

炭酸塩岩帯水層における不均質性を考慮した地下水 シミュレーション手法に関するレビュー

メタデータ	== T. Japanese		
スタナータ	言語: Japanese		
	出版者:		
	公開日: 2019-03-30		
	キーワード (Ja):		
	キーワード (En): Aquifer management, Karst hydrology,		
	Conduit flow, Distributed groundwater model, Ryukyu		
	Limestone, Subsurface dams, Freshwater lens		
	作成者: 吉本, 周平, 土原, 健雄, 白旗, 克志, 中里, 裕臣,		
	石田, 聡		
	メールアドレス:		
	所属:		
URL	https://doi.org/10.24514/00001148		

© 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

炭酸塩岩帯水層における不均質性を考慮した 地下水シミュレーション手法に関するレビュー

吉本周平* 土原健雄* 白旗克志* 中里裕臣* 石田 聡*

*地域資源工学研究領域地下水資源ユニット

要旨

石灰岩などの炭酸塩岩からなる帯水層に形成された洞窟網は、地下水流動と物質輸送の様態に大きく影響している。最近の論文で用いられる分布型シミュレーションモデルは、炭酸塩岩帯水層の不均質性を表現する方法によって、等価多孔質媒体(EPM)モデルで計算領域を区分して異なる透水係数を与えるものと、洞窟網を通過するパイプフローを水理学的に記述するプログラムを付加するものに大別できる。EPM モデルではパイプフローによる非線形な流れが表現されず、不均質な帯水層での物質輸送を適切に再現できないと指摘されている。一方、パイプフローを考慮した物質輸送モデルは、EPMに比べて現実に近い表現が可能であるが、精確なモデル化のためには洞窟網の空間的な情報が必要である。本邦の南西諸島では、透水性の不均質性が示唆されるものの洞窟網の存在が不明な地区では EPM モデルの利用が第一選択となり、一方で洞窟の存在が明らかな地区ではパイプフローを水理学的に考慮したモデルが利用可能といえる。

キーワード: 帯水層管理, カルスト水文学, パイプフロー, 分布型モデル, 琉球石灰岩, 地下ダム, 淡水レンズ

1 緒 言

グローバルな水資源問題について、近年、国際連合が掲げている持続可能な開発目標(SDGs)に関連してしばしば議論されている。SDGs の 17 のゴールのうち、「Goal 6: Ensure access to water and sanitation for all」においては、統合的な水資源管理の必要性が示され、特に水資源を地下水に依存している国や地域では持続的な帯水層管理が必要であることが説かれている(UN Environment, 2018)。

これまで、多くの数学的な手法によって最適な地下水管理の方法が探索されてきた(Gorelick and Zheng, 2015)。地下水の農業への利用可能性についても、数多くのシミュレーションによるアプローチで検討されている(例えば、Singh, 2014)。また、将来予測される気候変動が与える地下水資源への影響もシミュレーションによって議論されている(Kurylyk and MacQuarrie, 2013; Meixner et al., 2016)。大陸〜グローバルのスケールだけでなく、流域規模の地下水資源の将来予測や管理方針の策定においても数値的な手法は不可欠となっている。

石灰岩などの炭酸塩岩からなる帯水層は世界中に広く分布し、その透水性と間隙率の高さから重要な地下水の供給源となっている。炭酸塩の溶解によって特徴付けられた地形をカルスト地形と呼ぶが、その中でも洞窟(鍾乳洞)の存在は地下水流動において重要な役割を有している。このような帯水層を数値モデル化する方法は、その複雑な不均質性のために、一般的な(非カルストの)帯水層を対象としたシミュレーションと比べて進展が遅れているといえる(例えば Kresic, 2013)。

本邦では、主に南西諸島において第四紀の琉球石灰岩が広く分布し、島嶼部の貴重な水資源を胚胎している。これまで、農業用水の確保を目的として、宮古島の国営土地改良事業(2001年完了)を皮切りとして南西諸島各地で大規模な地下ダムが建設され(Ishida et al., 2011)、これ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。また、多良間島では、帯水層中で海水に浮かぶ形で存在する淡水(淡水レンズ)を農業用に利用するための検討がなされている。

今後,これらの地下水を持続的に利用していくためには, 地下水シミュレーションモデルの高度化が求められる。こ れらの大規模な地下ダムでは、事業計画の際に均質な帯水 層に用いられるモデルによって水収支計算がなされ、現在 これに基づいた運用がなされている。それらの中で,沿岸 部に建設された塩水侵入阻止型の地下ダムでは, 止水壁の 上流に塩水が残留し、その挙動が貯留域内の地下水流動の 影響を受けうること (吉本ら、2015) から、地下水の収支 だけでなく淡水と塩水の間の溶質の挙動をも理解する必要 があることが明らかになってきた。また、淡水レンズでも 同様に、塩淡境界付近の遷移帯における地下水の流れと溶 質の挙動が淡水資源量の変動に影響するといえる(例えば, Underwood et al., 1992)。洞窟網が発達している琉球石灰岩 では、その透水性は極めて不均質である。物質輸送の解析 においては、地下水流動場によって移流だけでなく分散も 影響を受けることから, 不均質な帯水層での物質輸送解析 では、単に水収支を求める場合に比べてより精緻なモデル 化が必要になると思われる。

そこで、本稿では、パイプフローが発生する炭酸塩岩帯

Table 1 対象とした雑誌の1998年から直近(2018年9月14日)までのWoS登録記事の全件数,ならびに本文中で説明された条件検索によって絞り込まれた記事の件数

Results of the WoS search: The numbers of the all registered articles, and those extracted by the search in WoS under the following conditions: 1. The topic include the words of "groundwater" and either "simulation" or "numerical model"; 2. The topic include the words of either "carbonate", "karst", or "cave" in addition to the above; and 3. By reading the abstract it includes contents related to groundwater simulation in heterogenous carbonate aquifers among the above.

	All	Condition 1	Condition 2	Condition 3
Journal of Hydrology	10,300	959 (9.31%)	58 (0.56%)	31 (0.30%)
Water Resources Research	9,305	944 (10.15%)	34 (0.37%)	15 (0.16%)
Hydrological Processes	6,369	341 (5.35%)	17 (0.27%)	5 (0.08%)
Hydrology and Earth System Sciences	3,726	216 (5.80%)	10 (0.27%)	5 (0.13%)
Groundwater	2,488	279 (11.21%)	14 (0.56%)	5 (0.20%)
<i>Hydrogeology Journal</i>	2,278	537 (23.57%)	49 (2.15%)	27 (1.19%)
Environmental Earth Sciences	10,463	454 (4.34%)	58 (0.55%)	23 (0.22%)
Total	44,929	3,730 (8.30%)	240 (0.53%)	111 (0.25%)

水層を対象とした地下水シミュレーションモデルの既往事 例を整理し、現時点で利用可能な手法についてとりまとめ る。また、各モデル分類について利点と制約を把握し、南 西諸島の琉球石灰岩帯水層での適用可能性を議論する。

2 最近の研究の動向

2.1 地下水シミュレーションを扱う学術誌

地下水シミュレーションは地下水に関連する広い分野で用いられているが、本稿では水文学や水文地質学を取り扱う雑誌を対象として、最近の研究の動向を Web of Science (WoS) での記事検索によって分析した。本分析では、後述のようなシミュレーションモデルが計算機の普及とともに発展した時期が 2000 年前後より後であることから、1998年から直近(検索日:2018年9月14日)までの20年余りの間に出版された記事を対象とした。本分析で対象とした雑誌における記事の全件数、ならびに下記の各条件での検索で該当した件数を Table 1 に示す:

- (1) トピック (標題, 要旨, キーワード) に「groundwater」を含み, かつ「simulation」か「numerical model」のいずれかを含む;
- (2) 上記の条件に加えて、トピックに「carbonate」,「karst」 または「cave」のいずれかを含む;
- (3) 上記の条件を満たす記事について、要旨を読み取り、 不均質な炭酸塩岩帯水層での地下水シミュレーショ ンに関連性がある論文を抽出。

これらについて、条件(1)は地下水シミュレーションに関する記事を、条件(2)はこのうち炭酸塩岩帯水層または空洞を有する帯水層を対象とした記事を、それぞれ機械的な検索によって抽出した。条件(2)で抽出された記事には、地下の天然ガス溜まり(gas cavern など)や地下水質(bicarbonate ion など)に関する論文や、巻頭辞など論文でない記事も含まれるため、条件(3)では各記事の要旨を読み取り、不均質

な炭酸塩岩帯水層での地下水シミュレーションに関連する 論文のみを抽出した。対象とした雑誌では、地下水シミュ レーションを扱う記事は全体の 8.30%、不均質な炭酸塩岩 帯水層を対象とした論文に限ると 0.25%のみが該当する。 地下水研究を主なスコープとする Groundwater と Hydrogeology Journal では、全体に対する地下水シミュレー ション研究の記事の割合はそれぞれ 11.21%と 23.57%で比 較的高かったが、条件(2)と(3)で絞り込めばそれぞれ 0.20% と 1.19%であり限定的であった。

地下水シミュレーションによる研究の論文は **Table 1** の 雑誌以外にも存在するとともに,条件(1)と(2)での機械的な 検索では捕捉できていない論文の存在が考えられるため,関連する論文の実数は **Table 1** に示すものより多いと思われる。しかし,条件(3)を満たす論文が 100 件を超えている ため,本稿での分析に十分な数が得られたと考える。

2.2 使用されるシミュレーションモデルの傾向

前節の条件(3)による検索で抽出された 111 件の論文について、論文内で開発されている、または用いられているシミュレーションモデルを特定して、その手法に応じて分類した。結果は Fig. 1 に示すとともに、分類の概説と適用例を Table 2 に示し、それぞれの具体的な説明は後述する。手法は分布型モデル(Distributed model)と集中型モデル(Lumped model)に大別され、前者は 2 次元あるいは 3 次元の状態分布を推定するもの、後者はある地点の地下水位または湧水の流出量を推定する集中型のものをそれぞれ指している。その他(Others)には、カルスト進化を模擬するモデルや洞窟ネットワークの幾何的関係を推定するモデル、炭酸塩岩帯水層に適用されたがモデル自体は不均質性を考慮していないもの、ならびに降水から地下水流動の過程をハイドログラフ分析によって検討しているものなどが含まれる。

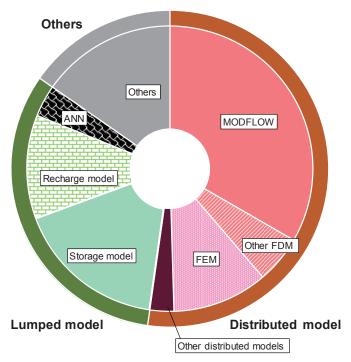


Fig. 1 本文中の条件(3)によって WoS 検索から抽出された論文に用いられているシミュレーションモデルの分類 Classification of the types of numerical models used in the papers collected by the WoS keyword search under the condition 3 shown in **Table 1**

2.3 モデル化で考慮すべき炭酸塩岩帯水層の性質

炭酸塩岩帯水層における地下水流動について、特に帯水層の透水性の不均質さに関しては、地下水研究の分野で広く関心の対象となっている(例えば、吉本ら、2008)。

岩石中の間隙は、一般に、一次的なものと二次的なものに区分され、前者は堆積によって生じる粒子間の初期空隙であり、後者は褶曲や断層などの破砕だけでなく化学的風化や溶解によっても生じる(例えば、小鯛、1984)。石灰岩などの炭酸塩岩は、サンゴや有孔虫など炭酸塩による骨格を持つ生物遺骸の堆積物や化学的な沈殿物が続成作用を受けることによって形成され、堆積時の空隙が一次間隙となる。その後、時間の経過に伴って、浸透した雨水による溶解によって空隙が拡大し、ドリーネや鍾乳洞のようなカルスト地形が形成される。カルスト地形は炭酸塩の溶解によって継続的に発達し、二次間隙は拡大する。

Quinlan and Ewers (1985) の説明によると、炭酸塩岩帯水層では、炭酸塩岩が形成された時点では一次間隙が優勢であり主に Darcy 則(水理勾配に流量が比例)に従った層流による分散的な地下水の流れ(マトリックスフロー)であるが、徐々に亀裂や節理が広がってそれらを通過する地下水(亀裂フロー)が現れ、さらに時間が経過すると発達した洞窟網を乱流状態で流れる地下水(パイプフロー)の割合が増大していくとされている。流れの状態に関しては、レイノルズ数(流速と粘性の比)によって層流か乱流かの判断がなされることが一般的で、地下水についてはレイノルズ数が大きくなるといわゆる非線形流れとなり、さらには乱流となって Darcy 則が成り立たなくなることが知られている(例えば Freeze and Cherry, 1979)。シミュレーション

においては、亀裂フローはしばしば連続体での流れとしてマトリックスフローと同様に扱われるが、パイプフローについては、例えば Liedl et al. (2003) は直径 50 cm 以上の連続する二次間隙をパイプフローが発生する洞窟網とみなしている。

二次間隙の拡大に伴って地下水がパイプフローとして選択的に流れるようになると同時に、物質輸送もパイプフローの影響を大きく受けるようになる。Ford and Williams (2007) は、カルスト帯水層における地下水中の汚染物質の挙動について、洞窟網を通過するパイプフローによって汚染物質が速やかに移動する一方で、化学的反応や吸着による化学物質の減衰は比較的小さくなることから、カルスト帯水層での地下水汚染はより深刻になりうることを指摘している。一方で、地下水硝酸性窒素の動態に関しては、マトリックスフローによる輸送が大きく寄与しているとする研究結果(例えば Peterson et al., 2002)もある。沿岸部や島嶼部における塩水と淡水の挙動については、洞窟網への塩水または淡水の侵入を把握した上で、マトリックス部と洞窟網との間の溶存物質のやりとりを理解する必要がある。

このように、カルスト化が進み洞窟網が発達した炭酸塩 岩帯水層で地下水シミュレーションを実行するためには、 水や溶質の挙動が比較的均質な帯水層とは異なることか ら、パイプフローを考慮したモデル化が不可欠である。

3 シミュレーションモデルの分類

本章では、WoS 検索で抽出された論文での事例を示しつつ、各モデル分類について概説する。

Table 2 WoS 検索から抽出された論文に用いられているシミュレーションモデルの分類と適用事例 Categorizations of the simulation models and their example in application, extracted by the pattern searches in WoS.

モデルの分類	該当数	特徴	主な適用事例
分布型モデル			
差分法モデル	43	矩形メッシュ。比較的モデル化が容易。MODFLOWで利用。	M2ME(Giudici and Margiotta, 2012)など
(内、EPMとしてのMODFLOW)	(25)	不均質性はグリッドごとの透水係数の差として表現。	Scanlon et al., 2003; Romanazzi et al., 2015など
(内、MODFLOW-CFP, CAVE)	(12)	パイプフローを水理学的方程式で記述し、非線形流れを表現。	Gallegos et al., 2013; Xu et al., 2015など
有限要素法モデル	12	メッシュ形状を自由で、境界条件をより厳密に設定できる。	Oehlmann et al., 2015など
他の分布型モデル	3	目的次第だが、計算負荷が大きいものもある。	粒子法(Masciopinto and Palmiotta, 2013)など
集中型モデル			
貯留型モデル	19	帯水層をタンクに見立てる。地下水位や湧水量をよく再現。	Fleury et al., 2007; Perrin et al., 2007など
涵養モデル	13	鉛直浸透モデルによって、早い浸透流を表現可能。	Nikolaidis et al., 2013; Neukum et al., 2008など
ブラックボックスモデル	4	物理的意味を有さないが、降水と流出の関係をよく再現。	Kurtulus and Razack, 2007など
その他	17		
Total	111		

3.1 分布型地下水流動モデル

地下水の状態を2次元または3次元の分布として計算機的に模擬するためには、空間を小メッシュに分割し、これらのメッシュ間の関係性を表すように支配方程式を離散化する必要がある。この離散化の方法として、主要なものに差分法(Finite difference method; FDM)と有限要素法(Finite element method; FEM)が挙げられる。

3.1.1 差分法モデル

差分法は、微分方程式を数値的に解くために、微分を隣接するメッシュ間の差分に近似する手法である。差分法は後述する有限要素法に比べて直感的でモデル化が容易とされているが、実際には MODFLOW などのパッケージ化されたソフトウェアがよく用いられている。

MODFLOW

最もよく用いられている差分法パッケージとして、アメリカ地質調査所 (USGS) による MODFLOW が挙げられる。1984 年に初版がリリースされ (McDonald and Harbaugh, 1984), 2006 年に現在広く使われている MODFLOW-2005 (Harbaugh, 2005) がリリースされた (2017年には有限体積法による MODFLOW 6 がリリースされている; Langevin et al., 2017)。本稿での文献調査においては、この単一のパッケージ群 (MODFLOW-2005 またはそれ以前の版) による事例が全件数のおよそ 3 分の 1 を占める (Fig. 1)。

地下水の流れを記述する最も一般的な法則として、水理 勾配 ∇h [-]と比流量 \mathbf{q} [L \mathbf{T}^{-1}]との比例関係を示した Darcy 則がある:

$$\mathbf{q} = -\mathbf{K} \, \nabla h = - \begin{pmatrix} K_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & K_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & K_{zz} \end{pmatrix} \cdot \nabla h \tag{1}$$

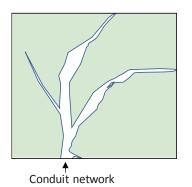
ここで、h はピエゾ水頭 [L]、K は透水係数テンソル、 K_{xx} K_{yy} 、 K_{zz} はそれぞれx 方向、y 方向、z 方向の透水係数[L T^{-1}] である。MODFLOW において地下水流動は、Darcy 則と連続式(質量保存則)から導出される、水頭分布に関する 2

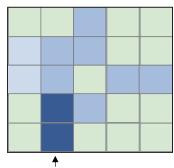
階の偏微分方程式によって記述される:

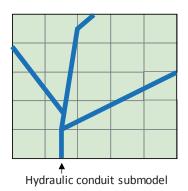
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + Q'_{s} = S_{e} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 Q'_s は系への流入(負であれば流出) $[T^{-1}]$ 、 S_e は帯 水層の比貯留係数 $[L^{-1}]$, t は時間[T]である。矩形のグリッ ド内では水理特性が均一であると仮定しているが、グリッ ドごとにパラメータを異なる値で与えることができるた め,透水性が不均質な炭酸塩岩帯水層では特定の領域にの み透水係数の値を大きく設定することもできる。このよう に、グリッド内の水理特性(ここでは特に透水性)が均一 と仮定することを指して, 等価多孔質媒体 (Equivalent porosity medium; EPM) によるシミュレーションと呼ばれる (Fig. 2)。EPM での MODFLOW の適用例は、アメリカ合衆 国の各地 (Rayne et al., 2001; Scanlon et al., 2003; Worthington, 2009; Yager et al., 2013; Sutton et al., 2015) やヨルダン川西岸 (Ben-Itzhak and Gvirtzman, 2005; Abusaada and Sauter, 2013), ポーランド (Witkowski et al., 2003), イタリア (Dragoni et al., 2013; Cherubini et al., 2013) など数多くある。これらの事例 では、亀裂や洞窟が多くみられる範囲のグリッドに大きな 値の透水係数を与えることで、特定の地点の地下水位や湧 水流量をよく再現している。Worthington (2009) は、既知 の洞窟網に沿ったグリッドに非常に高い透水性を与えるこ とで、EPM によるモデルでも洞窟に沿った流れを表現でき ることを示している。MODFLOW については、その結果か ら流跡線を描くための外部プログラムである MODPATH (現在の版は Version 7; Pollock, 2016) が公開されている。 上述のうちいくつかの例 (Rayne et al., 2001; Yager et al., 2013) では MODPATH が用いられ、洞窟や亀裂が多いゾー ンで地下水の流れが集中することや滞留時間が短いことが 示されている。

MODFLOW で得られた地下水流動場から物質輸送を推定するために、移流分散方程式 (Advection-dispersion equation) に基づく MT3DMS (Zheng and Wang, 1999) ならびにその後継版である MT3D-USGS (Bedekar et al., 2016) がしばしば用いられている。 MT3D-USGS の支配方程式で







Higher permeability coefficient

Fig. 2 パイプフローを有する帯水層モデルの模式図。左:現実の洞窟網、中央: EPM によるモデル化、右:水理学的な表現によるパイプフローのモデル化

Schematic diagrams of groundwater flow models considering the conduit flow. *Left*: Actual conduit network; *Center*: EPM approach; *Right*: Application of hydraulic conduit flow process.

ある移流分散方程式は以下のように記述される:

$$\nabla \cdot [\theta \mathbf{D} \cdot \nabla C] + \nabla (\theta \mathbf{u} C) + q_s C_s - q_s' C - \lambda_1 \theta C$$
$$-\lambda_2 \rho_b \bar{C} = \theta \frac{\partial C}{\partial t} + \rho_b \frac{\partial \bar{C}}{\partial t}$$
(3)

ここで θ は体積含水率[-], C は溶質の濃度[M L⁻³], ρ_b は帯 水層のかさ密度[-]、 cは帯水層に吸着する溶質の濃度[M L^{-3}], **D** は分散係数テンソル[$L^2 T^{-1}$], **u** は間隙を流れる水の 流速ベクトル[LT^{-1}], C_s と q_s は負荷源から付与される溶質 の濃度 $[M L^{-3}]$ と水の流速 $[L T^{-1}]$, q_s は水分変化量 $[L T^{-1}]$, λ_1 と λ ,はそれぞれ溶解状態と吸着状態の一次反応率[T^{-1}]であ る。これらのモデルは、亀裂や洞窟を有する炭酸塩岩帯水 層に対しても適用されている。Abbo et al. (2003) はイスラ エルのガラリヤ湖に湧出する地下水の塩分輸送に対して, EPM として亀裂帯のグリッドに大きな透水係数を与えた モデルを適用し、帯水層の亀裂が深いほど深部の塩水が湧 水に大きな影響を与えると推定した。一方, Langston et al. (2012) はアメリカ合衆国フロリダ州のカルスト帯水層を対 象として数値実験を行い、洞窟のパイプフローを境界条件 とすることによって、残りのマトリックス部におけるパイ プフロー地下水の寄与の広がりを評価した。

SEAWAT (Guo and Langevin, 2002; Langevin et al., 2007) は、MODFLOW と MT3DMS を用いて密度流を再現するモデルである。沿岸部などでの塩水淡水相互作用に係わる問題にしばしば適用され、炭酸塩岩帯水層でも事例がある。SEAWAT で用いられる支配方程式を次式に示す:

$$\nabla \cdot [\theta \mathbf{D} \cdot \nabla C] - \nabla (\theta \mathbf{u} C) - q_s' C_s = \left(1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta}\right) \frac{\partial (\theta C)}{\partial t} \tag{4}$$

ここで K_d は溶質の移動が水の移動より遅れることに関する分配係数[-]である。炭酸塩岩帯水層におけるいくつかの事例(Steiakakis et al., 2015; Zhao et al., 2016)では、計算領域を亀裂や洞窟の多寡によってゾーン分けし、ゾーンごとに異なる透水係数を与えて SEAWAT を実行した。一方、Romanazzi et al. (2015) はイタリア南部の半島部にあるカルスト帯水層を対象に SEAWAT を適用したが、帯水層内に亀裂や空洞が高密度で存在し、かつ計算領域が地域スケールで比較的大きいため、帯水層を EPM とみなすことができ

ると判断し、石灰岩や石灰砂などの岩相ごとに単一の透水 係数を与え、淡水分布を再現した。

MODFLOW-CFP

帯水層内のパイプフローを水理学的なシミュレーションモデルによって表現する試みとして、まず CAVE(Conduit Aquifer Void Evolution; Clemens et al., 1996 ほか)と名付けられたモデルが挙げられる。このモデルは、洞窟などのパイプにおける流れについて、ノード間の水位差 Δh_t [L]と流速 u [L T^{-1}]の関係が Darcy-Weisbach 式で表されるとする:

$$\Delta h_t = -\lambda \frac{L}{d} \frac{u |u|}{2g} \tag{5}$$

ここで、 λ は摩擦損失係数[-]、Lは管路の長さ[L]、dは管路の内径[L]、gは重力加速度[L T²]である。この式について、CAVE モデルでは、レイノルズ数(Re=ud/v; vは動粘性係数[L² T⁻¹])が小さく層流と判断されれば Hagen-Poiseuille式、Re が大きく乱流と判断されれば Colebrook-White 則を適用して、ノード間の水頭差 Δh_t からパイプフローの流量 Q が求められるとした:

$$Q = \frac{\pi d^4 g \, \Delta h_t}{128 L \nu} \tag{6}$$

$$Q = -2Y \log \left(\frac{2.51\pi vd}{4Y} + \frac{k}{3.71d} \right)$$
with $Y^2 = \frac{\pi^2 d^5 g \, \Delta h_t}{8L}$ (7)

前者は層流に、後者は乱流にそれぞれ適用される式で、*k* は管路の粗度[L]である。それぞれ、マトリックス部(あるいは亀裂を有する部分)とパイプとの水のやりとりは、パイプのノード間での水の交換として、マトリックス部とパイプ内の水頭差から計算する。

このような水理学的なパイプフローモデルを EPM モデルと組み合わせることで (Fig. 2),パイプフローとマトリックスフローが共存する地下水流動場がよりよく再現されることが期待される。Liedl et al. (2003)は、CAVE とMODFLOW を組み合わせた手法を提示し、模式的なモデル空間においてパイプフローに伴う洞窟周囲のマトリックス

部の水頭分布を合理的に模擬できることを示した。また、Spiessl et al. (2007) は、上述の CAVE と MODFLOW の組み合わせに加えて MT3DMS も利用して、パイプフローを有する模式的なモデル空間での物質の輸送と反応を模擬する手法を提案した。

この CAVE を発展させたモデルとして, MODFLOW 用の 外部プログラム CFP (Conduit Flow Process; Shoemaker et al., 2008) がある。これには、Mode 1 (CFPM1) とよばれるパ イプフローモデルと、Mode 2 (CFPM2) とよばれる卓越流 モデルが含まれる。CFPM1 は CAVE に改良がなされたモデ ルで、アメリカ合衆国のフロリダ州 (Gallegos et al., 2013) やサウスダコタ州 (Saller et al., 2013), フランス南部 (Reimann et al., 2014; Giese et al., 2017) などでの適用事例 がある。Saller et al. (2013) は EPM の MODFLOW と MODFLOW-CFPM1 の計算結果を比較し、パイプフローが 発生する帯水層ではこれらのモデルが推定する地下水の振 る舞いが互いに大きく異なることを示した。CFPM2は、地 下水の流れが乱流になる場合に Darcy 則が成り立たない (水理勾配と流量の関係が非線形となる) ことを踏まえて, グリッド間の水頭差が所定の条件を超えたときに Darcy 則 ではなく Darcy-Weisbach 式を適用して水平方向の流れを計 算し、MODFLOWの結果を差し替えるものである。CFPM2 は, フロリダ州のカルスト帯水層で地下水硝酸性窒素の輸 送を模擬した事例 (Xu et al., 2015) や, イランの石灰岩帯 水層でグラウトカーテンを設置した場合の地下水流れを推 定した事例 (Assari and Mohammadi, 2017) などがある。

Xu and Hu(2017)は、MODFLOW-CFPによるレイノルズ数の計算結果を利用してパイプフローを有する帯水層での密度流を模擬するモデル VDFST-CFP を提案し、模式的なモデル空間において SEAWAT などの他の密度流モデルとの比較をしている。

他の差分法モデル

MODFLOWでは上述のDarcy則と連続式から導出される 2階偏微分方程式(式-2)を地下水の流れの支配方程式としているが、他の方程式に基づくモデル化の事例もある。

Darcy 則のみに依拠し、定常状態のシミュレーションを行った事例もある。経時変化は再現できないが、計算はより容易である。M2ME (Vassena et al., 2012) は Darcy 則に基づいたモデルで、下記のようにノード間の水位差をよりシンプルな関係式で記述している:

$$T_{NC}(h_{N} - h_{C}) + T_{EC}(h_{E} - h_{C}) + T_{SC}(h_{S} - h_{C}) + T_{WC}(h_{W} - h_{C}) = F_{C}$$
(8)

ここで、h は水頭[L]、T はノード間の等価透水量係数[L² T^{-1}]、 F_C はノードにおける涵養や流出などの水の出入り[L³ T^{-1}]を表している。また、下付き文字の C は対象のノード、E、W、S、N はそれぞれ東西南北方向のものを指している。Giudici and Margiotta(2012)は、M2ME を用いてイタリア南部のカルスト帯水層における塩淡境界上の淡水の流動を推定した。また、同様の事例として、Bredehoeft and King(2010)は Darcy 則を差分法により離散化して、Tメリカ合

衆国ネバダ州の炭酸塩岩帯水層の地下水流動を模擬した。

また、Arfib and de Marsily(2004)は、パイプフロー流量を海水面からの水頭差との水理学的な関係式で表し、この関係式に基づいて物質輸送を差分法で離散化した SWIKAC モデルを構築し、ギリシアのクレタ島沿岸部にある炭酸塩岩帯水層に適用して湧水の塩化物イオン濃度の挙動を精度よく再現できることを示した。

さらに、地表水も含む既存の分布型水文モデルである SHETRAN (Ewen et al., 2000)を改良して洞窟網を有する帯水層の地下水流動を推定する方法を示した事例 (Adams and Parkin, 2002)や、地下水だけでなく地表水や蒸発散など流域の水循環を統合的にモデル化した商用パッケージ MIKE SHE の内部で Darcy 則による支配方程式を差分法でモデル化して地下水流動を再現した事例(Janža, 2010)などもある。

3.1.2 有限要素法モデル

有限要素法は、ノードによって囲われたメッシュ要素の内部をノード値の関数として表現することで、空間を離散化して数値解を得る手法である。差分法に比べて、定式化がやや複雑であるが、メッシュ形状を自由に設定できる、境界条件をより厳密に設定できるなどの利点がある。

有限要素法による地下水流動モデリングパッケージとし て FEFLOW (Diersch, 1996; Trefry and Muffels, 2007) がしば しば用いられている。FEFLOW も MODFLOW 同様に, Darcy 則と連続式を支配方程式とする。イスラエルの不圧帯水層 の地下水流動 (Dafny et al., 2010) やヨルダンの地上ダム周 辺の地下水流動状況の変化(Xanke et al., 2016)などの適用 事例がある。これらの事例では、EPM モデルとして、カル スト化の程度あるいは揚水試験の結果から計算領域を区分 し,透水係数の分布を決定している。また,物質輸送を取 り扱った事例としては, Nocchi and Salleolini (2013) がイ タリアのトスカーナ地方沿岸部における水収支と塩分濃度 の変動を解析したものがある。この事例では、面的に広く 分布する多様なカルスト性空洞を適切にモデル化すること が困難であることから、キャリブレーションによって透水 係数の分布を決定した。なお、FEFLOW は有償であるが、 ArcGIS と連携して実行可能であるといった商用ならでは の利点がある。

FEFLOW を用いずに Darcy 則と連続式からなる支配方程式を有限要素法で解析する事例もある。例えば、Qian et al. (2009) は、中国江蘇省の炭酸塩岩帯水層を対象として、広域スケールであればカルスト帯水層でも EPM で解析できると考え、岩種などの地質的特徴によって計算領域を区分してそれぞれ異なる透水係数を与え、有限要素法によって地下水位の変動を解析した。

このほか、EPM での有限要素法による解析方法としては、次の Boussinesq 式を支配方程式として不圧帯水層の地下水面分布を推定するものがある:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_e \frac{\partial h}{\partial t} \tag{9}$$

ここで、h はピエゾ水頭[L]であり、鉛直方向のピエゾ水頭の変化を無視する仮定(Dupuit の仮定)の下では地下水面に等しい。Boussinesq 式は地下水位の変化のみを記述した式なので、Darcy 則と連続式の組み合わせよりも計算負荷が軽減される。これを用いた事例としては、カナダのWaterloo 地下水研究センターが提供した有限要素法解析プログラムを利用して、メキシコのユカタン半島の新第三紀より若い石灰岩帯水層の地下水面分布を EPM で模擬したもの(González-Herrera et al., 2002)がある。

一方、パイプフローを考慮した例としては、商用の有限要素法ソルバーCOMSOLによって、マトリックスフローと
亀裂フロー、パイプフローが共存する帯水層での地下水流動と物質輸送を再現した事例(Oehlmann et al, 2013; 2015)がある。この事例では、マトリックスフローと亀裂フローは Darcy 則に従うとする一方、パイプフローは Manning 則に従う管路流れとして計算されている。

3.1.3 その他の分布型モデル

分布型モデルの適用事例の多くは差分法か有限要素法によるものであるが、その他の手法によるものもある。WoS検索で抽出された中には、粒子法、格子ボルツマン法、有限体積法によるものがあったので、以下で概説する。

粒子法は、地下水または溶存物質を粒子の集まりとして 捉え、その挙動をラグランジュ的に(粒子視点での座標系 で)解析する手法である。物質輸送の課題で移流を計算す る必要がないことや、格子を設定する必要がなく複雑な流 れを再現できることが利点としてあげられる。例として、 Masciopinto and Palmiotta(2013)は、イタリア南部の沿岸 部の石灰岩帯水層における塩淡境界を再現するために、ラ グランジュ系での Navier-Stokes 方程式(連続式と運動方程 式)が適用できるかを検討し、粒子法のひとつである Smoothed Particle Hydrodynamics 法(SPH)による計算と差 分法での計算とのそれぞれの適用可能性を比較した。その 結果、カルスト化した帯水層では粒子法は非常に計算負荷 が大きいため、差分法がより適しているとした。

格子ボルツマン法(lattice-Boltzmann method; LBM)は、分子気体力学から発展した比較的新しい流体解析方法で、流体を粒子と仮定し、粒子の分布関数の時間発展方程式を解くものである。Walsh and Saar(2010)は、Navier-Stokes 方程式で支配される地下水の流れを格子ボルツマン法によって解析し、炭酸塩岩帯水層のカルスト進化を模擬的に再現した。

有限体積法 (Finite volume method; FVM) は、3 次元の対象領域を小さなコントロールボリューム (Control volume) に分割し、各コントロールボリュームにおいて質量保存則を積分形で定式化して解くものである。Meyerhoff et al. (2014) は、Darcy 則と保存則による支配方程式を有限体積法で解析するモデルである ParFlow (Ashby and Falgout, 1996; Maxwell, 2013) とラグランジュ的粒子追跡法による物質輸送解析法 SLIM-FAST (Maxwell and Kastenberg, 1999; de Rooji et al., 2013) を組み合わせて EPM 的にフロリダ州のカ

ルスト帯水層の地下水と地表水の混合率分布を計算し、電気探査の結果から推定される混合率分布をよく再現した。有限体積法は、局所的な質量保存が保証される利点があるが、不均質な場では得られる流速ベクトルが空間離散化の影響を受けうることから(小野ら、2014)、不均質な炭酸塩岩帯水層への適用には注意を要すると思われる。一方、MODFLOWの最新版である Version 6 (Langevin et al., 2017)は、差分法の欠点を補うために、コントロールボリューム差分(Control volume finite difference)と呼ばれる有限体積法に基づく基礎方程式で構築されていることから、今後は有限体積法の適用場面が広がるものと予測される。

3.2 集中型モデル

分布型モデルと対をなす概念として集中型モデルがある。分布型モデルでは状態の空間的な分布を模擬するのに対して、集中型モデルでは特定の目的量、具体的にはある地点での地下水位や湧水量などを求める。地下水シミュレーションでは、多くの場合、降水を主な入力、孔井での地下水位や湧水での流出量を出力とするので、しばしば降雨流出モデル(Rainfall-runoff model)と呼ばれる。モデルの構造は、降水と地下水それぞれの変動の関係を記述するだけのブラックボックス的なモデルから、浸透流を記述する物理的な支配方程式によるものまで多様である。

3.2.1 貯留型モデル

貯留型モデル(Storage model)は、帯水層をタンクと見立てて、タンクの水位を地下水位に、タンクの穴から出る水の量を湧水などによる流出量とみなして地下水の流れを概念的にモデル化するものである。代表的な貯留型モデルである菅原のタンクモデル(菅原、1972)は地表水を対象とした流出解析のためにしばしば用いられているが、これを地下水の水・物質収支計算に援用した事例も複数ある(例えば、He et al., 2008; Yoshimoto et al., 2013)。

カルスト帯水層では、しばしば、マクロポアを通過する速い浸透流や飽和帯のパイプフローを表現するために、卓越した水の動きを表現するための仕掛けが施される(Fig. 3)。このようなモデルによって水収支を計算した事例は多い(例えば、Fleury et al., 2007; Le Moine et al., 2008; Butscher and Huggenberger, 2008; Butscher et al., 2011; Kourgialas et al., 2010; Chen and Goldscheider, 2014)。また、パイプフローを表現するために、管路流れを水理学的な方程式で記述して貯留型モデルに組み込んだ事例もある(例えば、Halihan and Wicks, 1998; Perrin et al., 2007)。これらは、モデル構造を柔軟に決定できるとともに、パラメータ設定に物理的な制約がないため、キャリブレーションによって入出力の関係を比較的良好に表現するモデルを構築することができる。また、ポンプでの取水など人為的な影響をモデルに反映させることも容易であるといった利点がある。

3.2.2 涵養モデル

地下水の涵養プロセスに着目し,不飽和浸透を記述する

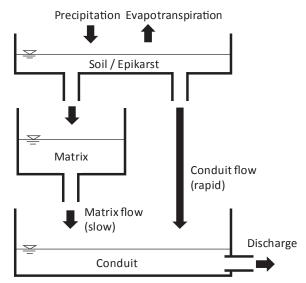


Fig. 3 炭酸塩岩帯水層においてしばしば用いられる貯留型モデルの模式図の例

An example of schematic diagram of the storage models for groundwater simulation often used in carbonate aquifers

方程式によって地下水流出をモデル化した事例も多くある。なお、上述の分布型モデルでも、降水が地下水面に到達するまでの過程を本項に示す方法で計算した事例もあるが、ここではこれらは分布型モデルとして分類している。

土壌中の水および溶質の移動を再現するモデルとして、しばしば SWAT(Soil & Water Assessment Tool; Arnold et al., 1998)が用いられている。炭酸塩岩帯水層における地下水 涵養を推定した事例(Nikolaidis et al., 2013; Wang and Brubaker, 2014; Malagò et al., 2016)もある。分布型モデルのようにグリッドごとに異なるパラメータを設定することができる。Nikolaidis et al. (2013)は、カルスト帯水層における早い浸透流を再現できるように SWAT を修正している。特定の地点の湧水量を推定するためには集水域の涵養量を積算する必要がある。

その他, 次式のような 1 次元 Richards 式などの水理学的な支配方程式によるシミュレーションの事例 (Neukum et al., 2008) などもある。

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K(\psi) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\psi)}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$
 (10)

ここで, $K(\psi)$ は、土壌水分ポテンシャル ψ [L]に依存する水理透水係数[L \mathbf{T}^{-1}]である。

3.2.3 ブラックボックスモデル

降水と地下水流出の関係に物理的意味を持たせずにその関係性を最適化することに特化したモデルは、しばしばブラックボックスモデルと呼ばれる。これらのうち、人工ニューラルネットワーク(Artificial neural network:ANN)は最もよく用いられている方法である。ANNは、観測データを教師データとして、入出力の間にある隠れレイヤ内のノード(人工ニューロン)のネットワークを最適化することによって、入力から出力を推定するモデルを構築する手法である。炭酸塩岩帯水層でもいくつか適用例がある(例え

ば、Kurtulus and Razack, 2007; Hu et al., 2008; Trichakis et al., 2009; Kong A Siou et al., 2011)。モデルに物理的な意味はないが、水理地質構造など基礎的な情報が十分でない地域であっても、湧水量などをよく再現できる。

4 考察

本章では、前項までで挙げられた各モデルについて、極端な不均質性を有する炭酸塩岩帯水層での地下水流動や物質輸送への適用性を検討する。

4.1 等価多孔質媒体 (EPM) モデルの妥当性

地下水の状態,具体的には地下水位や流速,塩分濃度などの空間的な分布を推定するためには,分布型モデルを利用する必要がある。この場合,洞窟網に関する情報を設定する必要がないためモデルグリッドの準備が比較的容易なEPMモデルの利用が第一選択になると思われる。

EPM による分布型モデルの適用事例では, EPM 適用の妥当性について,各論文中の Methods あるいは Discussion の部分で議論されることが通例となっている。

Scanlon et al. (2003) は、MODFLOW による EPM モデルでカルスト帯水層での湧水量を推定したが、考察において EPM モデルでは乱流現象が表現されず、点源汚染を輸送するような地下水流動の方向や流量を正確に推定することができないため、物質輸送への利用は適切ではないと指摘している。本稿で挙げた EPM モデルによる事例は、多くは特定の地点の地下水位や湧水の流出量、あるいは地下水位分布の推定に留まるものが多い。

MODFLOW をベースとした MT3DMS や SEAWAT のカルスト帯水層への適用は、Scanlon et al. (2003) が指摘した制約を超えた EPM モデルの利用であるようにも思われる。Romanazzi et al. (2015) はイタリアのカルスト帯水層に

SEAWAT を適用したが、一部の地点における塩分濃度の観測値と推定値との大きな差を解消できなかった。Abbo et al. (2003) が MT3DMS を利用した例では、亀裂の影響が相対的に評価されたのみで、塩分濃度を再現することは目的ではなかった。

有限要素法についても同様で、Nocchi and Salleolini (2013) は FEFLOW を用いて沿岸部の塩水淡水遷移帯の地下水流動と塩分輸送をモデル化したが、その結果は塩分濃度変動の再現性に劣り、理由として Scanlon et al. (2003) の指摘を挙げて亀裂や洞窟を有する帯水層での物質輸送解析の難しさを説いた。

一方、Xu et al. (2015) は MODFLOW-CFPM2 と MT3DMS の組み合わせによって、フロリダ帯水層の硝酸性窒素輸送をパイプフローによる非線形な地下水流動によるものとしてモデル化し、観測された硝酸性窒素濃度の値がばらついているもののモデル推定値はその平均的な値をよく再現している。Oehlmann et al. (2015) は、パイプフローを有する帯水層でのトレーサ試験の破過曲線を再現するために定常状態を仮定して洞窟網を再現した有限要素法モデルを構築し、検証においてはピーク到達時間に若干のずれがあったが概ね良好な結果を得た。このように、EPMの適用が困難な物質輸送モデルにおいて、パイプフローを表現する水理学的モデルを組み込めば、シミュレーションは改善される可能性があるといえる。

4.2 水理パラメータ分布の把握

EPM モデルの利用においては、洞窟や亀裂の分布を踏まえて初期的な透水係数分布を設定し、キャリブレーションによって用いる値を決定する場合が多い。初期的な透水係数にはボーリング孔での透水試験の結果なども用いられる。キャリブレーションで決定される透水性のパラメータ値は、洞窟や亀裂を含む帯水層全体を表すモデル上での推定値であり、実際の物性とは異なる可能性があることに留意すべきである。

物質輸送において,透水性と同様に妥当性を検討すべきパラメータは,分散現象に関するものである。分散現象は,移流分散方程式(式-3)や密度流の式(式-4)に含まれているが,これらの分散係数 \mathbf{D} は,流れの方向に対する拡散の方向によって縦方向分散係数 \mathbf{D}_{L} と横方向分散係数 \mathbf{D}_{T} に区別され,それぞれ,多孔質媒体を通過することによる濃度変化のばらつきと分子拡散係数 \mathbf{D}_{M} の和で表される:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} D_{\mathrm{L}} & D_{\mathrm{T}} & D_{\mathrm{T}} \\ D_{\mathrm{T}} & D_{\mathrm{L}} & D_{\mathrm{T}} \\ D_{\mathrm{T}} & D_{\mathrm{T}} & D_{\mathrm{L}} \end{pmatrix} \tag{11}$$

where $D_{\rm L} = \alpha_{\rm L} u + D_{\rm M}$; $D_{\rm T} = \alpha_{\rm T} u + D_{\rm M}$

ここで α_L と α_T はそれぞれ縦方向または横方向の分散長[L] と呼ばれ、濃度変化のばらつきは流速と分散長の積で表される。この式から、分散現象において2つの因子が影響することがわかる。ひとつは、分散係数が流速に依存するため地下水流動場が適切に推定されていなければ分散現象の再現も困難であることである。またひとつは、分散長を適

切に設定する必要があることである。分散長は現場のスケールに依存することが知られている(Gelhar et al., 1992)。 Schulze-Makuch(2005)は、過去の事例の収集から、同様の空間的スケールであっても炭酸塩岩帯水層は比較的分散長が大きくなる傾向があり、これは不均質な透水性による流れの様態の多様性によるものと論じている。

Oehlmann et al. (2015) は、パイプフローとマトリックス フローの相互作用を考慮した有限要素法モデルでトレーサ 試験の破過曲線の再現を試みたが、キャリブレーションで 用いた試験とは異なる破過曲線ではモデルで推定された濃 度ピークに実測とのズレがあった。Oehlmann et al. (2015) は、モデル対象の空間スケールが大きくなれば、地下水の 流れ方が多様になることで分散の程度が大きくなる現象を 確認し、この効果を定量的に評価するためには洞窟網の幾 何学的な情報を正確に把握する必要があると指摘した。Xu et al. (2015) の事例では、トレーサ試験の破過曲線シミュ レーションでのピーク到達時間の不一致について未知の洞 窟網の存在が影響している可能性が指摘された。Oehlmann et al. (2015) は、自らの事例では十分な調査によって洞窟 網が把握されているため比較的良好な結果が得られたが, そうでない場合には柔軟なモデル適用が求められると述べ ている。

このように、EPM モデルで物質輸送を再現する場合は、透水性の不均質性だけでなく、それによる分散現象への影響が複雑であることがモデル化の上での障壁となる。一方、パイプフローを考慮した物質輸送モデルは、パイプフローが発生しうる洞窟の位置や連結関係を適切にモデル化することができれば、EPM に比べてより現実に近いモデルを作成できる可能性がある。本稿で触れた事例では、洞窟網が既知であるか、あるいは模式的なモデル帯水層を仮定して数値実験をしたものである。今後の適用においては、いかにして洞窟網を適切にモデル化するかが課題である。洞窟網を把握するには、地質や地形の調査だけでなく、トレーサ試験(例えば、Goldscheider et al., 2008)や物理探査(例えば、Chalikakis et al., 2011)なども手段となり得る。

4.3 琉球石灰岩帯水層への適用可能性

多良間島では、淡水レンズ地下水の農業利用が検討されている(仲間、2013)。琉球石灰岩帯水層の淡水レンズを対象とした既往の事例(例えば、井内ら、2014;Momii et al.、2005)では、均質な帯水層を仮定して密度流のシミュレーションを行っている。一方、多良間島では、一部で洞窟やドリーネなどの溶食地形がみられる(吉本ら、2016a)とともに、六フッ化硫黄(SF₆)による地下水滞留時間の推定から多良間島の地下水流動は模式的な淡水レンズ地下水の流れと違いがあることから(吉本ら、2016b)、帯水層の透水性が不均質である可能性が示唆される。塩淡境界の挙動を解析する上では、帯水層の不均質性を明らかにした上で、この帯水層での物質輸送問題に EPM モデルが適用可能かを検討する必要がある。多良間島では不均質性が示唆されるものの明瞭な洞窟網の存在が示されていないことから、

まずは EPM モデルにおいて帯水層の不均質性を透水係数の空間分布で表してシミュレーションを行うことが手段として考えられる。EPM シミュレーションの精度を向上させるためには、透水係数の把握方法を工夫する余地があると思われる。Shirahata et al. (2018) が潮汐の調和解析によって地下水位の時系列データから帯水層の透水性に係るパラメータを推定した手法は、揚水試験などの点での透水性を把握する方法と比較して、区間での平均的な透水性を把握できることから、不均質性を有する帯水層領域を平均化して捉えてモデル化する場合には有利である可能性がある。

沖縄本島南部の沿岸部に建設された米須地下ダムは、止 水壁によって海水の侵入を防ぐ塩水侵入阻止型の地下ダム である。米須地下ダムでは、建設直後から止水壁のすぐ上 流側に塩水(海水)が残存している(沖縄総合事務局,2006)。 米須地下ダムでは、建設時にタンクモデルによる水収支の 予測がなされている (沖縄総合事務局, 2006)。 Yoshimoto et al. (2013) はこのタンクモデルを発展させて大雨時の希釈 を表現できる窒素収支モデルを構築した。このような集中 型の降雨流出モデルは、水や窒素などの物質収支の予測に は適している。一方, 残留塩水塊の挙動については, 均質 な帯水層を仮定した実験とシミュレーションによって,将 来的に止水壁を越流する地下水によって徐々に除去される と予測されている(中川ら, 2004; Nakagawa et al., 2005; Luyun et al., 2009; 高橋・籾井, 2016)。この塩水塊は今も 存在し、その挙動は洞窟を通過するパイプフローの影響を 受けていることが示唆されている(吉本ら,2015)。このよ うに、不均質な帯水層で発生するパイプフローによって残 留塩水が一時的に巻き上げられて取水施設や水質観測施設 に到達する可能性があり、その場合は従来の管理方針に従 えば一時的な現象であるにも拘らず除塩のためのポンプを 投入し稼働させるため余分なコストに繋がりうる。このた め、既知の現象を表現できるモデルを構築して今後の塩水 塊動態に係る情報を地下ダム管理者に提供することは管理 上有意義である。米須地下ダム貯留域では、多良間島とは 異なり、大きな洞窟の存在が明示されている(例えば、今 泉ら, 2002)。安元ら (2015) は, 米須地下ダム周辺の地下 水流動をシミュレーションするために, EPM として MODFLOW を利用し、洞窟網を含む帯水層の不均質性を透 水性分布として考慮した。パイプフローに伴う塩水塊挙動 の理解のためには、このような EPM モデルの利用と同時 に、主要な洞窟網が明らかであることから MODFLOW-CFP のようなパイプフローを表現する水理学的モデルを適用す ることも可能であると思われる。

5 結 言

不均質な炭酸塩岩帯水層を対象とした地下水シミュレーションモデルの既往事例を整理し、各モデル分類の特徴をとりまとめてカルスト化した帯水層での適用可能性を検討するとともに、南西諸島の琉球石灰岩帯水層での利用について可能性を議論した。結果を以下に示す:

- 炭酸塩岩帯水層での地下水シミュレーションの手法は、主に分布型モデルと集中型モデルに分類される。分布型モデルは、地下水の流れや溶質の空間的な分布を推定するために利用することができる。一方、集中型モデルは、降水に対する地下水位や湧水量の応答を再現するためによく用いられる。
- ・ 分布型モデルは、不均質性の表現方法として計算領域を区分して異なる透水係数を与える等価多孔質媒体 (EPM) モデルと、洞窟網を通過するパイプフローを水理学的に表現するプログラムを付加したモデルに大別される。
- ・ EPM モデルのみでは非線形の地下水流れを精確に表現できないため、物質輸送への利用は適切ではないと指摘されている。既往の事例では、物質輸送モデルへの EPM の適用には限界があると思われたが、パイプフローを表現する水理学的モデルを組み込めば、シミュレーションは改善される可能性がある。
- ・ パイプフローを考慮した物質輸送モデルは、EPM に比べて現実に近いモデル構築が可能であるが、適切なモデル化のためには、パイプフローが発生しうる洞窟の位置や連結関係を正しく把握する必要がある。
- ・ 南西諸島への適用について、透水性の不均質性が示唆されるものの洞窟網の存在が明らかでない多良間島では、不均質性を透水性分布として表す EPM モデルの利用が第一選択となり得る。一方、洞窟の存在が明らかな米須地下ダム貯留域では、パイプフローを表現する水理学的モデルの利用が可能であると思われる。

引用文献

Abbo, H., Shavit, U., Markel, D., Rimmer, A. (2003): A numerical study on the influence of fractured regions on lake/groundwater interaction; the Lake Kinneret (Sea of Galilee) case, *Journal of Hydrology*, 283, 225–243

Abusaada, M., Sauter, M. (2013): Studying the flow dynamics of a karst aquifer system with an equivalent porous medium model, *Ground Water*, **51**, 641–650

Adams, R., Parkin, G. (2002): Development of a coupled surface-groundwater-pipe network model for the sustainable management of karstic groundwater, *Environmental Geology*, **42**, 513–517

Arfib, B., de Marsily, G. (2004): Modeling the salinity of an inland coastal brackish karstic spring with a conduit-matrix model, *Water Resources Research*, **40**, doi:10.1029/2004WR003147

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., Williams, J. R. (1998): Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development, *Journal of the American Water Resources Association*, **34**, 73–89

Ashby, S. F., Falgout, R. D. (1996): A parallel multigrid preconditioned conjugate gradient algorithm for groundwater flow simulations, *Nuclear Science and Engineering*, **124**(1), 145–159

Assari, A., Mohammadii, Z. (2017): Assessing flow paths in a karst

- aquifer based on multiple dye tracing tests using stochastic simulation and the MODFLOW-CFP code, *Hydrogeology Journal*, **25**, 1679–1702
- Bedekar, V., Morway, E. D., Langevin, C. D., Tonkin, M. (2016): MT3D-USGS version 1: A U.S. Geological Survey release of MT3DMS updated with new and expanded transport capabilities for use with MODFLOW, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A53, 69 p.
- Ben-Itzhak, L. L., Gvirtzman, H. (2005): Groundwater flow along and across structural folding: an example from the Judean Desert, Israel, *Journal of Hydrology*, **312**, 51–69
- Bredehoeft, J., King, M. (2010): Potential contaminant transport in the regional Carbonate Aquifer beneath Yucca Mountain, Nevada, USA, *Hydrogeology Journal*, 18, 775–789
- Butscher, C., Huggenberger, P. (2008): Intrinsic vulnerability assessment in karst areas: A numerical modeling approach, *Water Resources Research*, **44**, doi:10.1029/2007WR006277
- Butscher, C., Auckenthaler, A., Scheidler, S., Huggenberger, P. (2011): Validation of a numerical indicator of microbial contamination for karst springs, *Ground Water*, **49**, 66–76
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R. Valois, R., Bosch, F. P. (2011): Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview, *Hydrogeology Journal*, 19, 1169–1180
- Chen, Z., Goldscheider, N. (2014): Modeling spatially and temporally varied hydraulic behavior of a folded karst. system with dominant conduit drainage at catchment scale, Hochifen-Gottesacker, Alps, *Journal of Hydrology*, **514**, 41–52
- Cherubini, C., Giasi, C., Pastore, N. (2013): Fluid flow modeling of a coastal fractured karstic aquifer by means of a lumped parameter approach, *Environmental Earth Sciences*, 70, 2055–2060
- Clemens, T., Hückinghaus, D., Sauter, M., Liedl, R., Teutsch, G. (1996):

 A combined continuum and discrete network reactive transport model for the simulation of karst development, in Calibration and reliability in groundwater modelling, In: Calibration and Reliability in Computer Modelling (Proceedings of the ModelCARE 96 Conference held at Golden, Colorado, September 1996), International Association of Hydrological Sciences Publication 237, 309–318
- Dafny, E., Burg, A., Gvirtzman, H. (2010): Effects of Karst and geological structure on groundwater flow: The case of Yarqon-Taninim Aquifer, Israel, *Journal of Hydrology*, **389**, 260–275
- de Rooij, R., Graham, W. D., Maxwell, R. M. (2013): A particle-tracking scheme for simulating pathlines in coupled surface-subsurface flows, *Advances in Water Resources*, **53**, 7–18
- Diersch, H.-J. G. (1996): Interactive, graphics-based finite-element simulation system FEFLOW for modeling groundwater flow, contaminant mass and heat transport processes. User's Manual v. 4.5, WASY Institute for Water Resources Planning and System Research, Ltd., Berlin
- Dragoni, W., Mottola, A., Cambi, C. (2013): Modeling the effects of pumping wells in spring management: The case of Scirca spring (central Apennines, Italy), *Journal of Hydrology*, **493**, 115–123

- Ewen, J., Parkin, G., O'Connell, P. E. (2000): SHETRAN: a coupled surface/subsurface modelling system for 3D water flow and sediment and solute transport in river basins, ASCE Journal of Hydrologic Engineering, 5(3), 250–258
- Fleury, P., Plagnes, V., Bakalowicz, M. (2007): Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France), *Journal of Hydrology*, 345, 38–49
- Ford, D., Williams, P. (2007): Karst Hydrogeology and Geomorphology, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 562 p.
- Freeze, R. A., Cherry, J. A. (1979): *Groundwater*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, 604 p.
- Gallegos, J. J., Hu, B. X., Davis, H. (2013): Simulating flow in karst aquifers at laboratory and sub-regional scales using MODFLOW-CFP, *Hydrogeology Journal*, 21, 1749–1760
- Gelhar, L. W., Welty, C., Rehfeldt, K. R. (1992): A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers, *Water Resources Research*, 28, 1955–1974
- Giese, M., Reimann, T., Liedl, R., Maréchal, J.-C., Sauter, M. (2017): Application of the flow dimension concept for numerical drawdown data analyses in mixed-flow karst systems, *Hydrogeology Journal*, 25, 799–811
- Giudici, M., Margiotta, S. (2012): Modelling hydrostratigraphy and groundwater flow of a fractured and karst aquifer in a Mediterranean basin (Salento peninsula, southeastern Italy), *Environmental Earth* Sciences, 67, 1891–1907
- Goldscheider, N., Meiman, J., Pronk, M., Smart, C. (2008): Tracer tests in karst hydrogeology and speleology, *International Journal of Speleology*, 37, 27–40
- González-Herrera, R., Sánchez-y-PintoJosé, I., Gamboa-Vargas, J. (2002): Groundwater-flow modeling in the Yucatan karstic aquifer, Mexico, Hydrogeology Journal, 10, 539–552
- Gorelick, S. M., Zheng, C. (2015): Global change and the groundwater management challenge, *Water Resources Research*, **51**, 3031–3051
- Guo, W., Langevin, C. D. (2002): User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three-Dimensional Variable-Density Ground-Water Flow, Techniques of Water-Resources Investigations 6-A7, 77 p.
- Halihan, T., Wicks, C. M. (1998): Physical response of a karst drainage basin to flood pulses: Example of the Devil's Icebox cave system (Missouri, USA), *Journal of Hydrology*, 204, 24–36
- Harbaugh, A.W. (2005): 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
- He, B., Takase, K., Wang, Y. (2008): A semi-distributed groundwater recharge model for estimating water-table and water-balance variables, *Hydrogeology Journal*, 16, 1215–1228
- Hu, C., Hao, Y., Yeh, T.-C. J., Ping, B., Wu, Z. (2008): Simulation of spring flows from a karst aquifer with an artificial neural network, *Hydrological Processes*, 22, 596–604
- 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
- 井内国光,浦 弘樹,武井是樹(2014):3 次元数値シミュレーションに基づく淡水レンズ型地下水における効果的な取水方法の検討,海岸工学論文集,70(2), I 1221-I 1225
- Ishida, S., Tsuchihara, T., Yoshimoto, S., Imaizumi, M. (2011): Sustainable use of groundwater with underground dams, *Japan Agricultural Research Quarterly*, 45(1), 51–61
- Janža, M. (2010): Hydrological modeling in the karst area, Rižana spring catchment, Slovenia, Environmental Earth Sciences, 61, 909–920
- Kong A Siou, L., Johannet, A., Borrell, V., Pistre, S. (2011): Complexity selection of a neural network model for karst flood forecasting: The case of the Lez Basin (southern France), *Journal of Hydrology*, 403, 367–380
- Kourgialas, N. N., Karatzas, G. P., Nikolaidis, N. P. (2010): An integrated framework for the hydrologic simulation of a complex geomorphological river basin, *Journal of Hydrology*, 381, 308–321
- 小鯛桂一 (1984): 岩盤透水性のグラフ表示, 地質調査所月報, **35**(9), 419-434
- Kresic, N. (2013): Water in Karst—Management, Vulnerability and Restoration. McGraw Hill, New York, 708 p.
- Kurylyk, B. L., MacQuarrie, K. T. B. (2013): The uncertainty associated with estimating future groundwater recharge: A summary of recent research and an example from a small unconfined aquifer in a northern humid–continental climate, *Journal of Hydrology*, 492, 244–253
- Kurtulus, B., Razack, M. (2007): Evaluation of the ability of an artificial neural network model to simulate the input-output responses of a large karstic aquifer: the La Rochefoucauld aquifer (Charente, France), *Hydrogeology Journal*, 15, 241–254
- Langevin, C. D., Thorne, D. T. Jr., Dausman, A. M., Sukop, M. C., Guo, W. (2007): SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A22, 39 p.
- Langevin, C. D., Hughes, J. D., Banta, E. R., Niswonger, R. G., Panday, S., Provost, A. M. (2017): Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A55, 197 p.
- Langston, A.L., Screaton, E.J., Martin, J.B., Bailly-Comte, V. (2012): Interactions of diffuse and focused allogenic recharge in an eogenetic karst aquifer (Florida, USA), *Hydrogeology Journal*, 20, 767–781
- Le Moine, N., Andréassian, V., Mathevet, T. (2008): Confronting surface- and groundwater balances on the La Rochefoucauld-Touvre karstic system (Charente, France), Water Resources Research, 44, doi:10.1029/2007WR005984
- Liedl, R., Sauter, M., Hückinghaus, D., Clemens, T., Teutsch, G. (2003): Simulation of the development of karst aquifers using a coupled continuum pipe flow model, *Water Resources Research*, 39, doi:10.1029/2001WR001206
- Luyun, Jr., R., Momii, K., Nakagawa, K. (2009): Laboratory-scale saltwater behavior due to subsurface cutoff wall, *Journal of Hydrology*, 377, 227–236

- Malagò, A., Efstathiou, D., Bouraoui, F., Nikolaidis, N. P., Franchini, M., Bidoglio, G., Kritsotakis, M. (2016): Regional scale hydrologic modeling of a karst-dominant geomorphology: The case study of the Island of Crete, *Journal of Hydrology*, **540**, 64–81
- Masciopinto, C., Palmiotta, D. (2013): Relevance of solutions to the Navier-Stokes equations for explaining groundwater flow in fractured karst aquifers, *Water Resources Research*, 49, 3148–3164
- Maxwell, R. M., Kastenberg, W. E. (1999): Stochastic environmental risk analysis: An integrated methodology for predicting cancer risk from contaminated groundwater, Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 13, 27–47
- Maxwell, R. M. (2013): A terrain following grid transform and preconditioner for parallel, large-scale, integrated hydrologic modeling, Advances in Water Resources, 53, 109–117
- McDonald, M. G., Harbaugh, A. W. (1984): *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*, U.S. Geological Survey Open-File Report 83–875, 528 p.
- Meixner, T., Manning, A. H., Stonestrom, D. A., Allen, D. M., Ajami, H., Blasch, K. W., Brookfield, A. E., Castro, C. L., Clark, J. F., Gochis, D. J., Flint, A. L., Neff, K. L., Niraula, R., Rodell, M., Scanlon, B.R., Singha, K., Walvoord, M. A. (2016): Implications of projected climate change for groundwater recharge in the western United States, *Journal* of Hydrology, 534, 124–138
- Meyerhoff, S. B., Maxwell, R. M., Revil, A., Martin, J. B., Karaoulis, M., Graham, W. D. (2014): Characterization of groundwater and surface water mixing in a semiconfined karst aquifer using time-lapse electrical resistivity tomography, *Water Resources Research*, 50, 2566–2585
- Momii, K., Shoji, J., Nakagawa, K. (2005): Observations and modeling of seawater intrusion for a small limestone island aquifer, *Hydrological Processes*, **19**, 3897–3909
- 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
- Nakagawa, K., Momii, K., Berndtsson, R. (2005): Saltwater intrusion in coastal aquifer—comparison between the CIP and MOC simulation technique, *Environmental Modeling and Assessment*, **10**, 323–329
- 仲間雄一(2013): 多良間地区における水源開発の概要, 農村振興, 767, 32-33
- Neukum, C., Hötzl, H., Himmelsbach, T. (2008): Validation of vulnerability mapping methods by field investigations and numerical modelling, *Hydrogeology Journal*, 16, 641–658
- Nikolaidis, N. P., Bouraoui, F., Bidoglio, G. (2013): Hydrologic and geochemical modeling of a karstic Mediterranean watershed, *Journal of Hydrology*, **477**, 129–138
- Nocchi, M., Salleolini, M. (2013): A 3D density-dependent model for assessment and optimization of water management policy in a coastal carbonate aquifer exploited for water supply and fish farming, *Journal* of Hydrology, 492, 200–218
- Oehlmann, S., Geyer, T., Licha, T., Birk, S. (2013): Influence of aquifer heterogeneity on karst hydraulics and catchment delineation employing distributive modeling approaches, *Hydrology and Earth*

- System Sciences, 17, 4729-4742
- Oehlmann, S., Geyer, T., Licha, T., Sauter, M. (2015): Reducing the ambiguity of karst aquifer models by pattern matching of flow and transport on catchment scale, *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 893–912
- 沖縄総合事務局(2006):沖縄本島南部農業水利事業一技術誌一, 629p.
- 小野 誠,鈴木俊一,八木啓介,井尻裕二 (2014):地下水流動に関する諸問題への混合型有限要素法の適用,地下水学会誌, 56(3),213-224
- Perrin, J., Jeannin, P. Y., Cornaton, F. (2007): The role of tributary mixing in chemical variations at a karst spring, Milandre, Switzerland, *Journal of Hydrology*, 332, 158–173
- Peterson, E. W., Davis, R. K., Brahana, J. V., Orndorff, H. A. (2002): Movement of nitrate through regolith covered karst terrane, northwest Arkansas, *Journal of Hydrology*, 256, 35–47
- Pollock, D. W. (2016): *User guide for MODPATH Version 7 A particle-tracking model for MODFLOW*, U.S. Geological Survey Open-File Report 2016-1086, 35 p.
- Qian, J., Zhan, H., Wu, J., Chen, Z. (2009): What can be learned from sequential multi-well pumping tests in fracture-karst media? A case study in Zhangji, China, *Hydrogeology Journal*, 17, 1749–1760
- Quinlan, J. F., Ewers, R. O. (1985): Ground water flow in limestone terranes: Strategy, rationale and procedure for reliable, efficient monitoring of ground water quality in karst areas. Proceedings of 5th National Symposium and Exposition on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring, 197–234
- Rayne, T. W., Bradbury, K. R., Muldoon, M. A. (2001): Delineation of capture zones for municipal wells in fractured dolomite, Sturgeon Bay, Wisconsin, USA, *Hydrogeology Journal*, 9, 432–450
- Reimann, T., Giese, M., Geyer, T., Liedl, R., Maréchal, J. C., Shoemaker, W. B. (2014): Representation of water abstraction from a karst conduit with numerical discrete-continuum models, *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 227–241
- Romanazzi, A., Gentile, F., Polemio, M. (2015): Modelling and management of a Mediterranean karstic coastal aquifer under the effects of seawater intrusion and climate change, *Environmental Earth Sciences*, **74**, 115–128
- Saller, S. P., Ronayne, M. J., Long, A. J. (2013): Comparison of a karst groundwater model with and without discrete conduit flow, *Hydrogeology Journal*, 21, 1555–1566
- Scanlon, B. R., Mace, R. E., Barrett, M. E., Smith, B. (2003): Can we simulate regional groundwater flow in a karst system using equivalent porous media models? Case study, Barton Springs Edwards aquifer, USA, *Journal of Hydrology*, 276, 137–158
- Schulze-Makuch, D. (2005): Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior, *Groundwater*, **43**, 443–456
- Shirahata, K., Yoshimoto, S., Tsuchihara, T., Ishida, S. (2018): Heterogeneous hydraulic properties of an insular aquifer clarified by a tidal response method with simple decomposition techniques, *Geologia Croatica*, 71(2), 83–90

- Shoemaker, W. B., Kuniansky, E. L., Birk, S., Bauer, S., and Swain, E.D. (2008): Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A24, 50 p.
- Singh, A. (2014): Simulation-optimization modeling for conjunctive water use management, *Agricultural Water Management*, **141**, 23–29
- Spiessl, S. M., Prommer, H., Licha, T., Sauter, M., Zheng, C. (2007): A process-based reactive hybrid transport model for coupled discrete conduit-continuum systems, *Journal of Hydrology*, 347, 23–34
- Steiakakis, E., Vavadakis, D., Kritsotakis, M. (2015): Simulation of springs discharge from a karstic aquifer (Crete, Greece), using limited data, *Environmental Earth Sciences*, 74, 4303–4315
- 菅原正巳(1972):流出解析法, 共立出版, 257p.
- Sutton, J. E., Screaton, E. J., Martin, J. B. (2015): Insights on surface-water/groundwater exchange in the upper Floridan aquifer, north-central Florida (USA), from streamflow data and numerical modeling, *Hydrogeology Journal*, 23, 305–317
- 高橋昌弘, 籾井和朗(2016): 塩水の侵入・排除過程に及ぼす分散 長の影響, 地下水学会誌, **58**(1), 9–30
- Trefry, M. G., Muffels, C. (2007): FEFLOW: a finite-element ground water flow and transport modeling tool, *Ground Water*, **45**, 525–528
- Trichakis, I. C., Nikolos, I. K., Karatzas, G. P. (2009): Optimal selection of artificial neural network parameters for the prediction of a karstic aquifer's response, *Hydrological Processes*, **23**, 2956–2969
- Underwood, M. R., Peterson, F. L., Voss, C. I. (1992): Groundwater lens dynamics of Atoll Islands, Water Resources Research, 28(11), 2889– 2902
- UN Environment (2018): Progress on integrated water resources management. Global baseline for SDG 6 Indicator 6.5.1: degree of IWRM implementation
- Vassena, C., Rienzner, M., Ponzini, G., Giudici, M., Gandolfi, C., Durante, C., Agostani, D. (2012): Modeling water resources of a highly irrigated alluvial plain (Italy): calibrating soil and groundwater models, *Hydrogeology Journal*, 20, 449–467
- Walsh, S. D. C., Saar, M. O. (2010): Macroscale lattice-Boltzmann methods for low Peclet number solute and heat transport in heterogeneous porous media, *Water Resources Research*, 46, doi:10.1029/2009WR007895
- Wang, Y., Brubaker, K. (2014): Implementing a nonlinear groundwater module in the soil and water assessment tool (SWAT), *Hydrological Processes*, 28, 3388–3403
- Witkowski, A. J., Rubin, K., Kowalczyk, A., Róźkowski, A., Wróbel, J. (2003): Groundwater vulnerability map of the Chrzanow karst-fissured Triassic aquifer (Poland), Environmental Geology, 44, 59–67
- Worthington, S. R. H. (2009): Diagnostic hydrogeologic characteristics of a karst aquifer (Kentucky, USA), *Hydrogeology Journal*, 17, 1665– 1678
- Xanke, J., Jourde, H., Liesch, T., Goldscheider, N. (2016): Numerical long-term assessment of managed aquifer recharge from a reservoir into a karst aquifer in Jordan, *Journal of Hydrology*, **540**, 603–614

- Xu, Z., Hu, B. X., Davis, H., Cao, J. (2015): Simulating long term nitrate-N contamination processes in the Woodville Karst Plain using CFPv2 with UMT3D, *Journal of Hydrology*, **524**, 72–88
- Xu, Z., Hu, B. X. (2017): Development of a discrete-continuum VDFST-CFP numerical model for simulating seawater intrusion to a coastal karst aquifer with a conduit system, *Water Resources Research*, 53, 688–711
- Yager, R. M., Plummer, L. N., Kauffman, L. J., Doctor, D. H., Nelms, D. L., Schlosser, P. (2013): Comparison of age distributions estimated from environmental tracers by using binary-dilution and numerical models of fractured and folded karst: Shenandoah Valley of Virginia and West Virginia, USA, *Hydrogeology Journal*, 21, 1193–1217
- 安元 純,阿部真己,中野拓治 (2015):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,土木学会論文集 B1 (水工学),71(4), I_217-I_222
- 吉本周平, 土原健雄, 石田 聡, 今泉真之 (2008): 炭酸塩岩帯水 層における不飽和浸透に関する研究レビュー, 農村工学研究所 技報, 207, 109-126
- 吉本周平, 土原健雄, 白旗克志, 石田 聡 (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, 土壌の物理性, **131**, 37-43
- 吉本周平, 土原健雄, 白旗克志, 石田 聡 (2016a): 名水を訪ね

- て (113) 多良間島の地下水,地下水学会誌, **58**(2), 227-240 吉本周平,浅井和由,土原健雄,白旗克志,石田 聡 (2016b): 琉球石灰岩分布地域における淡水レンズ中の地下水滞留時間の 推定 一地下水中の六フッ化硫黄の濃度,硝酸イオンの安定同位 体比の測定による検討一,農業農村工学会論文集, **84**(2), I_159-I_174
- Yoshimoto, S., Tsuchihara, T., Ishida, S., 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
- Zhao, J., Lin, J., Wu, J., Yang, Y., Wu, J. (2016): Numerical modeling of seawater intrusion in Zhoushuizi district of Dalian City in northern China, *Environmental Earth Sciences*, 75, 805
- Zheng, C., Wang, P. P. (1999): MT3DMS, A modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user's guide, U.S. Army Engineer Research and Development Center Contract Report SERDP-99-1, 202 p.

原稿受理 平成31年1月15日

A Review of Recent Studies on Groundwater Modeling Methods for Heterogeneous Carbonate Aquifers

YOSHIMOTO Shuhei*, TSUCHIHARA Takeo*, SHIRAHATA Katsushi*, NAKAZATO Hiroomi* and ISHIDA Satoshi*

*Groundwater Resources Unit, Division of Regional Resources Engineering

Abstract

Groundwater flow and solute transport in karstified carbonate aquifers show their characteristics strongly affected by the conduit networks. In the recent studies, heterogeneity of the carbonate aquifers such as fractures and conduits has been expressed into the distributed models for groundwater simulation as the following two manners: A different value of hydraulic conductivity has been given for each of divided zones of the analysis domain in the equivalent porous medium (EPM) models; and the conduit flow has been expressed mathematically as hydraulic equations and incorporated into the EPM models. It has been pointed out that the EPM assumption has a difficulty to appropriately reproduce solute movement driven by the turbulent flow via conduits. On the other hand, models considering conduit flows as hydraulic expressions can lead to more realistic models, but spatial information of the conduit networks is indispensable for accurate calculation. For carbonate aquifers in the Ryukyu Islands of Japan, groundwater flow and saltwater-freshwater interaction can be modelled with EPM for areas without obvious conduit network and also with application of the hydraulic conduit flow programs for areas where major caves exist.

Key words: Aquifer management, Karst hydrology, Conduit flow, Distributed groundwater model, Ryukyu Limestone, Subsurface dams, Freshwater lens