J. Jpn. Soc. Soil Phys.
土壌の物理性
No. 131, p.37 ～ 43 (2015)

琉球石灰岩を帯水層とした塩水侵入阻止型地下ダムの貯留域における残留塩水塊の分布と挙動

吉本周平[1]・土原健雄[1]・白旗克志[1]・石田　聡[1]

Distribution and behavior of residual saltwater in the reservoir of a coastal subsurface dam: A field study of the Ryukyu Limestone aquifer, southern Okinawa Island

Shuhei YOSHIMOTO[1], Takeo TSUCHIHARA[1], Katsushi SHIRAHATA[1] and Satoshi ISHIDA[1]

Abstract: The Komesu subsurface dam was constructed along the Pacific shoreline south of Itoman City, Okinawa, Japan, to provide a reservoir for groundwater in the Ryukyu Limestone aquifer and to prevent saltwater intrusion from the sea. At present, residual saltwater remains in the reservoir and has not yet spread out during the past 10 years since the completion of the cut-off wall. Continuous monitoring of the groundwater level and electrical conductivity measurements showed that the electrical conductivity of the stored groundwater along the cut-off wall increased drastically during the rainfall events. This finding suggests that upward movement of the residual saltwater was associated with the groundwater flow over the cut-off wall, as previous studies have noted.
Key Words : groundwater, coastal area, carbonate aquifer, agricultural water use, pacific islands

1. はじめに

地下ダムは，地下に不透水性の止水壁を建設してその上流の帯水層中に地下水を貯留して利用する施設である．これまでに，国内外で多様な規模の地下ダムが建設され，その地域の生活や農業などのために利用されてきた（例えば，富田，2009; Ishida et al., 2011）．また，最近では，パキスタンやイランなどの乾燥地における地下ダム適地の探索（Jamali et al., 2014; Chezgi et al., 2015）など，地下ダムによる地下水開発はさらに多くの国々に広まりつつある．

南西諸島の琉球石灰岩分布地域では，多孔質で高透水性である表層地質の特性から，河川が未発達で農業用水・生活用水を地下水に依存している．また，降水は梅雨期と台風期に集中し，渇水時には水資源が不足するため，作種が限定されるとともに，度々の干ばつによる被害が発生してきた．このため，南西諸島では，宮古島の国営かんがい排水事業（2001 年完了; 例えば，白戸ら，2003）を皮切りとして，世界に先駆けた大規模地下ダム建設による農業用水の開発がなされた．宮古島では，地下ダムの運用によって，用水供給の安定化や市場価値の高い作物への転換が進んでいる（例えば，廣瀬ら，2010; 仲間・古木，2007）．一方で，将来予想される気候変動による降水量や気温の変化，地下ダムに附帯する末端かんがい施設の整備の進展，または作種変更による水利用の変化が，地下ダムの水資源量や水質に影響を及ぼす可能性が考えられる．

沖縄本島南部地区では，2005 年完了の国営農業水利事業によって 2 基の地下ダムが設置された．このうちの 1 基である米須地下ダムは，糸満市南部の海岸沿いに設置された塩水侵入阻止型の地下ダムである．塩水侵入阻止型地下ダムは，止水壁の上流側で地下水を貯留するとともに，下流からの海水の侵入を防ぐ構造となっている．米須地下ダムの貯留域には，事業完了時点で塩水が残存していた（沖縄総合事務局，2006; 名和ら，2006）．持続的な淡水資源の利用を図るためには，将来の地下ダムの水資源量と水質を予測することが求められる．既往の研究では，地下ダム貯留域の水資源量と硝酸性窒素濃度の将来変化を予測する数値モデルについて検討がなされた（Yoshimoto et al., 2013）が，残留塩水塊の挙動については考慮されていなかった．

地下ダム運用時の残留塩水塊の消長については，数値シミュレーションや室内での水槽実験によって地下ダム事業の完了までに検討され，降水時に上流からの地下水が止水壁に到達して塩水塊を押し上げると推定されている（中川ら，2004; Luyan et al., 2009）．これらの検討を踏まえれば，堤体内の残留塩水は地下ダム満水時の越流によって徐々に減少していくものと推定される．しかし，地下ダム水位の低下時には基盤や堤体を通じて塩水が侵入する可能性も考えられたことから，貯留域には除塩用の井戸が設置されている（沖縄総合事務局，2006）．

このように地下ダム供用前の検討はなされているが，地下ダム供用後からこれまでの残留塩水塊の状況につい

[1]National Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization, 2-1-6 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8609, Japan. Corresponding author : 吉本周平：農研機構 農村工学研究所.
2015 年 8 月 28 日受稿　2015 年 10 月 21 日受理

ては示されていなかった．そこで本研究では，地下ダム水資源の予測モデル構築に資するために，地下ダム貯留域における塩水塊の分布と挙動を調査し，現況を明らかにした．

2. 調査地区の概要

調査地区は，沖縄本島最南端の糸満市に位置する（Fig. 1）．第四紀更新世の琉球層群（琉球石灰岩）が広く分布し，新第三紀鮮新世の砂岩泥岩互層からなる島尻層群を不整合に覆っている．琉球石灰岩と島尻層群の間には石灰質砂層である知念砂岩が存在する．島尻層群の上部境界面の深度は Fig. 2 に等値線として示されている．島尻層群と知念砂岩は透水係数 2×10^{-7} m s^{-1} 未満で難透水性であるが，島尻層群中には比較的透水性の高い凝灰質砂層が狭在している（ボーリング調査による平均値 2.8×10^{-5} m s^{-1}; 沖縄総合事務局，2006）．琉球石灰岩は透水係数 $10^{-3} \sim 10^{-5}$ m s^{-1}，間隙率 9 % で，縦横に発達する断層によって形成された島尻層群の埋没谷を受け皿として地下水を保持している（沖縄総合事務局，2006）．地下ダム貯留域の左岸側（海側に向かって左側）には大規模な洞窟が存在することが知られている．

米須地下ダムは，止水壁（Fig. 2 の Cut-off wall）によって淡水を貯留するとともに，海水の侵入を防ぐ構造の塩水侵入阻止型地下ダムである．有効貯水量は 1.81×10^6 m^3 で，止水壁の堤長は 2,345 m，堤高は最も基盤が深いところで 69.4 m であり，2002 年に止水壁の締め切りが完了した（沖縄総合事務局，2006）．計画基準年（1971 年; 年降水量 1,442 mm）の低水位は標高 −11.6 m である（沖縄総合事務局，2006）．地下ダム貯留域には大規模な洞窟が存在することが知られており，その末端にあたる海岸部には 2 箇所の湧水（Fig. 2 の Springs）が存在し，住民の信仰の対象となっている．地下ダム止水壁を設置することによって洞窟を通過する地下水の流れが寸断されることから，湧水の水量を維持するための管路が止水壁中に設けられている（沖縄総合事務局，2006）．止水壁の透水性は，建設後のチェックボーリングによって透水係数 1×10^{-8} m s^{-1} 以下であることが確認されている（沖縄総合事務局，2006）．

塩水塊は，止水壁締め切り直後の 2004 年時点で左岸側および右岸側の止水壁沿いで確認されている（沖縄総合事務局，2006; Fig. 2）．電気伝導度が 500 mS m^{-1} 以上となる深度は，沖縄総合事務局（2006）によれば，Fig. 2 の左岸側の残留塩水塊では標高約 −40 m，右岸側ではおよそ標高 −30 ～ −20 m であった．これらの残留塩水塊は，淡水の越流によって除去されると推定されているが，水位が低下した時の止水壁や基盤からの塩水の侵入に備えて，除塩ポンプが設置されている（沖縄総合事務局，2006）．

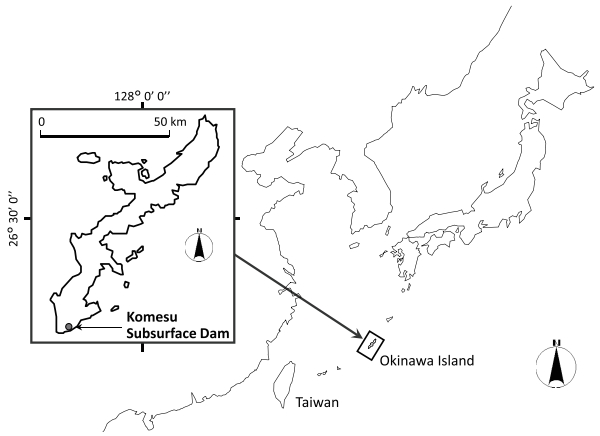


Fig. 1　調査地区の位置.
Location of the study site.

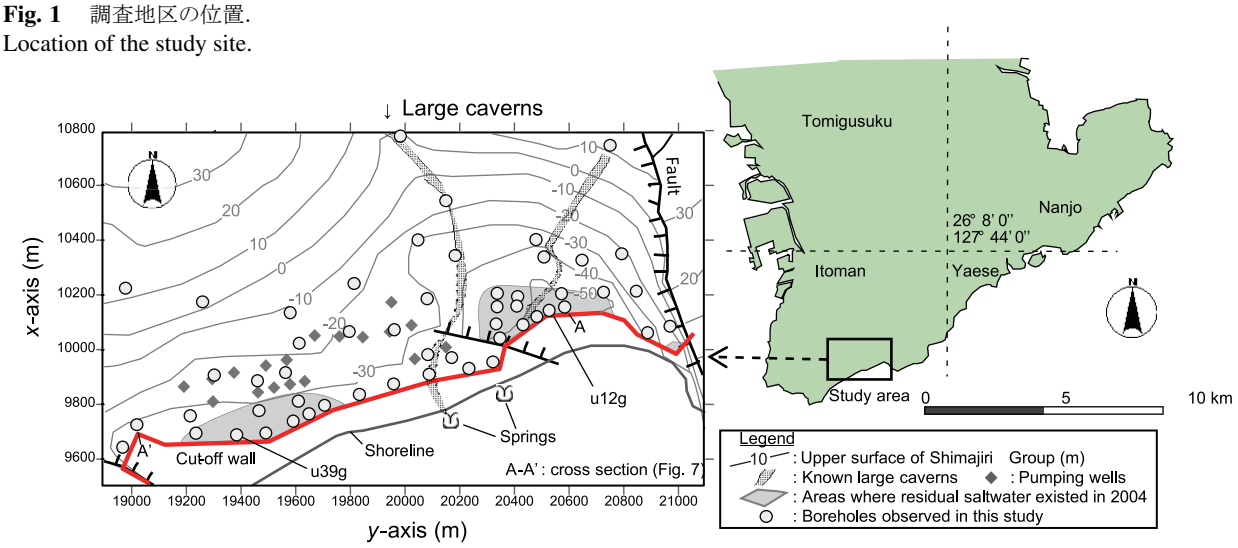


Fig. 2　米須地下ダム貯留域の調査地点．電気伝導度が 500 mS m^{-1} 以上の残留塩水塊の分布範囲は，沖縄総合事務局（2006）による．また，等値線は島尻群層の上部境界面の標高を示す．縦軸（*x*-axis）および横軸（*y*-axis）はそれぞれ平面直角座標系（15 系）における座標.
The locations of observation points in the study area. The information on the distribution of residual saltwater in 2004 is from the Okinawa General Bureau (2004). The contour shows the elevation of upper surface of Shimajiri Group. Here, the *x*- and *y*-axes are the coordinate axes in the Japanese Geodetic Datum (JGD) 2000/Japan Plane Rectangular CS XV coordinate reference system (CRS).

3. 研究方法

貯留域に残留している塩水塊の分布を調べるために，2012 年 12 月 12 ～ 14 日，2013 年 12 月 17 ～ 19 日，2014 年 12 月 2 ～ 4 日の 3 回，事業時に掘削された観測用ボーリング孔（以下，観測孔）で電気伝導度計（In-Situ 社製 Aqua TROLL 200）を用いて鉛直方向の電気伝導度分布を一斉に観測した．また，併せて観測孔における地下水位を測定した．観測孔は塩ビ管仕立てで，オールストレーナ構造となっている．各回の調査における電気伝導度の鉛直分布と地下水位の観測地点数は，2012 年はそれぞれ 33，40，2013 年は 31，50，2014 年は 26，48 であった．現地の状況や調査実施上の制約から，3 回の調査のうち 1 回または 2 回しか観測していない地点がある．

また，塩水塊の挙動を調べるために，2 地点の観測孔（Fig. 2 の u12g と u39g）に自記水位計（応用地質社製 S&DL mini），自記水位・電気伝導度計（応用地質社製 S&DL mini EC メーター）および自記電気伝導度計（Onset 社製 HOBO U24）を Fig. 3 の深度に設置し，2013 年 12 月 17 日から 2014 年 12 月 2 日までの間，地下水位と電気伝導度の変化を 1 時間毎（ただし u39g の自記水位計は 10 時間毎）に連続観測した．

4. 結果

4.1 水位と電気伝導度の分布

一斉観測を実施した 2012 年 12 月と 2013 年 12 月，2014 年 12 月の地下水位の分布を Fig. 4 に示す．いずれの時期においても，左岸側の洞窟の付近において地下水位が比較的高い．一方，右岸側では，止水壁の上端標高である 4 m よりも地下水位が低い部分がみられ，2013 年 12 月には 2 m 未満の地点も存在する．

一斉観測時に観測孔で電気伝導度の鉛直分布を測定した結果の例として，自記計を設置した観測孔 u12g と u39g での分布を Fig. 5 に示す．残留塩水塊が存在する地点の観測孔では，一般に，ある深度で電気伝導度が急激に上昇し，淡水から塩水へ遷移する．この上昇の急激さには程度差があるものの，u12g での各年の鉛直分布（Fig. 5 の（a-1），（b-1），（c-1））や u39g での 2012 年の鉛直分布（Fig. 5 の（a-2））のような測定結果が典型的である．ただし，2013 年および 2014 年の u39g（Fig. 5 の（b-2），（c-2））のように，比較的浅部で 200 mS m^{-1} まで電気伝導度が上昇し，深部で再び急激に電気伝導度が上昇して塩水に遷移するような鉛直分布もみられる．一方，残留塩水塊が存在しない地点の観測孔では，浅層か

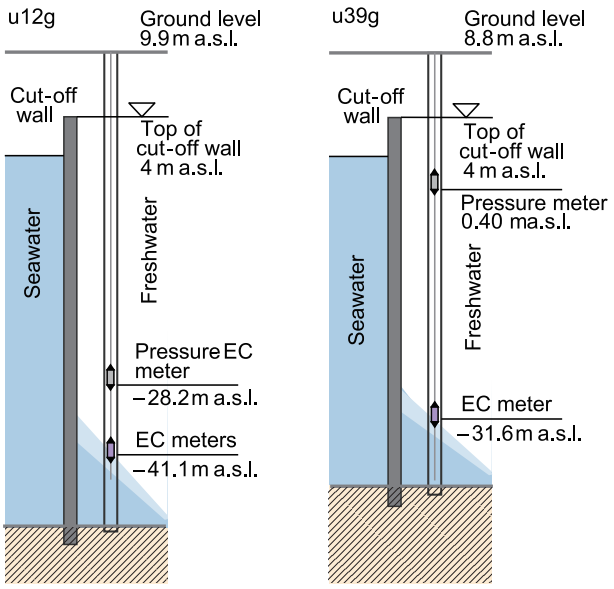


Fig. 3　自記水位計および自記電気伝導度計の設置状況．
Outline of the installation of pressure meters and electrical conductivity (EC) meters in observation boreholes u12g and u39g, along the cut-off wall.

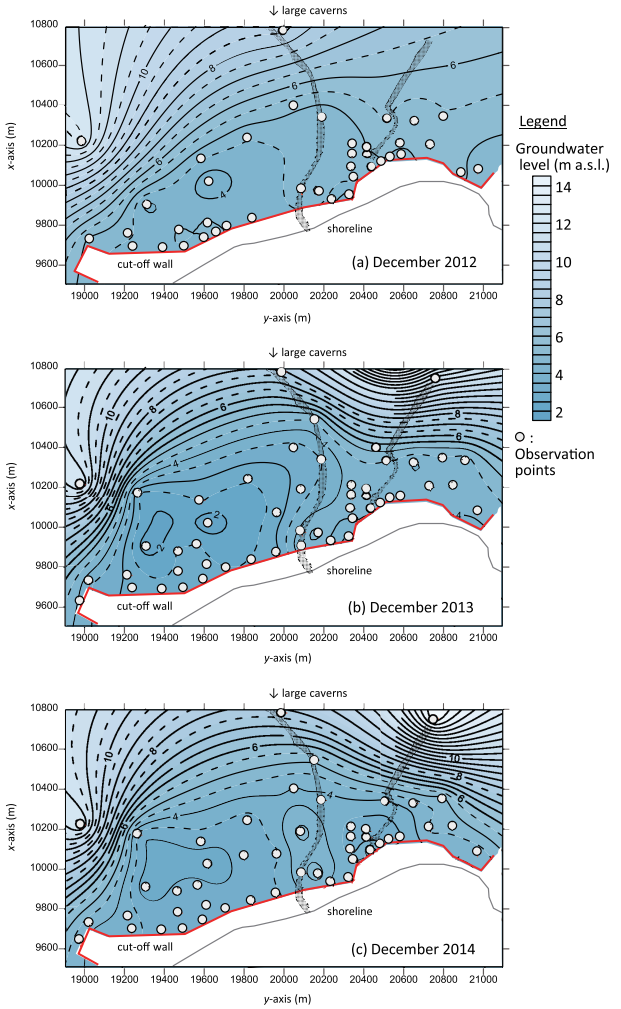


Fig. 4　地下ダム貯留域の地下水位分布：（a）2012 年 12 月，（b）2013 年 12 月，（c）2014 年 12 月．縦軸（*x*-axis）および横軸（*y*-axis）はそれぞれ平面直角座標系（15 系）における座標．
The groundwater table in the reservoir area in (a) December 2012, (b) December 2013, and (c) December 2014. The *x*- and *y*-axes are the coordinate axes in the JGD2000/Japan Plane Rectangular CS XV CRS.

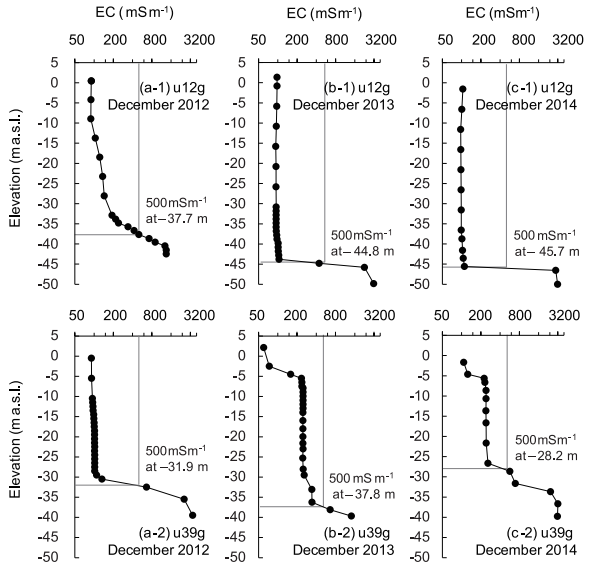


Fig. 5 観測孔における電気伝導度鉛直分布の例.
Vertical distributions of electrical conductivity in observation boreholes u12g (top row) and u39g (bottom row) in, from left to right, December 2012, 2013, and 2014.

ら孔底まで淡水で，電気伝導度が上昇せずフラットな鉛直分布となる．

全ての鉛直分布測定の結果から作成した標高 −10 m および −30 m の電気伝導度の平面分布を Fig. 6 に，止水壁沿いの断面の電気伝導度分布を Fig. 7 に，それぞれ示す．左岸側に比べて右岸側において同じ深度でも地下水の電気伝導度がより高い傾向にある．電気伝導度の鉛直分布の変曲点にあたる 500 mS m^{-1} の境界（沖縄総合事務局，2006）の深度は，左岸側では標高約 −45 ～ −40 m 付近，右岸側では標高 −30 m 付近で，締め切り直後の 2004 年に右岸側で観測された電気伝導度の鉛直分布と比較すると 5 m 程度低下している（Fig. 7）．

一斉観測までの気象庁那覇観測所における降水量を，それぞれの一斉観測開始日から遡って積算した累積降水量と積算日数の関係として Fig. 8 に示す．なお，一斉観測中の 2013 年 12 月 17 日に 52 mm，18 日に 2 mm，2014 年 12 月 4 日に 34.5 mm の日降水量を記録している．右岸側で比較的高い電気伝導度を示した 2013 年 12

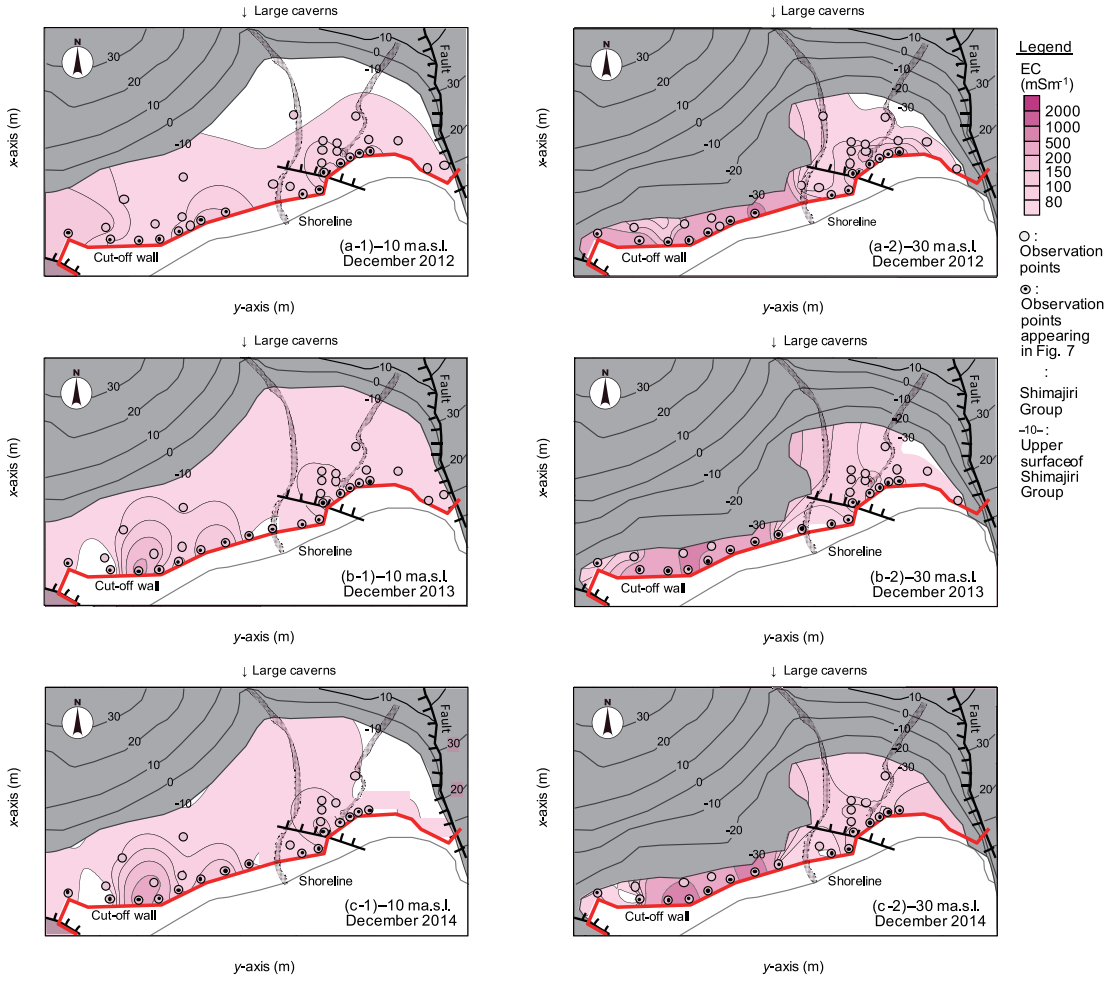


Fig. 6 電気伝導度鉛直分布測定による深度毎の電気伝導度平面分布: （a-1）2012 年 12 月の標高 −10 m 深度，（a-2）同時期の標高 −30 m 深度，（b-1）2013 年 12 月の標高 −10 m 深度，（b-2）同時期の標高 −30 m 深度，（c-1）2014 年 12 月の標高 −10 m 深度，（c-2）同時期の標高 −30 m 深度．縦軸（*x*-axis）および横軸（*y*-axis）はそれぞれ平面直角座標系（15 系）における座標.
Planar distributions of electrical conductivity by depth: (a-1) at E.L. = −10 m in December 2012; (a-2) at E.L. = −30 m in December 2012; (b-1) at E.L. = −10 m in December 2013; (b-2) at E.L. = −30 m in December 2013; (c-1) at E.L. = −10 m in December 2014; and (c-2) at E.L. = −30 m in December 2014. The *x*- and *y*-axes are the coordinate axes in the JGD2000/Japan Plane Rectangular CS XV CRS.

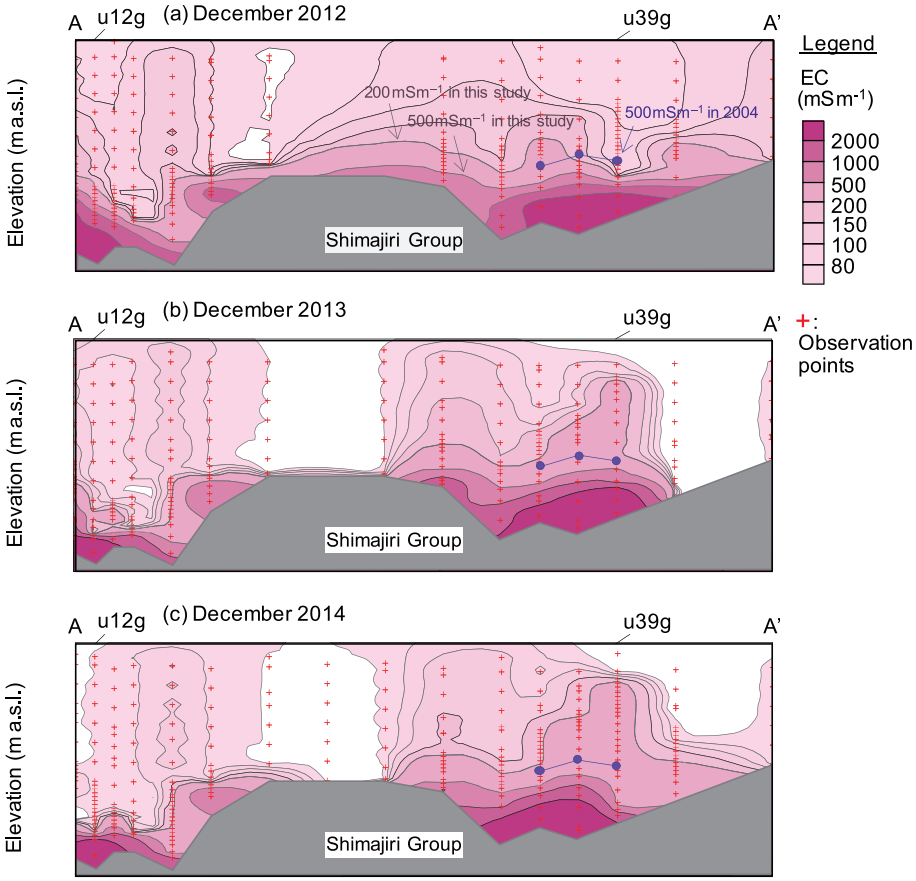


Fig. 7　電気伝導度鉛直分布測定による止水壁沿い（Fig. 1 の A–A’ 断面）の電気伝導度断面分布:（a）2012 年 12 月，(b）2013 年 12 月，(c）2014 年 12 月．止水壁締め切り直後の 2004 年の測定による 500 mS m^{-1} 深度（本研究と重複している 3 地点のみ; 沖縄総合事務局，2006）を併せて示している．
Cross-sectional distributions of electrical conductivity along the cut-off wall (A–A'; see Fig. 1) in (a) December 2012, (b) December 2013, and (c) December 2014. The depths at which EC = 500 mS m^{-1} was observed in 2004 are also shown.

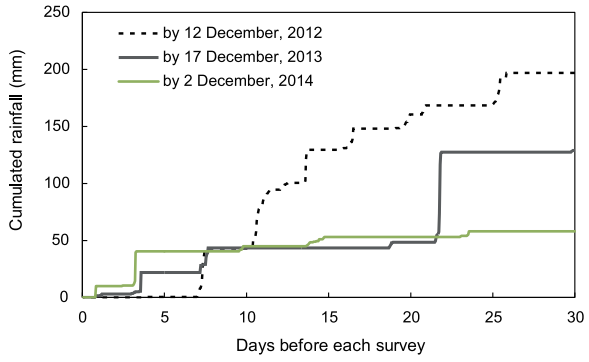


Fig. 8　気象庁那覇観測所における調査開始日までの積算降水量.
Cumulative rainfall at Naha, Okinawa, during the 30 days before the start of each survey.

月と 2014 年 12 月の一斉観測までの 3 週間の累積降水量は，それぞれ 48.5 mm と 53 mm で，2012 年 12 月の 168 mm に比べて少なく，2013 年 12 月と 2014 年 12 月は一斉観測中にまとまった降水があったものの直近の降水量は 2013 年 12 月と 2014 年 12 月は少なかったといえる．

4.2 地下水位と電気伝導度の時間変化

自記計による地下水位および電気伝導度の連続観測結果を Fig. 9 に示す．左岸側の観測孔である u12g では，主に日降水量が 50 mm を超えるような降水の後に電気伝導度が上昇する現象がみられる．右岸側の観測孔である u39g の電気伝導度は，u12g に比べて変動の程度が小さいものの，u12g に類似した降水時の上昇がみられる．ただし，u39g では，地下水位が止水壁の上端である 4 m に満たない場合の降水後に電気伝導度が低下することがある．また，u39g では，降水イベントと関係なく一時的に電気伝導度が低下する現象がみられる．

5. 考察

止水壁の締め切りから 10 年経過した現況の残留塩水塊の分布状況について，締め切り直後の 2004 年時点と比較すると，500 mS m^{-1} の境界は 5 m 程度深いところに移動し，止水壁や基盤からの浸透による塩水分布の拡

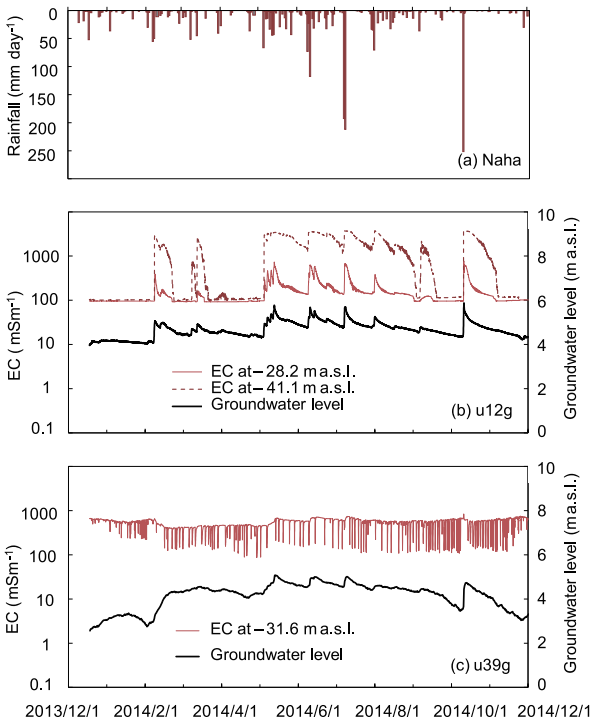


Fig. 9 降水量ならびに自記計で観測された地下水位と電気伝導度の変化: (a) 気象庁那覇観測所における日降水量, (b) u12g での地下水位と電気伝導度, (c) u39g での地下水位と電気伝導度.
Changes in rainfall and in logged groundwater levels and electrical conductivity from 1 December 2013 to 1 December 2014: (a) Daily rainfall at Naha, and groundwater level and electric conductivity at (b) u12g and (c) u39g.

大はみられないといえる.

米須地下ダム貯留域では, これまでの研究によって, 洞窟を通過する速い地下水流動が存在し, 電気伝導度の分布や水質の形成に影響を及ぼしていることが示されている (今泉ら, 2002; Yoshimoto et al., 2011). 一斉観測時に左岸側の洞窟付近で地下水位が比較的高かったこと (Fig. 4) や, 洞窟に近い u12g で降水時により鋭敏な地下水位の応答がみられたこと (Fig. 9) から, 左岸側の洞窟付近では供給量が多く速やかな地下水流動が発生していると考えられる. また, 降水時に止水壁沿いで電気伝導度が上昇する現象 (Fig. 9) は, 中川ら (2004) や Luyun et al. (2009) が示すように, 上流からの地下水が止水壁に到達して塩水塊を押し上げるためと考えられる. 左岸側の止水壁沿いにある u12g においてより著しい電気伝導度の変動がみられること (Fig. 9) は, 左岸側の洞窟で推定される供給量が多く速やかな地下水流動の存在と整合的である. また, 左岸側では電気伝導度が相対的に低い (Figs. 6, 7). これは, 左岸側では上流側から右岸側に比べて地下水の供給量が大きいことが関係している可能性がある. u39g では降水後に電気伝導度が低下することがある. 地下水位が止水壁上端に満たない時にこの現象がみられることから, 越流やそれに伴う塩水の押し上げが発生せず, 希釈のみが起こっている可能性がある. また, u39g では, 降水イベントとは無関係に一時的に電気伝導度が低下する現象がみられるが, この変動の要因は不明である. これらについては, 今後より注意深い観測と検討が必要と思われる.

2013 年 12 月と 2014 年 12 月の一斉観測時には, 右岸側で地下水位が低下し (Fig. 4), 500 mS m^{-1} 境界の深度は変わらないが標高 −10 m ほどの深度でも 200 mS m^{-1} 程度の電気伝導度がみられる (Figs. 5, 6, 7). 右岸側の残留塩水塊分布範囲付近には揚水井があり (Fig. 2), ポンプでの取水が地下水位や電気伝導度に影響を及ぼすと考えられる. また, 右岸側では, 洞窟が存在する左岸側と比べて上流からの地下水の到達に時間が掛かり, 地下水位の回復や電気伝導度の低下が遅れている可能性がある. このような止水壁沿いの 200 mS m^{-1} 程度の電気伝導度は, ポンプ取水や降水時の挙動に伴うより高い電気伝導度を持つ残留塩水の分散によってもたらされたと思われるが, 分布範囲が限定的で濃度も小さいことから残留塩水塊の収支には殆ど寄与しないと考えられる.

6. おわりに

塩水侵入阻止型地下ダムである米須地下ダムの貯留域に残留する塩水塊の分布と挙動について, 現地での一斉観測と自記計による連続観測によって検討した. 地下ダムが運用されている状況下での残留塩水塊の分布については, 止水壁締め切り直後からその十数年後にあたる現在までの間での塩水分布の拡大はみられなかった. また, 降水時に止水壁沿いで電気伝導度が上昇する現象が捉えられたことから, 既往の文献 (中川ら, 2004; Luyun et al., 2009) で指摘されている越流時の残留塩水の押し上げが起こっていることが推察された.

今後は, 地下ダムに附帯する末端かんがい施設の整備の進展による水需要の増加とともに, 気候変動に伴う極端な少雨も想定されることから, 水位低下時の残留塩水塊の挙動を含めた地下ダム水資源の予測モデルを構築することが求められる. 本研究では, 越流時の残留塩水の押し上げが示唆されたが, モデル化のためには, 揚水井のポンプ稼働状況も踏まえた上で, 貯留域全体での地下水の流れと残留塩水塊の挙動の関係を明らかにする必要がある. また, 琉球石灰岩からなる不均質な帯水層での不飽和浸透の状況も把握し, 降水時における浸透水の流入のようすを明らかにしてモデルに組み込むことで, より適切な予測が可能になるものと思われる. 引き続き, 地下ダム貯留域における残留塩水塊の挙動を観測したい.

謝辞

本研究の一部は, 農林水産省委託プロジェクト研究「農林水産分野における地球温暖化対策のための緩和及び適応技術の開発」(課題番号 45150) および「極端現象の増加に係る農業水資源, 土地資源及び森林の脆弱性

の影響評価」（課題番号 91150），ならびに科学研究費補助金（助成番号 15K07657）の支援を受けて実施された．研究の実施にあたっては，沖縄本島南部土地改良区および沖縄総合事務局土地改良総合事務所の各位から多大な協力と貴重な情報をいただいた．ここに記して感謝申し上げる．

引用文献

Chezgi, J., Pourghasemi, H.R., Naghibi, S.A., Moradi, H.R. and Kheirkhah Zarkesh, M. (2015): Assessment of a spatial multi-criteria evaluation to site selection underground dam in the Alborz Province, Iran. Geocarto International, doi:10.1080/10106049.2015.1073366.

廣瀬 孝，野田崇広，前門 晃 (2010): 地下ダム事業による農業用水の安定供給と宮古島のサトウキビ生産. 沖縄地理，10: 19–24.

今泉眞之，奥島修二，塩野隆弘，竹内睦雄，小前隆美 (2002): 琉球石灰岩帯水層における塩水侵入の実態 —米須地下ダム流域を例として—，農業土木学会論文集, 221: 11–23.

Ishida, S., Tsuchihara, T., Yoshimoto, S. and Imaizumi, M. (2011): Sustainable use of groundwater with underground dams. JARQ, 45(1): 51–61.

Jamali, A.I., Olofsson, B. and Mörtberg, U. (2014): A spatial multi-criteria analysis approach for locating suitable sites for construction of subsurface dams in Northern Pakistan. Water Resources Management, 28(14): 5157–5174.

Luyun Jr., R., Momii, K. and Nakagawa, K. (2009): Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall. Journal of Hydrology, 377: 227–236.

中川 啓, 籾井和朗, 内田一平 (2004): 塩水侵入阻止型地下ダム貯留域内の残留塩分の挙動. 水工学論文集, 48: 367–372.

仲間雄一, 古木信也 (2007): 地下ダムを利用したかんがい農業の効果について — 国営宮古地区の概要と事業効果 —. 水と土, 150: 98–102.

名和規夫, 青木 進, 中尾 仁 (2006): 沖縄本島南部地区における地下ダムの役割と効果. 農業土木学会誌, 74(12): 1107–1110.

沖縄総合事務局 (2006): 沖縄本島南部農業水利事業 — 技術誌 —, 629p.

白戸 明, 清水 修, 小徳 基 (2003): 沖縄県宮古島における大規模地下ダムによる水資源開発. 農業土木学会誌, 71(5): 411–416.

富田友幸 (2009): 地下ダム開発の現状と今後の展開—沖縄・奄美地域の農業用地下ダムを中心として. 地下水技術, 51(1): 29–39.

Yoshimoto, S., Tsuchihara, T., Ishida, S., Masumoto, T. and Imaizumi, M. (2011): Groundwater flow and transport and potential sources of groundwater nitrates in the Ryukyu Limestone as a mixed flow aquifer in Okinawa Island, Japan. Paddy and Water Environment, 9: 367–384.

Yoshimoto, S., Tsuchihara, T., Ishida, S. and Imaizumi, M. (2013): Development of a numerical model for nitrates in groundwater in the reservoir area of the Komesu subsurface dam, Okinawa, Japan. Environmental Earth Science, 70: 2061–2077.

要　　旨

沖縄県糸満市の米須地下ダムを対象として，塩水侵入阻止型地下ダムの貯留域に残留する塩水塊の分布と挙動について検討した．現地での一斉観測の結果から，止水壁の締め切りから十数年が経過して地下ダムが運用されている現況での残留塩水塊の分布が明らかになり，止水壁締め切り直後から現在までの間に塩水分布が拡大していないことが示された．また，自記計による連続観測の結果からは，降水時に止水壁沿いで電気伝導度が上昇する現象が捉えられた．このことから，既往の文献において指摘されている越流時の残留塩水の押し上げが起こっていることが推察された．

キーワード：地下水，沿岸域，炭酸塩岩帯水層，農業用水，南西諸島