

琉球石灰岩分布帯水層の水質形成メカニズムに関する一考察—沖縄本島米須地下ダム流域を例として—
**Study on Mechanism of Water Quality Formation in Ryukyu Limestone Aquifer - Case study on Groundwater
 in the Catchment Area of Komesu Subsurface Dam, Okinawa Island, Japan-**

中野拓治*, 安元 純*, 聖川健斗*, 阿部真己**, 畑 恭子**, 山本一生**
 NAKANO Takuji*, YASUMOTO Jun*, HIJIKAWA Kent*, ABE Masaki**,
 HATA Kyoko**, and YAMAMOTO Kazuo**

1. はじめに

地下水は、河川水とともに農業にとって重要な水資源であり、特に沖縄県のような島嶼地域では古くから農業用水や生活用水としての利用がなされている（国土交通省水管理・国土保全局水資源部，2013）．近年，地下ダムによる水資源開発を通じて，地下水が灌漑用水や生活用水として利用される場面が増加しており，那覇市に近接する畑地農業地帯の沖縄本島南部地域においても，糸満市及び八重瀬町の1,352haの畑地を対象に国営沖縄本島南部水利事業（1992～2005年）が実施されている．この沖縄本島南部地域は，琉球石灰岩分布域であり，米須と慶座の2カ所の地下ダム築造によって石灰岩帯水層に貯留された地下水が農業用水に利用されている．このため，地下ダム流域における水質管理を含めた今後の地下水の適正な利用に資する観点から，本研究では，米須地下ダム流域（以下，調査地域という）を対象として，現地観測データによる統計解析等を通じて，琉球石灰岩分布帯水層の水質形成メカニズムについて，考察した．

2. 研究方法

本研究では，30 地点（湧水：8 カ所，観測井（基盤岩に到達するまで全面的にストレーナーを配置）：22 カ所）の水質データを用いて検討を行った．観測井での採水深度は地下水面から - 5m 程度とした．水質測定項目は，水温，pH，電気伝導度（EC），酸化還元電位（ORP），溶存酸素（DO），陽イオン（ Na^+ ， K^+ ， Mg^{2+} ， Ca^{2+} ），陰イオン（ Cl^- ， NO_3^- - N， SO_4^{2-} ），重炭酸イオン（ HCO_3^- ）である．水質調査は，2012 年 2 月から 2013 年 11 月までの間に概ね月 1 回の頻度で 21 回実施した．また，調査地域の地下水流動場を把握するため，解析モデル（MODFLOW-NWT）を用いて流動解析を行った．

3. 結果と考察

調査地域の地下水は，地下ダム堤体直上流部に位置する地点を除いて Ca - HCO_3 型（炭酸塩硬度型と中間型）に分類されるとともに，地下ダム堤体直上流部の地下水水質は，Na - Cl 型（アルカリ非炭酸塩型）となっている．調査地点の地下水水質について，ウオード法によるクラスター分析（クラスター数を 4 に設定）を通じて類型化を試みたところ， Na^+ ， Cl^- ，及び Mg^{2+} の平均濃度はクラスター 4，3，2，1 の順に高い値を示すとともに， Ca^{2+} と HCO_3^- はクラスター 2，4，3，1 の順で高い濃度となっている． K^+ と SO_4^{2-} はクラスター 4，2，3，1 の順に平均濃度が大きくなる一方， NO_3^- - N に関してはクラスター 2，1，4，3 の順で高い値が得られている．クラスター 1 は内陸部に位置する新垣エリアと真壁エリアの真壁湧水・山城エリアの山城湧水とともに，地下ダムの貯留域と止水壁直上流や下流域に分布している．真壁エリアと山城エリアのほとんどの調査地点とともに，地下ダムの貯留域左右岸部の調査地点はクラスター 2 に分類される．米堤上 40 はクラスター 4 に分類されるとともに，クラスター 3 は地下ダム止水壁直上流の米堤上 11・32 と地下ダム下流域に位置するサッチンガーの 3 地点である．

また，調査地点の水質について，流動解析結果による比較検証を通じて地下水流動場との関係を検討したところ，地下水水質の特徴が一致している地点は Fig.1 に示すように地下水流動場の条件が類似している地点や地下水流動によって接続していることが確認された．Ca - HCO_3 型に分類されるクラスター 1 と 2 は流速がある程度速い地点に集中する一方，Na - Cl 型に分類されるクラスタ

*琉球大学農学部地域農業工学科 Faculty of Agriculture University of The Ryukyus, **いであ株式会社 Idea Consultants Inc.
 キーワード：地下ダム，水質形成，琉球石灰岩帯水層

ー3と4は流速が小さく地下水流動場による滞留が認められる地点に位置している. このことから, 地下水流動がほとんどない場所に Na - Cl 型の地下水が残留している状況になっているものと考えられ, 定性的には理解しやすい結果が得られている.

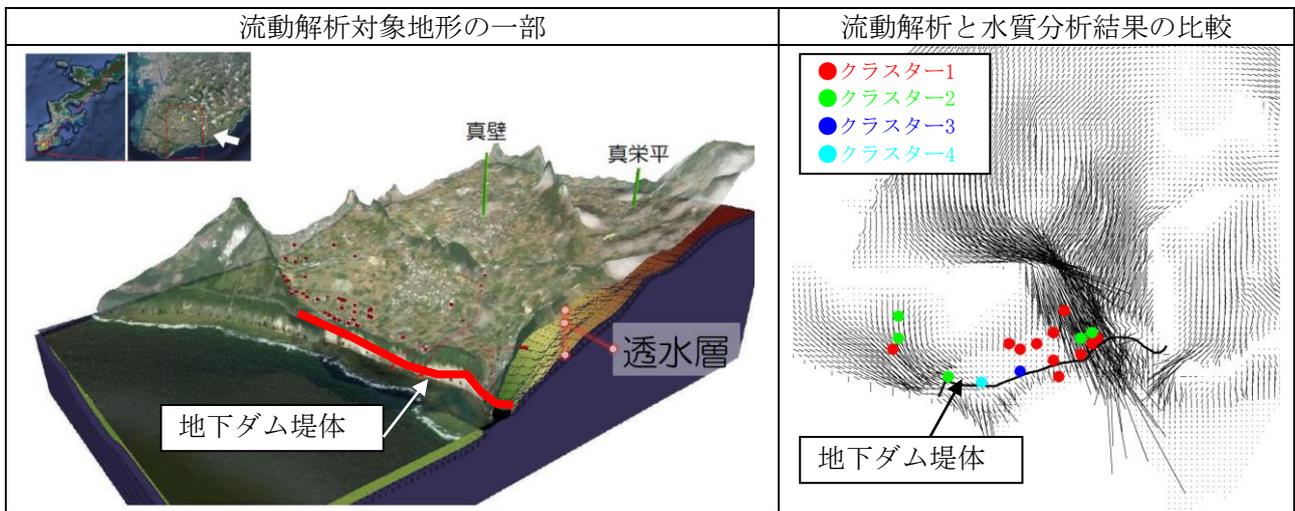


Fig.1 調査地点水質と地下水流動解析結果の比較

さらに, 調査地域地下水の水質測定項目を対象に主成分分析を行ったところ, 第3主成分までで累計寄与率79.9%が得られ, 地下水水質は少数個の主成分で集約できるとともに, 第1主成分は Na^+ , Cl^- , K^+ , Mg^{2+} , 及び SO_4^{2-} に係る主成分負荷量が0.8以上の値を示しており, 主な水質指標となっていることから, 海塩による自然現象や農地排水と生活排水等の社会経済活動を反映している主成分であると解釈できる. 第1主成分は内陸部から海岸部に向かって高くなる一方で地下ダム貯留域に入ると低下しており, 貯留域で混合・希釈作用が生じているものと考えられる. 第1主成分は地下ダム堤体右岸部(米堤上32・40)で再度上昇し, 堤体下流より高い値を示しており, これらの地点では流動解析から得られた地下水流動場を踏まえると, 止水壁建設時に汽水ゾーンの地下水が残留したことによるものと示唆される. また, 第2主成分は, Ca^{2+} , HCO_3^- , $\text{NO}_3^- - \text{N}$ の主成分負荷量が0.5以上であり, 石灰岩溶解とともに, 農地排水を起源とする水質指標であると考えられる. 第2主成分は, 内陸部から海岸部に向かって高くなる一方, 地下ダム貯留域に入ると低下が認められ, 堤体上流部では更に低くなり, 堤体下流より低い値を示している. Ca^{2+} , HCO_3^- , 及び $\text{NO}_3^- - \text{N}$ は, 地下水流動に伴う石灰岩溶解と窒素負荷源が影響して上流から下流に濃度を上昇させた後, 地下ダム貯留域と堤体上流部では混合・希釈作用で値が低下したものと推察される. その一方, 第3主成分は, DO , ORP と $\text{NO}_3^- - \text{N}$ の主成分負荷量が0.5以上を示しており, 地下水の酸化還元状態と硝化脱窒現象を反映している主成分であると判断される. 第3主成分は, 内陸部から海岸部に向かって低下する一方で, 内陸部から海岸部に向かって高くなる一方, 断層近傍や地下ダム堤体上流部のように滞留場では低い値を示している. 上流から下流に向けた窒素負荷源とともに地下水流動場に伴う流入・混合作用と希釈・脱窒作用が第3主成分の空間分布に関与しているといえる. このように, 調査地域の地下水は, 海塩と石灰岩溶解の自然現象や農地排水・生活排水等の社会経済活動とともに, 地下ダム建設に伴う貯留域場条件等によって水質形成が図られていることが示唆された.

4. まとめ

琉球石灰岩分布帯水層の水質形成機構に関する今回の検討結果が, 今後, 水質管理を含めた適切な地下水利用に活用されることが期待される.

謝辞: 本研究の一部は, 科学研究費助成事業基盤研究(C)で実施されたもので得られた成果である. ここに記して, 謝意を示します.