩帯水層の透水性の不均一性を明らかにし，透水性の把握にはφ100mmの小口径井戸を用いた揚水試験が有効であることを示している。本地区においては不飽和帯が20m以上あり，1井あたりの掘削費が大きくなるので，事前の透水性の調査は重要である。

アップコーニングを起こしにくい揚水方法という観点では，リフカ島のようにギャラリーを設置することは有効であるが，不飽和帯が厚いことから，施工に関する技術的な問題や，費用対効果の面から難しいと考えられる。

全体としてババウ島においては，北部の淡水レンズは比較的厚く，揚水井戸も少ないことから，島全体の潜在的な地下水利用可能量は需要を賄うのに十分であると考えられる。また，No.18など一部の地点で比較的高いNO_3^-濃度が観測されていることから，井戸の配置計画の策定にあたっては水質調査も必要と考えられる。

Table 6　井戸の揚水量と水位降下の関係（Fry and Falkland, 2011）
Relationship between pumping ratio and drawdown in wells (Fry and Falkland, 2011)

井戸		No.17		No.19
揚水量（L/s）	3.27	6.78	10.1	3.20
水位降下（cm）	55	100	130	110

5.2　リフカ島

5.2.1　地下水塩水化の要因

Table 4に示すとおり，3箇所のギャラリーにおけるECは112～176mS/mであった。またパンガイ以南の井戸のECは全て150mS/m以下であった。これらのうち，現在水道水源として使われている施設はギャラリー2および井戸W4である。TWBより聞き取った2014年7月23日における揚水量は，ギャラリー2で3.0L/s，W4で0.5L/sであり，測定したECを揚水量で按分して平均ECを求めると122mS/mであった。

リフカ島では1990年代まで井戸による地下水の取水が行われてきたが，1999年にギャラリーが設置された。**Fig.11**にギャラリー設置前後の上水道水源（全タンクの平均値）のECの変動と今回の測定結果を示す。

水道水源のECはギャラリーを設置した1999年以降，顕著に下降し，その後2003年まで150mS/m前後を推移した。今回測定した値も2000年から2003年までと同じレベルであった。一方で，設置当初使用されていたギャラリーEおよびギャラリー1は，現在使用されておらず，TBAの聞き取りによると，ギャラリー2も揚水量を減少させて運転しているとのことであった。

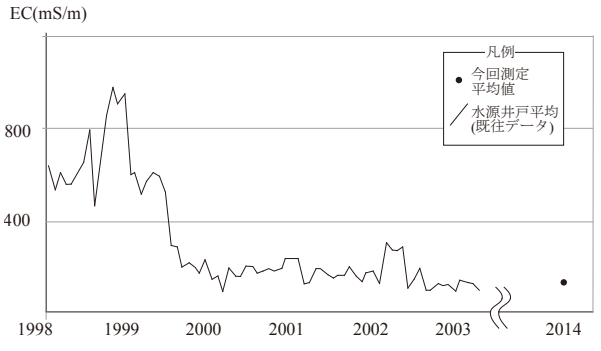


Fig.11　リフカ島における上水道水源のEC変化（TWB（2003）に加筆）
Fluctuation of EC of groundwater resources in Lifuka Island (retouched to TWB (2003))

Fig.11 からはECが比較的低いレベルで安定しているように見えるが，実際はECが上昇した取水施設を順次廃棄しており，塩水化が進んでいると考えられる。

Fig.9（**1**），（**5**），（**6**）より，ギャラリー2末端の観測孔No.8, 9に比べ，若干西海岸に近いNo.2のECが大幅に高かったことから，西海岸付近では塩淡境界深度が海岸線に近づくにつれて急激に浅くなっていると推定される。このため取水施設は西海岸線から離して設置することが有効であるが，ギャラリー1，ギャラリー2とも，西海岸に向かってコの字型に設置されている。TWB職員への聞き取りでは，用地上の制約のためこの形状としたとのことであるが，ギャラリー先端部を西海岸に近づけることは塩水化抑止という観点からは明らかに不利であり，ギャラリー西側から比較的ECが高い地下水が流入していると考えられる。

リフカ島における淡水レンズ地下水の塩水化はギャラリーの配置が原因の一つである可能性がある。

5.2.2　淡水域の分布

本地区は，地表から地下水面までの距離が3m前後と短いことから，観測孔の設置も比較的容易であり，電気探査や電磁探査等の物理探査による淡水レンズ形状の調査は比較的行い易いと考えられる。実際，SPC（2014）がループ・ループ法の電磁探査により，淡水厚分布を推定している。**Fig.12** にSPC（2014）が推定した淡水厚分布図を示す。

SPC（2014）では淡水のECを250mS/m以下としていることから，比較のために **Fig.9** ではEC250mS/mに対応する深度も示してある。Fig.12によると淡水レンズの中心部は観測孔No.6とギャラリーEの間に位置している。今回の測定結果と **Fig.12** を比較すると，観測孔No.6ではEC250mS/m以下の厚さが5.86mであり，3～6mとする **Fig.12** と整合的であった。観測孔No.9においてはEC250mS/m以下の厚さが3.47mであり，3m以下とする **Fig.12** とは若干異なっていた。SPC（2014）が用いた電磁探査機（カナダgeonics社製EM-34）は塩分濃度が海水の1/3（EC1,500mS/m）程度の領域に対する感度が高く（McNeill, 1980），より濃度が低い領域の厚さを直接測定することができない。このため，**Fig.12** と実際の淡水レンズ形状にはある程度違いがあると考えられるが，今回の測定で最も淡水が厚かった観測孔はNo.6であり，島の形状と石灰砂の分布から，淡水レンズは島の延長方向と平行な紡錘形であると考えられるので，この付近に比較的厚い淡水が存在している可能性は高い。

5.2.3　塩水化抑止策と課題

5.2.1に示した塩水化を抑止するためには，一般的にギャラリーをより淡水域が厚い箇所に設置することが効果的である。そのためには淡水レンズの形状を子細に把握する必要がある。**Fig.12** に示したSPC（2014）の調査は，現在ギャラリーが設置されている箇所より淡水レンズが厚い領域が存在する可能性を示していると考えられ，今後はより精度の高い電気探査等の手法や，新たな観測孔の掘削を組み合わせ，ギャラリーの配置計画を策定することが肝要である。

また基本的にギャラリーは島の延長（北北東-南南西）方向に，線状に配置するのが有利と考えられる。これは5.2.1で述べたようにECが比較的高い領域からの揚水を防ぐとともに，ギャラリーに屈曲部を設けると，屈曲部周辺の単位面積あたりの揚水量が増加し，アップコーニングを引き起こしやすくなるからである。

本地区においては淡水レンズは石灰砂中に存在しており，その分布は限定的であると考えられる。そのため，降雨によって回復可能な量以上に地下水を取水してしまうと，淡水レンズが縮小を続け，最終的には取水可能な淡水域が存在しなくなると考えられる。このため，モデルによってギャラリーの再配置の効果を検討するとともに，淡水地下水を持続的に利用出来る揚水可能量を求める必要がある。モデル化には各種パラメータが必要となるため，揚水試験や潮位変動解析などの帯水層の水理定数を求めるための調査も必要となろう。

リフカ島においては居住区が淡水レンズ分布域と重なっているため，水質についても注意が必要である。**Table 5** に示すとおり，今回の調査では硝酸濃度が比較

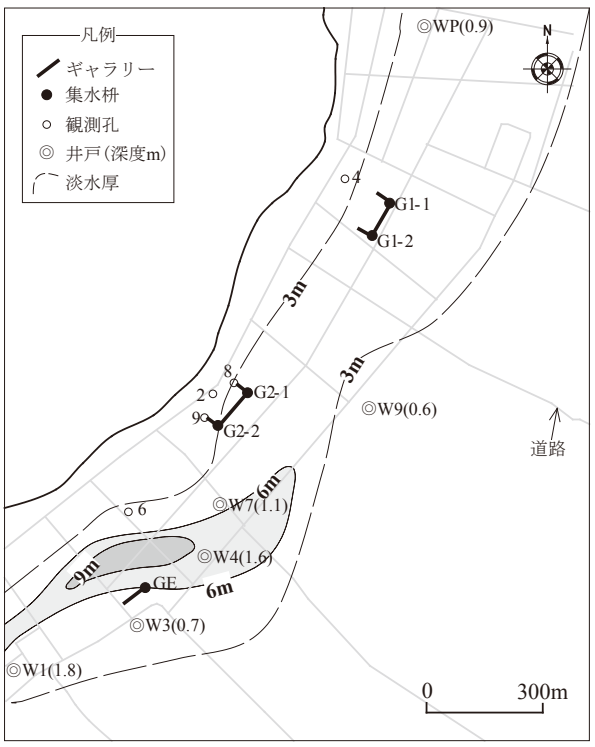


Fig.12　リフカ島における淡水レンズ等層厚線推定図（SPC（2014）に加筆）

Distribution map of thickness of freshwater in Lifuka Island (retouched to SPC(2014))

的高い箇所が見られた。負荷源についての情報が得られていないので，今後の課題であるが，島全体で放し飼いにされている豚が影響している可能性がある。

今回の調査では**Fig.7**に示すガラス濾過器を埋設した地下水観測孔からの採水を行った。このタイプの観測孔は小さい掘削口径で，多深度の地下水を観測出来る手法として有効であるが，現地では真空ポンプで吸引することが困難で呼び水を行うなど，1箇所の採水に時間を要することがあった。また，地下水位を測定することが出来ず，自記記録装置を設置することもできない。**Fig.5**のような深度別に塩ビ管を立ち上げる形式であれば，より多くの情報を得ることができる。今後観測孔を新設する場合は，これらの点に留意するべきである。

リフカ島においては島全体に存在する淡水量が非常に限られており，かつ塩水化が進行していると考えられるので，今後の詳細な調査・解析が必要である。

Ⅵ　結　言

本研究では，トンガ王国ババウ群島ババウ島およびハアパイ諸島リフカ島において，淡水レンズ地下水の塩水化の現況調査として，地下水中のECおよび水質測定を行い，塩水化の要因分析を行うとともに，塩水化の解消に向けた今後の課題について考察した。結果については以下の通りである。

（1）ババウ島では南部に位置するネイアフの水源井戸3箇所のうち2箇所でECが150mS/mを超えていた。北部に位置する水源井戸や観測孔のECは100mS/m未満と低い値を示した。地下水の塩水化は南部で起こっており，その原因は稼働井戸数の減少による1井あたりの揚水量の増加であると推定された。

（2）リフカ島では上水道の取水源のECは150mS/m以下であったが，塩水化によって揚水を停止している施設が存在した。また西海岸に近い観測孔のECが高い傾向にあり，東西方向に設置されたギャラリーの西端からECが比較的高い地下水が揚水されている可能性があった。

（3）塩水化の解消のため，ババウ島では揚水井戸の分散が有効であり，そのためには塩淡境界の深度分布を把握することが必要である。リフカ島ではギャラリーを淡水域の中心部に再配置することが有効であるが，新たなギャラリー設置位置を決定するため，淡水レンズ形状の詳細な調査と揚水解析が今後の課題となる。

謝辞：本研究の一部は，独立行政法人国際協力機構（JICA）短期専門家（トンガ離島部地下水資源状況確認予備調査）として実施した。調査にあたっては，JICA東南アジア・大洋州部東南アジア第六・大洋州課堀越調査役（当時），トンガ支所木川支所長，石黒企画調査員，トンガ水公社他現地行政部局のスタッフにご協力頂いた。関係各位に感謝の意を表する。

引用文献

Chidley R.E. Thomas, Lloyd W. John (1997): G A Mathematical Model Study of Fresh-Water Lenses, *Groundwater*, **15**(3), 215-222

Falkland, A. (1991): Hydrology and Water Resources of Small Islands: A Practical Guide., Intersectoral Platform on Small Island Developing States, UNESCO, 1

Fry Nicola and Falkland Tony (2011): Neiafu Groundwater Resources Assessment and Sustainable Management Report, GEF-IWRM Demonstration Project Neiafu, Vava'u Tonga, 19-27

Furness J. Lindsay (1997): Hydrogeology of Carbonate Islands of the Kingdom of Tonga. In: Vacher, H.L., Quinn, T. (Eds.), Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands, Elsevier, 565-576

Gatliff, R.W. (1990): The Petroleum Prospects in the Kingdom of Tonga. South Pacific Appl. Geosci. Comm., Aust. Int. Develop. Assist. Bur., 20

Ghassemia F., Molsonb J.W., Falklandc A. and Alamc K. (1998): Three-dimensional simulation of the Home Island freshwater lens: preliminary results, *Environmental Modelling and Software*, **14**(2-3), 181-190

Kawai Hidetoshi (2013): Report on Vava'u Water System, JICA Senior Volunteer Mr. Kawai Trip Report to Outer-island, 1-3

石田　聡，吉本周平，小林　勤，幸田和久，土原健雄，万福裕造（2010）：マーシャル諸島共和国マジュロ環礁における地下水の塩水化について，地盤工学会誌，**58**（5），1-4

Jones, I.C., and J.L. Banner (2003): Hydrogeologic and climatic influences on spatial and interannual variation of recharge to a tropical karst island aquifer, *Water Resour. Res*., **39**(9), SBH5.1-SBH5.10

Lloyd J.W., J.C. Miles, G.R. Chessman, S.F. Bugg (1980): A Ground Water Resources Study of a Pacific Ocean Atoll - Tarawa, Gilbart Islands, *Water Resource Bulletin*, **16**(4), 581-783

McNeill, J.D. (1980): Electromagnetic Terrain Conductivity Measurement at Low Induction Numbers, Geonics Limited Technical Note, TN-6, 5-15

森　一司，浅野将人，窪田正和，菅原利夫，白川俊明，桑原英紀（1997）：宮古島砂川地下ダム流域に分布する琉球石灰岩の水文地質学的検討，地質学雑誌，**103**（5），463-474

Presley K.T. (2005): Effects of the 1998 Drought on the Freshwater Lens in the Laura Area, Majuro Atoll, Republic of the Marshall Islands, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5098, 1-40

Rowe Mark (1984): The freshwater "Central Lens" of Bermuda, *Journal of Hydrol*., **73**(1-2), 165-176.

Roy S. Peter (1990): The Morphology and Surface Geology of the Islands of Tongatapu and Vava'u, Kingdom of Tonga, *CCOP/SOPAC Technical Report* **62**, 27-46

Secretariat of the Pacific Community (SPC) (2013): Assessing Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise Lifuka Island, Ha'apai, Tonga, Rising Oceans, Changing Lives Final Report, 21-22

Secretariat of the Pacific Community (SPC) (2014): Assessing Vulnerability and Adaptation to Sea-Level Rise Lifuka Island, Ha'apai, Tonga, B1: Physical resource 1.2: Groundwater resources assessment, 42

Statistics Department Tonga (SDT) (2011); Census of Population and Housing, 2011, 1

Turner E. Bryane (1998): Drilling Logs for Lifuka salinity monitoring boreholes, Report on Water Monitoring Borehole Installation, Lifuka, Ha'apai, Annex B, 13-24

Tonga Water Board (TWB) (2003): Salinity Profile from Lifuka 1998-2003

Vacher, H.L. (1997a): Varieties of Carbonate Island and a Historical Perspective. In: Vacher, H.L., Quinn, T. (Eds.), Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands, Elsevier, 1-33

Vacher, H.L., Rowe, M.P. (1997b): Geology and hydrogeology of Bermuda. In: Vacher, H.L., Quinn, T. (Eds.), Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands, Elsevier, 35-90

Velde, M. (2006): El Niño-Southern Oscillation determines the salinity of the freshwater lens under a coral atoll in the Pacific Ocean, Geophysical Research Letters, http://www.agu.org/pubs/crossref/2006/2006GL027748.shtml

Woodroffe, C.D. and Falkland, A.C. (1997): Geology and Hydrogeology of the Cocos(Keeling) Islands. In: Vacher, H. L., Quinn, T. (Eds.), Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands, Elsevier, 885-908

受理年月日：平成26年10月20日

Salt Water Intrusion into Groundwater and Problem on Vava'u Island and Lifuka Island, Kingdom of Tonga

ISHIDA Satoshi*, YOSHIMOTO Shuhei*, KODA Kazuhisa**,
KOBAYASHI Tsutomu**, SHIRAHATA Katsushi* and TSUCHIHARA Takeo*
*Renewable Resources Engineering Division, Water Resources Engineering
**Japan International Research Center for Agricultural Sciences

Abstract

Electric conductivity (EC) of groundwater and concentration of dissolved ion were measured to clarify salt water intrusion in groundwater on Vava'u Island and Lifuka Island, Kingdom of Tonga. EC was 150 mS/m or more at some wells on Vava'u Island. The result and past researches show that decreases of wells and increases of pumpage from one well might have caused the salt water intrusion. EC was 150 mS/m or less at a gallery and a well, which product water for water service, on Lifuka Island. However, two of three galleries were not used. It might be the cause that a part of the gallery is arranged in a high area of EC. It is effective to distribute wells to prevent the salt water intrusion in Vava'u Island, and it is effective to relocate the galleries in Lifuka Island. It is necessary to clarify the boundary depth between saltwater and freshwater and the permeability in Vava'u Island. And it is necessary to clarify the shape of freshwater lens and to analyze pumping by modeling Lifuka Island.

Key words: Groundwater, Freshwater lens, upcorning, salt water intrusion, well