

小島嶼での淡水レンズ地下水調査における物理探査の適用性について

Application of Geophysical Exploration for Investigation of Freshwater Lens in Small Island

石 田 聡 (いしだ さとし)

舩農研機構 農村工学研究所 上席研究員

吉 本 周 平 (よしもと しゅうへい)

舩農研機構 農村工学研究所 研究員

小 林 勤 (こばやし つとむ)

舩国際農林水産業研究センター プロジェクトリーダー

幸 田 和 久 (こうだ かずひさ)

舩国際農林水産業研究センター 主任研究員

中 里 弘 臣 (なかざと ひろおみ)

舩農研機構 農村工学研究所 上席研究員

1. はじめに

太平洋諸島や南西諸島など石灰岩起源の小島嶼において、帯水層中の海水の上に淡水がレンズ状に分布する淡水レンズは住民の貴重な水資源となっているが、同時に海面上昇、過剰揚水、干ばつ等の影響を受けやすく持続的な利用手法の確立が求められている。そのためには淡水レンズの賦存形態を明らかにする必要があり、その手法として島内に地下水観測孔を面的に配置し、それぞれの地点で地下水の電気伝導度 (EC) や塩分濃度を深度毎に測定して塩淡水境界深度を求める方法が一般に用いられている^{1,2}など。しかしこの手法は数多くのボーリングを必要とし、経済的・技術的に実施できる場所が限られるため、近年では物理探査を用いて観測孔のデータを補完する例が見られる。特に地盤の比抵抗を測定する電気探査法や電磁探査法は、塩水と淡水の電気抵抗の差が大きいので有効な調査法とされており、適用例も多い。表一1に、既往の研究例を示す。

淡水レンズを対象とした物理探査では、カナダ Geonics 社製 EM34 による電磁探査法の実施例が多い。これは人工送信源を用い、送信コイルと受信コイルとの距離及び送信周波数を変化させることによって深度方向の情報を得る周波数領域電磁探査法と呼ばれる手法の一つ (EM 法) であり、測定が簡便であるため広く用いられてきた。しかし EM34 では層構造が 3 層を超える場合、各層の導電率・層厚が一意的に決めることができない。また、解析によって求められる塩淡水境界は海水の 1/3 程度の濃度であるが、飲料水や農業用水として利用できる水 (以下淡水と呼ぶ) は塩素イオン濃度 500 mg/l または EC 200 mS/m 以下であり²⁾、淡水域を推定するためには複数の観測孔で実測された塩淡水境界深度の情報が必要となる¹⁰⁾。

一方、電気探査法は 1 箇所の測定で数多くのデータを取得でき、電線などのノイズにも強いので比較的高い精度で比抵抗を推定することができる。また人工送信源の電磁場を急激に変化させ、時間に対する二次磁場の変化を測定する時間領域電磁探査法 (TEM 法) も 1 回の

表一1 淡水レンズを対象とした既往の物理探査例

種別	調査地	使用機材	不飽和層厚	塩淡水境界深度	対象地質
電磁探査	ミクロネシア ³⁾	EM34	1~3m	3~27m	石灰岩
	フロリダ, セントジョージ島 ^{4,5)} ・ドッグ島 ⁶⁾	EM34	0~6m	<30m	石英砂
		EM31,34	~数 m	0~25m	
		EM34	1~8m	2~36	
	ニューヨーク, ロングアイランド ⁷⁾	EM34	2~6m	3~10	砂・礫
	プエリトルコ ⁸⁾	EM34 EM47*	40~80m	>50m	石灰岩
	ガーナ, ケタバリア ⁹⁾	Protern 47*	0~7m	5~20m	石灰岩
電気探査	沖縄県多良間島 ¹⁰⁾	EM34	9~12m	11~25m	石灰岩
	メキシコ, ユカタン半島 ¹¹⁾	Terrameter 300B	1~9m	20~110m	石灰岩
	ナウル共和国, ナウル島 ¹²⁾	Terrameter 300B	~40m	数~50m	石灰岩
	フィジー, オネアータ島 ¹³⁾	Terrameter 300	~10m	0~6m	石灰岩

* TEM 法

測定で数多くのデータを取得できるので、多層構造の解析には有利である。表一1に示すとおり、これらの手法を淡水レンズ調査に適用した研究例も見られるが、その多くは淡水域・汽水域・塩水域といったような相対的な比抵抗分布を示すに留まり、求められた層境界と観測孔で実測された EC との対比が行われておらず、水資源の定量評価には至っていない。

このような背景下、本報では淡水レンズが発達しているマーシャル諸島共和国マジュロ環礁において、地下水観測孔が設置してある地点において垂直電気探査及び TEM による地盤の比抵抗測定を行い、実測された EC 値と比較することによって、それぞれの測定法の適用性を評価した結果を報告する。

2. 研究方法

2.1 調査地概要

調査地の存するマジュロ環礁は北緯 7° 東経 171° に位置し、中部太平洋の島嶼国であるマーシャル諸島共和国の首都島である (図一1)。淡水レンズは環礁最大の島 (面積 1.8 km²) であるローラ島で発達している。

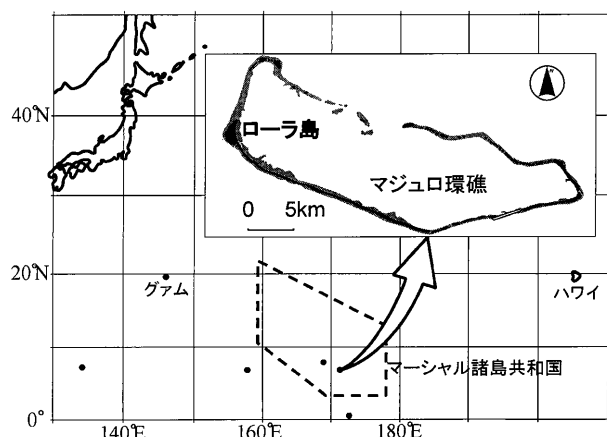


図-1 調査地(マジュロ環礁)位置図

ローラ島は平均標高数 m の低平な島であり、全域にわたって石灰砂に覆われている。ボーリングによって確認された地質は上位から石灰砂(層厚1.7 m)、礫混じり石灰砂(層厚9.7 m)、石灰砂礫(層厚3.6 m以上)であり、石灰砂は有孔虫起源である¹⁴⁾。透水性は極めて高く、既往の研究では石灰砂の透水係数は 7.0×10^{-4} m/s、石灰砂礫の透水係数は 7.0×10^{-3} m/s と見積もられている¹⁵⁾。

一般に淡水レンズは帯水層の透水性が高いほど発達しにくい、本地域では年間降水量が3 000 mm 以上と大きい¹⁴⁾、ローラ島の帯水層に淡水レンズが発達しており、井戸及び地下水面上部に埋設された横孔(シャフト)によって取水され、パイプラインで環礁東部に位置する首都マジュロに送水されている。

2.2 測定手法

マジュロ環礁は1998年に深刻な干ばつに見舞われ、地下水の塩分濃度が上昇した。このときアメリカ地質調査所(USGS)がローラ島の井戸の調査を行い、淡水レンズが分布する範囲を明らかにしている¹⁶⁾。図-2にPresley(2005)による淡水分布域を示す。淡水は礁湖側に偏って分布している。

図-2に現地に設置されている地下水観測孔、電気探査実施地点、TEM実施地点を併せて示す。地下水観測孔は1998年の干ばつ時のUSGSが設置したもので、1本の観測孔は1深度にストレーナを持つ。1サイトあたりの観測孔数は3~4本程度である。図-3に地下水観測孔の構造を示す。ECの測定は、投げ込み式EC計(ドイツWTW社製Cond315i)のセンサーを観測孔のストレーナ深度に下ろし、EC値の安定を確認した後、数値を記録した。測定は2010年10月16日及び2012年10月23日に行った。

電気探査及びTEMは観測孔近傍で実施したが、観測孔の保孔管が導電性の鋼管であることから、その影響を小さくするため、測定地点から観測孔までの距離を50~100 m 取った。サイト4のみ現場の制約から、観測孔からの距離は数 m 程度とした。

電気探査にはアメリカAdvanced Geosciences Limited社製Sting R1を用い、ウェンナー法により原則とし

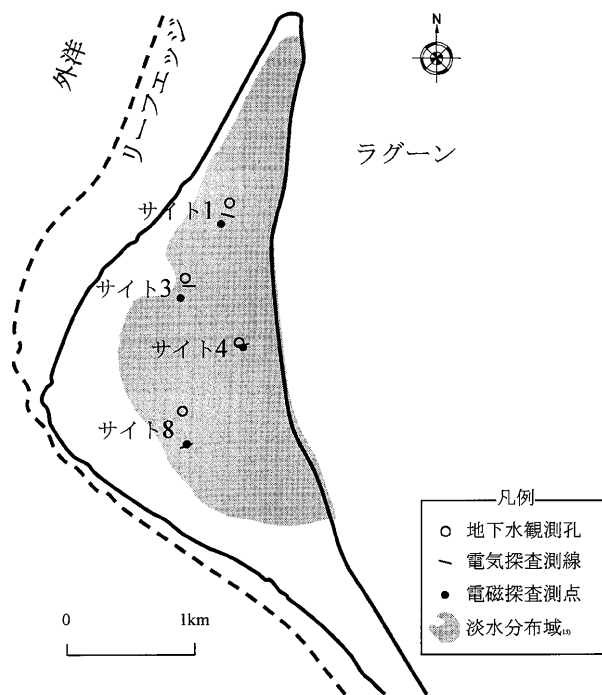
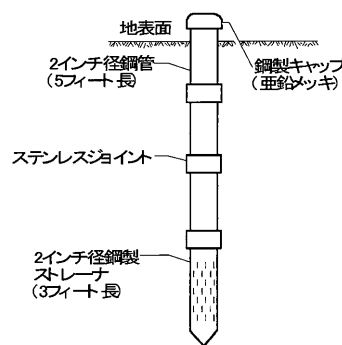


図-2 測定地点位置図

図-3 地下水観測孔構造図¹⁶⁾に加筆

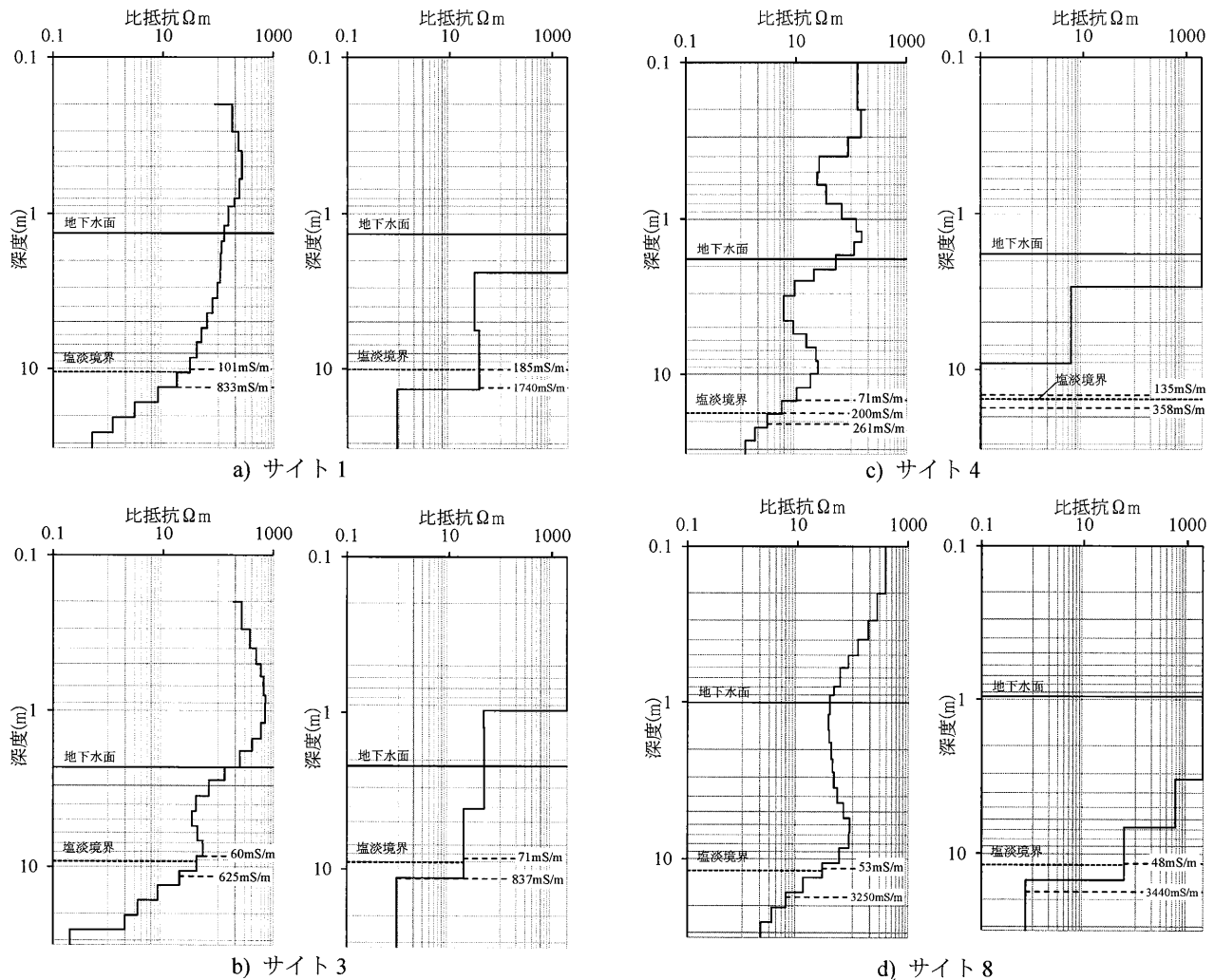
て電極間隔を0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 6.0, 7.0, 8.0, 9.0, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 24, 28, 32 m、電流値10 mAにて垂直探査を行った。これらの電気探査は2010年10月17, 19~23日に実施した。1地点あたりの測定時間は移動時間等を含めて1.5時間程度であった。

TEMにはオランダApplied Electromagnetic Research(AEMR)社製TEM-FAST48を用い、アンテナは12.5 m×12.5 m(矩形, 1ターン)とした。測定は2012年10月23, 25, 27, 29~31日に実施した。

3. 結果と考察

一般に淡水レンズ地下水の淡水域と深部の塩水域の境界はシャープな面を持つのではなく、塩分濃度が淡水と塩水の間である汽水域が形成されている。汽水域では塩分濃度が深度を増すにつれて徐々に上昇する¹⁷⁾。このため、比抵抗の鉛直構造を解析するモデルは地盤の比抵抗も徐々に変化すると仮定するモデルが適当である。ここでは電気探査の解析には非線形最小二乗法による一次元逆解析ソフト、アメリカInterpex Limited社製IX1D(v3.42)を用いた。解析条件は24層構造、最大解

報 告



図一 4 深度別比抵抗分布（左：電気探査，右：TEM。図中の数字は当該深度における EC 実測値）

析深度32 m の多層モデルとし、オッカムの逆解析によって比抵抗の層状構造を求めた。

TEM については AEMR 製 TEM-RESEARCHER ver. 8 によって5層構造の比抵抗分布を求めた。5層を超える多層構造の解析も試みたが、結果は変わらなかった。これは TEM によって得られたデータが多層構造を決定する精度を有してないためと考えられる。

図一 4 に各サイトにおける電気探査，TEM によって求められた深度別比抵抗分布，地下水面深度，観測孔における EC 実測値，及び塩淡水境界深度を示す。EC 実測値は200 mS/m を挟む2本の観測孔の値であり，塩淡水境界は2本の観測孔の深度及び EC 実測値を直線近似し，200 mS/m に相当する深度を推定したものである。

電気探査によって求められた比抵抗分布は，いずれも不飽和帯で極大値を取る。これは，表土に比べ石灰岩の比抵抗が大きく，石灰岩が飽和することによって比抵抗が小さくなることによるものと考えられる。また，地下水面下では深度が大きくなっても比抵抗があまり変化しない（場合によっては極大値を取る）領域が見られる。データは示していないが，淡水が存在しない西海岸付近での測定結果では比抵抗は深度を増すにつれてなだらかに低下するので，比抵抗の変化が小さい領域は淡水域を示すと考えられる。近傍の観測孔で求めた塩淡水境界と比

較すると，いずれのサイトでもこの領域は塩淡水境界より上部に位置している。

測定した4サイトを比較するとサイト4のみ全体的に比抵抗が小さく，他のサイトと異なる比抵抗構造を示す。また観測孔から求められた塩淡水境界は比抵抗構造の下層（塩水域に近い領域）に位置しており，実測値と整合的でない。サイト4はローラ島の集落の中心部に位置しており，住宅が比較的密集していることから測線と観測孔の距離を数 m しか取れなかった。このため，導電性の保孔管の影響を受けている可能性がある。また深度50 cm 付近に比抵抗の極小値が存在することから，導電性の埋設管が存在する可能性もあり，サイト4の測定データは検討対象としないことが妥当と考えられる。

サイト1, 3, 8における電気探査では塩淡水境界に対応した比抵抗は30～40 Ω m 程度であり，この値を目安に観測孔が近傍に存在しない地点においても，電気探査によって塩淡水境界深度が推定可能であると考えられる。

一方 TEM によって求められた比抵抗分布では，第4層と第5層（最下層）の境界（以下層境界と呼ぶ）はいずれも塩淡水境界より下位に位置している。層境界と塩淡水境界の深度差はサイト1, 3, 8でそれぞれ3.5, 2.4, 3.0 m とばらつきがある。また層境界に対応する EC 値は，サイト1では1740 mS/m 以上，サイト3では837 mS/

m未満であり、サイト毎に差異が見られる。以上より、TEMによって得られた層境界の深度から直接的に塩淡水境界を求めることは難しいと考えられる。一方で層境界が淡水域下端と塩水域上端の中間点より上部に位置することは、既往の周波数領域電磁探査法による研究³⁾と同様であり、TEMによっても島内の淡水レンズ形状の概略を把握することは可能であると考えられる。EM34を用いた測定は1箇所あたり20分程度を要するのに対し、TEM-FAST48は数分程度と短いことから、作業効率的には有利である。留意点として、今回用いた手法は送信終了時から受信開始時までわずかな時間差（不感領域）が存在することから、浅層の比抵抗構造は十分把握できない。これは図-4で第1層と第2層の境界が地下水水面に対応していないことから明らかである。より浅層を測定対象とする場合、コイル径を小さくする必要があるが、その分深層の解析精度が低下する。今回の測定ではコイル径を5mとした測定も試みたが、浅層の解析精度は向上しなかった。この点は今後の研究の進展を待ちたい。

4. おわりに

本研究では石灰岩帯水層中に淡水レンズが発達するマーシャル諸島共和国マジュロ環礁ローラ島を対象とし、垂直電気探査及び時間領域電磁探査法（TEM法）によって地盤の比抵抗構造を測定し、観測孔によって実測された地下水中の塩淡水境界深度と比較し、それぞれの調査法の適用性を検討した。研究結果は以下のとおりである。

- ① 電気探査によって求められた比抵抗分布は地下水水面より一定深度まで大きく変化しない領域が存在し、淡水域に対比された。
- ② TEM法によって求められた塩淡水境界深度は、淡水域下端と塩水域上端の中間点より上部に位置し、既往の周波数領域電磁探査法と同様であった。
- ③ EC値が200 mS/mを示す深度の推定は、電気探査結果を多層モデルによって解析することで可能であるが、TEM法では難しく、電気探査は精査に、TEM法は概査に用いることが適当である。

本研究の一部は科研費（24580362）及び新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「沿岸域における効率的な深層地下水探査手法の開発」の支援を受けて実施した。また調査にあたってはマーシャル諸島共和国資源開発省及び環境保護局の各位にご協力いただいた。ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Rowe, M. P.: Bermuda. In: Falkland, A. (Editor), *Hydrology and Water Resources of Small Islands: A Practi-*

- cal Guide.*, UNESCO. Paris, pp. 333~338, 1991.
- 2) 白旗克志：地下水電気伝導度測定による淡水レンズ水収支分析，*水土の知*, 78(6), pp.32~33, 2010.
- 3) Anthony, S. S.: Electromagnetic methods for mapping freshwater lenses on Micronesian atoll islands, *Journal of Hydrology*, 137 (1-4), pp. 99~111, 1992.
- 4) Ruppel, C., Schultz, G. and Kruse, S.: Anomalous Fresh Water Lens Morphology on a Strip Barrier Island, *Groundwater*, 38(6), pp. 872~881, 2000.
- 5) Stewart, M.: Electromagnetic Mapping of Fresh-Water Lenses on Small Oceanic Islands, *Groundwater*, 26(2), pp. 187~191, 1988.
- 6) Schneider, J. C. and Kruse, S. E.: A comparison of controls on freshwater lens morphology of small carbonate and siliciclastic islands: examples from barrier islands in Florida, USA, *Journal of Hydrology*, 284(1-4), pp. 253~269, 2003.
- 7) McNew, E. R. and Arav, S.: Surface Geophysical Surveys of the Freshwater-Saltwater Interface in a Coastal Area of Long Island, New York, *Groundwater*, 33(4), pp. 615~626, 1995.
- 8) Richards, R. T., Troester, J. W. and Martínez, M. I.: An Electromagnetic Geophysical Survey of the Freshwater Lens of Isla de Mona, Puerto Rico, *Journal of Cave and Karst Studies*, 60(2), pp. 115~120, 1998.
- 9) Nielsen, L., Jorgensen, N. O. and Gelting, P.: Mapping of the freshwater lens in a coastal aquifer on the Keta Barrier (Ghana) by transient electromagnetic soundings, *Journal of Applied Geophysics*, 62, pp. 1~15, 2007.
- 10) 石田 聡・土原健雄・吉本周平・皆川裕樹・増本隆夫・今泉眞之：沖縄県多良間島における淡水レンズ賦存量の推定，*農業農村工学会論文集*, 273, pp. 7~18, 2011.
- 11) Moore, Y. H., Stoessell, R. K., Easley, D. H.: Freshwater/sea-water relationship within a ground-water flow system, northeastern coast of the Yucatan Peninsula, *Groundwater*, 30(3), pp. 343~350, 1992.
- 12) Jacobson, G., Hill, P. J., Ghassemi, F.: Geology and hydrogeology of Nauru Island., In: Vacher, H. L., Quinn, T. (Eds.), *Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands*, Elsevier, pp. 707~743, 1997.
- 13) Ferry, J., Kumar, P. B., Bronders, J., Lewis, J.: Hydrogeology of carbonate islands of Fiji. In: Vacher, H. L., Quinn, T. (Eds.), *Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands*, Elsevier, Amsterdam, pp. 763~781, 1997.
- 14) 国際農林水産業研究センター：平成21年度環礁島水資源利用プロジェクト報告書—マーシャル諸島共和国—，p. 付12, 2010.
- 15) Griggs E. John and Peterson L. Frank: Ground-Water Flow Dynamics and Development Strategies at the Atoll Scale, *Groundwater*, 31(2), pp. 209~220, 1993.
- 16) Presley K. Todd, 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, pp. 1-40, 2005.
- 17) 石田 聡・土原健雄・吉本周平・皆川裕樹・増本隆夫・今泉眞之：沖縄県多良間島における淡水レンズ賦存量の推定，*農業農村工学会論文集*, 273, 7~18, 2011.

(原稿受理 2013.3.4)