

# 琉球石灰岩帯水層における 広域地下水流動モデルの構築

## REGIONAL GROUNDWATER FLOW MODEL IN THE RYUKYU LIMESTONE AQUIFER

安元純 阿部真己 中野拓治

Jun YASUMOTO<sup>1</sup>, Masaki ABE<sup>2</sup> and Takuji NAKANO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 農博 琉球大学 農学部 地域農業工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地)

<sup>2</sup>正会員 (株)いであ (〒224-0025 神奈川県横浜市都筑区早淵2-2-2)

<sup>3</sup>正会員 工博 琉球大学 農学部 地域農業工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地)

Groundwater model for understanding and predicting hydraulics and contaminant transport in aquifer make assumptions about the distribution and hydraulic properties of geologic features that may not always apply to karst aquifers. In this study, a finite difference groundwater model (MODFLOW-NWT) was applied to construct an equivalent single layer two-dimensional mathematical model of the Ryukyu limestone aquifer, which is located a southern part of Okinawa main islands. In order to handle problems at regional scale groundwater model in the aquifer, automated parameter estimation method (PEST) was used in this model. Groundwater level measurements collected in 1994 were used to calibrate a steady state model of the study area. This study shows the ability of MODFLOW-NWT and PEST to simulate regional groundwater flow in highly karstified aquifer such as Ryukyu limestone aquifer, which is important for water resource and groundwater management in the area.

**Key Words :** Regional groundwater model, Ryukyu Limestone aquifer, a finite difference groundwater model (MODFLOW-NWT), automated parameter estimation method (PEST), Hydraulic conductivities

### 1. はじめに

石灰岩帯水層は不均一性や異方性が非常に高く、地下水の挙動は他の帯水層と大きく異なっている<sup>1)</sup>。石灰岩中には、岩体の隙間を浸潤する遅い流れや、石灰岩中の管路や割れ目を通り、降雨イベントに対する応答が早い非常に速い流れの地下水が存在する<sup>1)</sup>。そのため、地下水の流れやそれに伴う溶質の輸送などの地下水システムを予測することができる既存の数値モデルが石灰岩帯水層に適用できないことも多い<sup>2)</sup>。

本研究の調査対象地域である沖縄本島南部地域は、図-1に示すように、琉球層群とよばれる石灰岩（以降、琉球石灰岩）が広く分布しており<sup>3)</sup>、断層に伴う急峻な地形勾配や帯水層厚の急激な変化等の複雑な水理地質構造を持つカルスト地形で、シンクホールやケーブ等の空洞も多数発達していることが確認されている<sup>4)</sup>。

琉球石灰岩帯水層における地下水流動やそれに伴う物質輸送に係わる数値シミュレーションの課題は、①断層などによる急峻な地形勾配や帯水層厚の急激な変化等により、広域な地下水流動モデルが収束しにくいこと、②現場揚水試験等で求められる局所的な透水係数や有

効空隙率で帯水層全体を代表することが難しく、広域的な透水係数分布等の水理学的パラメータの推定が課題であること。さらに、③管路のように発達した石灰岩中の空洞や割れ目を流れる非常に速い流れ（非ダルシー流）を考慮することができないことが挙げられる。

本調査対象地域には地下ダムが2基築造されており、地下水が農業用水等の貴重な水資源として利用されている。これまで、本調査地域において、地下水中の硝酸性窒素に関する研究例はいくつか報告されている<sup>5)6)7)</sup>。そのなかで、地下ダム築造による地下水の滞留時間の増加により、地下水中の硝酸性窒素が脱窒により減少している可能性が指摘されている。本調査対象地域において、今後の持続的な地下水利用に資する観点からも、地下ダム築造の地下水の貯留や水質に及ぼす影響を定量的に把握することが不可欠であり、それを可能とする広域を対象とする地下水モデルを用いた数値シミュレーションが求められている。しかし、上述したような課題から、琉球石灰岩分布地域において、持続的な地下ダム水資源管理に有効な広域地下水流動モデルを用いた数値シミュ

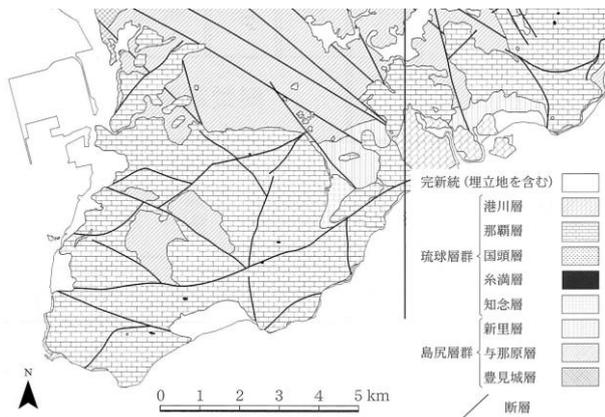


図-1 沖縄本島南部地域の地質図<sup>3)</sup>

レーションはこれまで報告されていないのが現状である。

そこで本研究では、地下水流動解析コードにアメリカ地質調査所 (USGS) 開発のMODFLOW-NWT (Newton solution scheme)<sup>8)</sup>を選定し、地下水モデルのパラメータ推定に有効な逆解析手法 (PEST: Parameter ESTimation code; Doherty, 2010)<sup>9)</sup>を用いて、上述した課題に対応することを目的に、琉球石灰岩帯水層における広域地下水流動モデルを構築し、MODFLOW-NWTの有効性や、PESTにより推定された透水係数の妥当性を評価した。

## 2. 研究方法

### (1) 地下水流動モデル (MODFLOW-NWT)

本研究では、アメリカ地質調査所 (USGS: U.S. Geological Survey) で開発された地下水流動モデル MODFLOW (MODular three-dimensional finite-difference ground-water FLOW model) -NWT<sup>8)</sup>を選定した。

地下水流動の基礎方程式はCVFE (Control Volume Finite Element)法で表すと式(1)のように表せる。これは連続式にダルシー則式(2)を代入して得られるものであり、さらに、水位ベクトル $[h]$ を定義すると式(1)は式(3)に示す線形行列に変形できる。

$$\sum_{m \in n} C_{nm} (h_m - h_n) + HCOF_n (h_n) = RHS_n \quad (1)$$

$$Q_{nm} = C_{nm} (h_m - h_n) \quad (2)$$

$$[A][h] = [b] \quad (3)$$

ここで、 $h_n$ : 格子 $n$ の水位、 $Q_{nm}$ : 格子 $m$ から $n$ への流量 [ $M^3/T$ ]、 $C_{nm}$ : 格子 $n-m$ 間の透過性 [ $M^2/T$ ]、 $HCOF_n$ :  $h_n$ に依存する係数の総和、 $RHS_n$ : 格子 $n$ において $h_n$ に依存しない項の総和、 $[A]$ : 係数行列、 $[b]$ :  $RHS_n$ のベクトルである。

MODFLOWは飽和地下水流れを想定しているため、不飽和層 (ドライセル) の出現 (係数行列が非対称にな

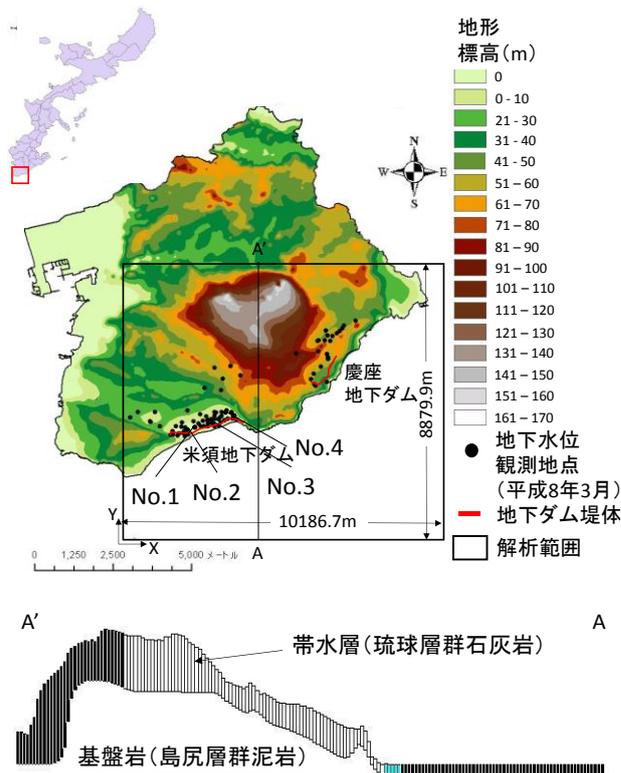


図-2 解析範囲の地形及び地質断面図 (A-A') と地下水位の観測地点

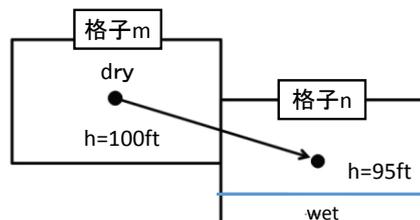


図-3 MODFLOW-NWTにおけるドライセルからアクティブセルへの水の流れの模式図<sup>8)</sup>

る)を想定した行列解法 (ソルバー) が実装されていない。ドライセルの出現を回避するため、疑似的な鉛直流を繰り返し計算し、状況によっては式(3)を行列解法のみではなく、外部の繰り返し計算も行っている。

例えば、カルスト地形でよくみられるように、断層などで急激に地形が変化する場合、図-3に示すように、鉛直1層格子の計算格子における繰り返し計算の中で、格子 $n$ の水面が格子 $m$ の最下面よりも低い水面となる状況が起こりやすい。このような場合、格子 $m$ はドライセルとして認識されるため水位は計算されず、周囲の流れは格子 $m$ にて分断される状況となり、これ以降の繰り返し計算にこの情報が受け渡される。このような状況は、初期値や繰り返し計算中の水位ベクトルの状況に強く依存し、計算途中のドライセル判定は必ずしも物理的に忠実な判定とはならない。このような問題に対処するため、MODFLOW-NWTでは、急激な勾配のある地形において、

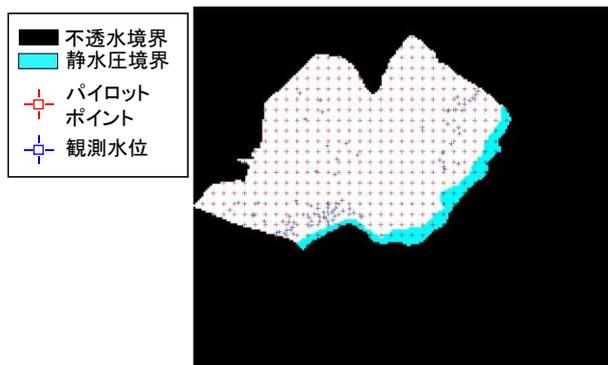


図-4 地下水流動モデルの境界条件及びパイロットポイントの配置と観測水位の位置

図-3に示すようにドライセル(格子m)からアクティブセル(格子n)への流量を行列計算の中で状況に応じて水位が計算できるようにコーディングが変更された<sup>8)</sup>。

具体的にはNiswonger(2011)<sup>9)</sup>に記されているように、ドライセルとして判定された格子も水位ベクトル[h]のメンバーから除外せず、水位0のまま行列計算を行うようなコーディングとなっている。このようなコーディングを行う場合において、図-3の状況を考えると、ドライセルである格子mの水位は0であるが、格子nとの水位差は5ft (100ft - 95ft) あるため、ドライセルからの流量が発生するという不自然な状況になる。このような状況を回避するため、格子間の透過率を水位が高い側の条件のみに依存して流量が計算される上流化するコーディングとなっている。この上流化により、ドライセルから本来存在するはずのない流量供給があるという状況は回避できる。その他にも、複雑な断層地形でも柔軟にドライ/アクティブのスイッチを適用可能なハンドリングのし易さの向上を目的として、ドライ/アクティブのスイッチに非線形な関数を用いた判定を採用しており、外部の繰り返し計算も非線形な関数型に対応したNewton法を採用している。

以上の理由より、本研究で用いる地下水流動モデルはMODFLOW-NWTとした。

## (2) 正則化法を用いた逆解析手法

地下水モデルにおけるキャリブレーションは、安定的な手法であることが求められ、透水係数などの水理学的パラメータの不均一的な分布を推定するのに用いられることが多い。地下水モデルは、得られる観測値の数に比べて非常にパラメータが多いためキャリブレーションが難しく、正則化法を用いた逆解析(非常に数の多いパラメータの推定に有効な数学的アプローチ)が一般的となってきた<sup>10)</sup>。特に、Doherty(2010)<sup>9)</sup>により非線形パラメータ推定法として開発されたPEST(Parameter ESTimation code)は、地下水モデルのキャリブレーションに有効とされ、MODFLOWとの連携もサポートされていることから、地下水流動解析に広く利用されるようになってきた。PESTで

表-1 解析条件

パラメータ	値
初期条件	100m
地層区分	1層
グリッド間隔	50m
地下水涵養量	0.003m/day
有効空隙率	0.2
PESTでターゲットとする観測水位	地下ダム建設前(平成8年3月)の地下水位

はパイロットポイントと正則化の組み合わせにより、地下水位や地下水中の溶質濃度などの観測データをターゲットに、地下水モデルに必要となると透水係数などの水理学的パラメータを逆解析することが可能である。

パイロットポイントを基準に地下水モデルの解析領域に水理学的パラメータ値を配分する手法は、計算グリッドやメッシュの要素に直接値を代入するよりも有効とされている<sup>10)</sup>。

なお、パイロットポイントpは次のように定義される。

$$k = Lp \quad (4)$$

ここで、p:パイロットポイントのベクトル(観測値のある格子の水理学パラメータのみで構成されたベクトル)、k:パラメータのベクトル(全ての格子のパラメータで構成されたベクトル)、L:selection operatorとする。Lは、任意の座標の水理学パラメータがパイロットポイントからどのように決められるか(補完されるか)を定義しており、ここでの補間方法はクリギングが使用されている。

本研究では、PEST<sup>9)</sup>を逆解析手法に選定し、地下ダム建設前(平成8年3月)に実施された地下水位の観測値(93地点)を基に、広域的な透水係数の分布の推定を試みた。ターゲットとなる地下水位の観測地点とPESTで使用するパイロットポイントを図-4に示す。総パイロットポイント数は369個となっている。

## (3) 解析対象領域及び解析条件

解析対象領域は、図-2に示すように、経度127°40'9.20"E、緯度26°3'22.86"Nを基準点とした、x方向10186.7m、y方向8879.9mの範囲で、米須地下ダム及び慶座地下ダム流域を含む範囲とした。地表面の標高および不透水層となる島尻層群泥岩の上面の標高は、沖縄総合事務局(2006)<sup>11)</sup>を基に作成した。

計算格子間隔はx、y方向ともに51mとし、総計算格子数は34800個(174列、200行)で、そのうち不透水境界や静水圧境界を除いたアクティブセル数は9142個となる。

解析場の条件と地層区分は、解析対象範囲が琉球石灰岩からなる不圧帯水層であること、上述したように、地下水モデルにおける地層区分を増やすほどドライセルが出現しやすくなること及び、今回の解析目的が広域の透水係数の推定であることから1層とした。そのため、本地下水流動解析は平面2次元となる。

境界条件は、図-4に示すように、海側境界を圧力水頭

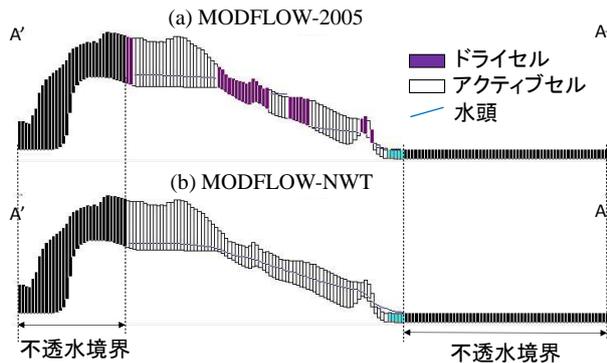


図-5 A-A' 断面における (a) MODFLOW-2005 (PCG2<sup>11</sup>) ソルバー及び (b) MODFLOW-NWT (CGSTAB ソルバー) におけるドライセルの出現状況

0mの静水圧境界 (GHB : General Head Boundary)<sup>12)</sup> とし、陸側境界は地形勾配及び断層に沿った不透水境界とした。

透水係数に関しては、上述したように、PESTを用いて推定することとした。

地下水涵養量及び有効空隙率に関しては、今回の解析では、一定値を使用することとし、同じ地質年代の石灰岩帯水層で構成され気候条件も近いフロリダ州のビスケン帯水層の値<sup>14)</sup>を参考に、地下水涵養量0.003m/day、有効空隙率0.2とした。理由としては、間隙率や地下水涵養量を求めるために必要な、降雨イベントに対する1時間毎の地下水位のモニタリングや現場用水試験等のデータが得られていないことによる。なお、解析は、地下水位が平衡状態に達するまでの非定常解析とした。

### 3. 結果と考察

#### (1) MODFLOW-NWTとMODFLOW-2005の比較

上述したように、琉球石灰岩帯水層における地下水流動解析に関する課題①として、MODFLOWなどの代表的な地下水流動モデルが収束しにくいことを挙げた。そこで、MODFLOW-2005<sup>12)</sup>とMODFLOW-NWTを用いて、両者に同様の値を与えた数値シミュレーションを実施し比較した。水理学的パラメータ、初期条件及び境界条件は図-4及び表-1に示すとおりで、透水係数は30m/dayを与えた。

図-5(a)に示すように、MODFLOW-2005を用いた場合、計算格子が乾燥を示すドライセルが出現しており、地下水の流れを分断する結果となっている。この原因としては、MODFLOW-2005では、ドライセルや計算したい領域の外側の流れを計算しない格子は、水位ベクトル $[h]$ のメンバーに含まず、ドライセルのアクティブセルへのスイッチによる水位ベクトルの拡張をタイムステップごとに行っている。そのため、不意に出現したドライセル周辺の格子では全く流れが生じない領域外の格子となって

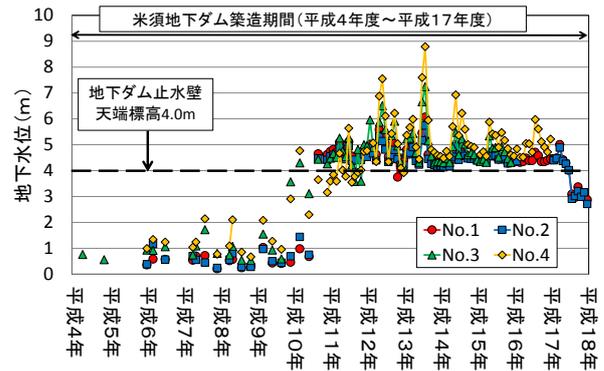


図-6 地下ダム築造中 (平成4年～18年) の地下水位の変化

しまい、図-5(a)のようなドライセルの箇所に壁があるような水位の分布になるMODFLOW-2005を含む従来のシリーズでは、断層地形のように急降下するような地形では、自由水面を滑らかに接続させるようなパラメータの調整が難しく、実際パラメータを慎重に選定しないと平面2次元の格子表現であっても図-5(a)のように水面が分断され、不自然な水位の分布となってしまう。特に、琉球石灰岩のように、断層に伴う急峻な地形勾配や帯水層厚の急激な変化等の複雑な水理地質構造を持つカルスト地形でこのような状況が起こりやすい。

次に、図-5(b) MODFLOW-NWTを用いて数値シミュレーションを実施した結果を示す。図より、MODFLOW-NWTではドライセルも出現せずに計算も収束しており、地下水位が計算されていることが確認できる。これは、ドライセルとなった計算格子をアクティブに保つコーディングの変更と共に、式(3)に示した係数行列 $[A]$ の非対称化に対応した行列解法ソルバーCGSTAB (xMD)と、計算格子間の水平流のスムージングによる非線形化に対応した非線形解析用ソルバーNewton-Krylov法がそれぞれ適用されていることによるためと考えられる。

以上のことから、MODFLOW-NWTは沖縄本島南部地域のカルスト地形にみられるような琉球石灰岩帯水層における地下水流動解析に適していることが確認された。計算負荷の小さい粗い地形表現で、かつ複雑な形状の地形条件におけるパラメータ群の絶妙な調整を行わなくても安定して計算が流れることは、非常に実用上的であるといえる。

#### (2) PESTを用いた広域な透水係数の推定

図-6に、図-2に示したNo. 1～No. 4の観測井戸における、米須地下ダム築造期間中 (平成8年～平成17年) の地下水位の経時変化を示す。図からも明らかなように、地下ダム堤体付近に位置する観測地点の地下水位は、地下ダム築造に伴い、地下ダム止水壁の天端の標高である4mまで急激に上昇していることが確認できる。そのため、PESTを用いた逆解析のターゲットとなる観測地下水位は、地下ダム築造の影響を受ける前の平成8年3月に実施された観測結果を用いることとした。

図-7に、PESTを用いて推定した解析領域における透

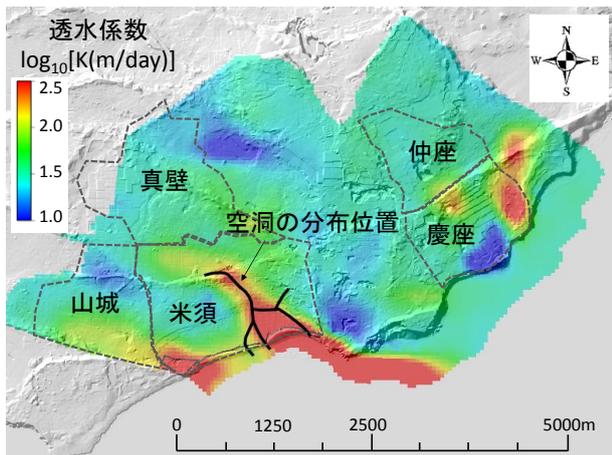


図-7 PESTによる透水係数の推定結果と空洞分布位置の比較

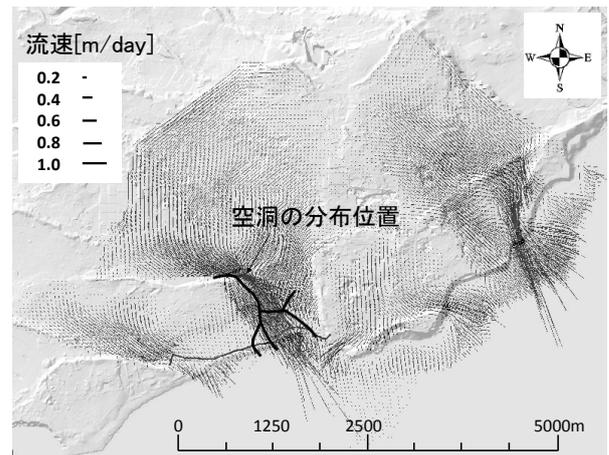


図-9 琉球石灰岩帯水層における地下水流動状況

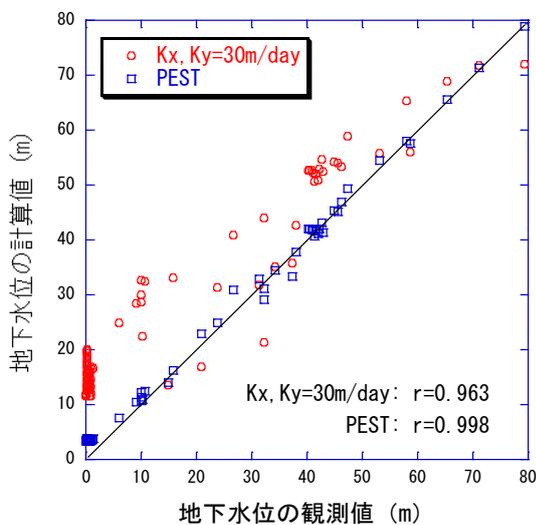


図-8 透水係数にPESTを利用した場合と一定値を与えた場合の地下水位の観測値と計算値の比較

透水係数分布の推定結果を示す。図中の透水係数の表示は  $\log_{10}[K(\text{m/day})]$  としている。PESTより推定された透水係数は  $4.2\text{m/day} \sim 8.1 \times 10^4\text{m/day}$  ( $4.8 \times 10^{-3}\text{cm/sec} \sim 9.3 \times 10^1\text{cm/sec}$ ) の範囲に分布する結果となった。なお、図中に示した透水係数  $\log_{10}[K(\text{m/day})]$  の表示範囲は、違いが鮮明になるように  $1 \sim 2.5$  の範囲としている。

エリアごとにみると、比較的透水係数が高く推定された解析領域の西部の沿岸域（米須地区）では、現場揚水試験により推定された透水係数<sup>13)</sup>の値も  $16.4\text{m/day} \sim 380.2\text{m/day}$  ( $\log_{10}[K(\text{m/day})]$ :  $1.2 \sim 2.5$ ) と比較的高い値を示している。また、同エリアでは、ケーブ等の空洞の分布が確認されており、図-8に、これまで確認されている空洞の分布状況図<sup>4)</sup>を基に作成した空洞の位置を併示すると、PESTにより推定された米須地区の高透水性領域と空洞の分布位置とよく対応していることがわかる。また、慶座地下ダムのある慶座地区の西側領域では低透水領域がみられるが、東側領域には高透水領域もみられる。慶座地区における現場揚水試験により推定

された透水係数は  $7.4\text{m/day}$  と小さいが、同地区には高透水領域が存在する可能性が示唆された。米須地区の上流側に位置する真壁地区は、現場揚水試験により推定された透水係数が  $6.4\text{m/day}$  と解析範囲においては一番小さな値を示している。PESTにより推定された透水係数も  $\log_{10}[K(\text{m/day})]$  が  $2$  を超えるような高透水領域はみられていない。一方、現場揚水試験により推定された透水係数が一番大きな値 ( $380.2\text{m/day}$ ) である山城地区においては、米須地区と隣接する断層沿いでは比較的高い透水係数を示している。仲座地区では、現場揚水試験の結果、透水係数は  $51.8\text{m/day}$  と推定されており、 $\log_{10}[K(\text{m/day})]$  で  $1.7$  程度であるが、PESTを用いた推定結果では、 $\log_{10}[K(\text{m/day})]$  が  $1.5 \sim 2.0$  の範囲に分布していることが確認でき解析結果の妥当性が確認できる。

図-8にPESTを用いて推定した透水係数を与えた場合と、一定値 ( $30\text{m/day}$ ) を与えた場合における地下水位の観測値と計算値を比較した図を示す。PESTを用いて推定した透水係数を与えた場合は、一定値を与えた場合に比べ、地下水位の低い場所から高い場所にかけて計算値と観測値が非常によく一致していることが確認できる。

以上のことから、PESTにより推定された高透水領域は確認されている空洞の分布位置などとよく対応しており、揚水試験とPESTを用いた透水係数の推定結果とは、比較的近い値を示す地区があった。その一方で、現場揚水試験では確認されていない高透水領域が慶座地区で推定された。つまり、地下水位をターゲットにしたPESTを用いた逆解析を実施することで、琉球石灰岩のように不均一性の高い帯水層における透水係数の分布をある程度把握できる可能性が示唆された。今後、現場ボーリングデータを基に3次元地質構造を整理し、詳細に検証していく予定である。

### (3) 琉球石灰岩帯水層における地下水流動状況

図-9にPESTにより推定した透水係数分布を基に、琉球石灰岩帯水層における地下水流動解析を行った結果を

示す。解析領域の西側の米須地区へ流下する地下水の流れは大きく2つの経路に大別できる。一つの流れは、米須地区の上流と下流を分断する断層の基盤岩が最も低くなっている東側に地下水が集中して流れており、断層通過後はそのまま海岸まで比較的まっすぐに流れている。この地下水が集中する流線は空洞の分布位置とも重なっていることが確認できる。もう一方の流れは、断層の西側に回り込み、山城地区から米須地区へ流れが確認できる。慶座地区においても、地下ダムが築造されている場所に地下水が集中して流れている様子がわかる。

以上のように、地下ダム築造前の地下水位をターゲットにしたPESTを用いた逆解析により、広域的な透水係数の分布を推定することで、地下ダムを築造する以前の地下水流動状況を再現することが出来き、本来ならばダルシー則が適用できない空洞部分も高い透水係数を設定することで、擬似的にはあるが琉球石灰岩帯水層の地下水流動系を表現できることがわかった。

#### 4. まとめ

本研究では、琉球石灰岩帯水層における地下水モデルを用いた数値シミュレーションにおける3つの課題に対応するため、地下水モデルにMODFLOW-NWTを選定し、地下水モデルのパラメータ推定に有効な逆解析手法(PEST)を用いて、琉球石灰岩帯水層における広域地下水流動モデルの構築を試みた。

その結果、MODFLOW-NWTが沖縄本島南部地域にみられるカルスト地形のような、断層に伴う急峻な地形勾配や帯水層厚の急激な変化等の複雑な水理地質構造を持つ石灰岩帯水層の地下水流動解析に有効であること示された。さらに、PESTを用いて推定した透水係数は、16.4m/day~380.2m/dayの範囲に分布しており、現場揚水試験の結果とも比較的整合性があり、これまで確認されている空洞などの分布状況図を重ね合わせた結果、高透水係数領域と空洞分布位置とが比較的よく対応していた。つまり、本来ならばダルシー則が適用できない空洞部分にも高い透水係数を設定することで、擬似的にはあるが、琉球石灰岩帯水層における地下水流動系を表現できることがわかった。

今後は、今回の解析では一定値に固定した有効空隙率や地下水涵養量の分布状況を、透水係数と同様、PESTを用いて推定し、地下ダム築造にともなう地下水の貯留効果や滞留時間の変化などの定量的な評価につなげていく予定である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、内閣府沖縄総合事務局土地改良総合事務所、沖縄県南部農林土木事務所、沖縄本島南部土地改良区の関係各位に多大の御援助と御協力を

頂いた。また、MODFLOW-NWTやPESTの使用にあたってアメリカ地質調査所フロリダタンパオオフィスの水文学者Joseph, D. Hughe氏や九州大学名誉教授神野健二先生に多くの助言をいただいた。ここに記して深甚の感謝を表す。

#### 参考文献

- 1) Bakalowicz, M.: Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeology Journal*, 13(1), pp.148–160, 2005.
- 2) Ghasemizadeh et al.: Groundwater flow and transport modeling of karst aquifers, with particular reference to the North Coast Limestone aquifer system of Puerto Rico, *Hydrogeo J.*, 20(8), pp. 1441–1461, 2012.
- 3) 氏家宏ほか：那覇及び沖縄市南部地域の地質，地域地質研究報告：5万分の1地質図幅，地質調査所編，産業技術総合研究所地質調査総合センター，2006.
- 4) 沖縄県農林水産部村づくり計画課：平成24年度糸満市潜水地域調査測量業務報告書，2013.
- 5) 吉本周平，土原健雄，石田聡，今泉眞之：米須地下ダム流域における地下水硝酸性窒素濃度の動態について，農村工学研究所技報，206，pp.195～208，2007.
- 6) 安元純，聖川健斗，仲栄真史哉，砥綿泰弘，中野拓治：多変量解析を用いた石灰岩帯水層における地下水水質の統計的分類，土木学会論文集 B1(水工学)，69(41)，L\_595-L\_600，2013.
- 7) 中野拓治，安元純，寺澤春奈，名和規夫：地下水硝酸性窒素濃度の時空間分布と形成要因について—沖縄本島南部中級石灰岩分布地域を例として—，農業農村工学会論文集，286，283-291，2013.
- 8) Niswonger R. G. et al.: MODFLOW-NWT, A Newton Formulation for MODFLOW-2005, USGS Techniques and Methods 6-A37, 2011.
- 9) Doherty J.E. and R. J. Hunt: Approaches to Highly Parameterized Inversion: A Guide to Using PEST for Groundwater-Model Calibration, USGS Scientific Investigations Report 2010-5169, 2010.
- 10) Doherty J.E.: Ground water model calibration using pilot points and regularization, *Ground Water*, 41(2), pp.170-7, 2003.
- 11) 沖縄総合事務局：平成17年度沖縄本島南部農業水利事業地下ダム水質予測検討業務報告書，2006.
- 12) Harbaugh, A.W.: MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model—the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16, 2005.
- 13) 沖縄総合事務局本島南部農業水利事業所：沖縄本島南部農業水利事業—技術誌一，2006.
- 14) Christian D. Langevin: Simulation of Ground-water Discharge to Biscayne Bay, Southeastern Florida, U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 00-4251, 2001.

(2014. 9. 30 受付)