

氏 名	Fadoumo Ali Malow
学位 (専攻分野の名称)	博 士 (農業工学)
学 位 記 番 号	甲 第 758 号
学位授与の日付	平成 30 年 3 月 20 日
学 位 論 文 題 目	Development of a 3D water flow modelling based on scarce data for arid land water resources management: Case study of Ambouli and Kourtimalei Watersheds in Djibouti
論 文 審 査 委 員	主査 教 授 ・ 博 士 (地球環境科学) 島 田 沢 彦 教 授 ・ 博 士 (農学) 岡 澤 宏 教 授 ・ 博 士 (工学) 本 田 尚 正 准 教 授 ・ 博 士 (農業工学) 関 山 絢 子 工 学 博 士 登 坂 博 行*

論 文 内 容 の 要 旨

Water shortage and groundwater degradation have become two primary environmental concerns for Djibouti since the 1990s. The local aquifers in the capital city, as the dominant sources for domestic and agricultural water supply, are depleting due to groundwater abstraction and continuous drought in recent years with rapid urbanization and increasing water consumption. Therefore, understanding the hydrogeological system is fundamental for a sustainable water resources management. This work focused on two watershed specifically (Ambouli and Kourtimalei) because of the available information.

Due to semi-arid to arid climatic conditions the mean annual precipitation averages only ca.150 mm in a very erratic uneven way. The two main types of aquifer systems are encountered in the Republic of Djibouti: sedimentary aquifers (25%) and volcanic hard rock aquifers (75%). Wadi alluvial aquifers are located along the main wadis and are exploited in rural areas by means of more than 700 shallow wells and a few tubular wells for domestic, agricultural and livestock needs. Volcanic aquifers of limited extent (<2,000 km²), receive localized recharge through wadi alluvia aquifers. These local volcanic aquifers are the most intensively exploited aquifers, particularly for Djibouti city, which uses about 35,600 m³ day⁻¹.

The country, especially the capital city, has to face continuously difficulties in its water supply which is derived by 95% from groundwater. First, the arid climatic conditions in the recent years had led to a recurrent drought period. The economic development programs and population growth in Djibouti city increased groundwater

*東京大学名誉教授

demand leading to an overall overexploitation of the resources and water quality degradation. Future water requirement (2020, 2030) are estimated at three times more than the present production rate. The new phase of water resource development must inevitably be followed by management and protection of the aquifers systems and not just the search for the new groundwater resources.

In order to understand the groundwater dynamics and to improve the management of water resources this research proposes a 3D water flow model to represent the groundwater level (surface also) and flow system in general. To create the objective flow model, a general-purposed numerical simulator GETFLOWS was selected. It supports multiphase, multicomponent flow, gas dissolution to water, solute and heat transport. It also traces the hydrologic mass and flow processes with fully-coupled surface and multi-phase subsurface fluids on a multidimensional finite difference models. The capability of GETFLOWS has been demonstrated in several case studies including fluid flow modelling for watershed system management.

The first case study focuses on the simulation of a surface terrestrial water flow process model in the area of Kourtimalei (40.6 km²) in Djibouti using GIS, RS and GETFLOWS. A trial and error method were used to calibrate the model using observed surface water level of the pond. The manual calibration was performed until the surface water level of the pond RMSE to be 0.40 m and $r > 0.8$ with satellite derived pond extent comparison. The analysis showed that GETFLOWS successfully simulated the surface water flow process. We conclude that the use satellite derived datasets can help calibrate and evaluate GETFLOWS hydrologic model for an ungauged watershed like in the present case.

In the second case study, in order to investigate the hydrological processes in the Ambouli watershed, (643 km²) using GETFLOWS. The hydrogeological system is reproduced according to sparsely distributed borehole data and based on available geological, hydrogeological, geomorphological, climatological and pedological data. Groundwater levels measured in 2010 are used for the steady state calibration and are employed then as initial conditions for the transient simulations. Good agreement between simulated and observed groundwater heads with r^2 of 0.9 is obtained. The transient groundwater flow simulations reflect the observed drawdown of the last 40 years for 1 well and show the formation of a depression cone in the intensively pumped area.

Understanding the hydrogeological system is fundamental for a sustainable water

resources management. However, in Djibouti, the available information on water resources is scarce and insufficient. The present work focused on case study of watershed in Djibouti by the setting up and calibrating of numerical hydrologic model in effort for sustainable management. Despite the lack of information, the model was able to reproduce correctly the main behavior of the system with a reasonable accuracy for both surface and subsurface level. However, some additional improvements should be made for the model to increase in the representativeness of the system. In the future this tool can be used as part of an integrated watershed management tool.

和文要旨

アフリカ大陸東北部の「アフリカの角」に位置する国々は、2007年から続いた大干ばつによる貧困や飢餓の危機に常にさらされている。中でもジブチ共和国は、地溝帯の陸部北端に位置する立地条件の影響で国土の大部分を玄武岩で覆われた地表面環境であることに加え、年間降水量が150 mm程度、夏季の最高気温が40°Cを上回る最も自然環境の過酷な国である。流水河川は存在せず、ワジ（涸れ川）のみ存在し、水資源はほとんど地下水に依存している（年間消費水量21,700,000 m³の98%）。このような環境下のジブチにおいては降雨に依存した作物栽培は成立せず、ワジ周辺において得られる浅層水が農業・畜産・生活用水として主に利用されてきた。水資源不足・汚染の問題は1990年代からジブチにおける課題となってきた。しかし、このような水資源の賦存量や水循環は把握がなされていないのが現状である。本研究はジブチにおける持続的水資源管理に資する手法の開発を目指し、アンブリ・ワジ (Wadi Ambouli) 流域 (643 km²) およびクルチマレ (Kourtimalei) 集水域 (40.6 km²) を対象地区とし、統合型水循環シミュレータ (GETFLOWS) を用い3D広域水循環モデルの構築を行った。

シミュレーションの結果検証は、Wadi Ambouli 流域ケースにおいては、算出される定常時の地下水位値 (m) と現地井戸・ボーリング孔での実測値データ (Ministry of Agriculture, Fishery and Livestock in Charge of Marine Resources) との比較、Kourtimalei 集水域ケースにおいては、2013年8月～12月の雨量計による実測雨量イベントに対する農業用ため池の面積のシミュレーションと時系列衛星画像 (Landsat-8) との比較により行った。モデルに必要なとされるパラメータは標高図 (Aster-GDEM)、地質図 (ORSTOM 1985)、井戸・ボーリングデータ (Ministry of Agriculture, Fishery and Livestock in Charge of Marine Resources, Djibouti)、降雨・気温 (Meteorology Agency Djibouti および実測データ) から得た。これらのパラメータを用い、表流水流れにマンニングの平均流速公式、地下多孔質媒体中の空気・水2相流れに一般化ダルシー則を用いた水循環連成解析モデルを用い、未知の水文地質パラメータ (透水係数・有効空隙率) をトライアル・アンド・エラーにより実測値と

の誤差が最も小さくなる値 ($r^2 > 0.9$) を決定した。数値シミュレーションの結果、定常状態における地下水動態を推定可能 (地下水位 RMSE : 11.37 m) であること、降雨イベントベースの流出動態を高精度で推定可能 (ため池水位 RMSE : 0.40 m, $\kappa > 0.8$) であることを示した。

審査報告概要

本研究では「アフリカの角」に位置するジブチ共和国を対象に、乾燥地水資源管理を目的とし、気象データ・GIS データを駆使し地質の水文地質パラメータをトライアル・アンド・エラーにより決定することにより、不十分なデータ条件下にありながら、アンブリ・ワジ (Wadi Ambouli) 流域 (643 km²) およびクルチマレ (Kourtimalei) 集水域 (40.6 km²) における 3D 水循環モデルを構築し、高い精度で水循環を再現できることを検証した。水循環シミュレータには、表流水流れにマンシングの平均流速公式、地下多孔質媒体中の空気・水 2 相流れに一般化ダルシー則を用いた統合型水循環シミュレータ (GETFLOWS) を採用した。標高図 (Aster-GDEM, ALOS-World3D-5m)、地質図 (ORSTOM 1985)、井戸・ボーリングデータ (Ministry of Agriculture, Fishery and Livestock in Charge of Marine Resources, Djibouti) をベースモデルとし降雨・気温 (Meteorology Agency Djibouti および実測データ) 用いて、初期化・最適化・再現シミュレーションを行った。トライアル・アンド・エラーにより、沖積砂質土 (Alluvial Fan) および玄武岩石被覆地 (Basalt Rock) におけるマンシングの粗度係数 (n) はそれぞれ、0.040, 0.027 と決定され、沖積層 (Alluvium Deposit) および玄武岩層 (Gulf, Stratoid, Dalha, Somali Basalts) の絶対浸透率 (K) はそれぞれ、 $1.37 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ (初期値同値)、 $0.9 \sim 3.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ と決定された。結果検証は、Wadi Ambouli 流域ケースにおいては、算出される定常時の地下水位値 (m) と現地井戸・ボーリング孔での実測データとの比較、Kourtimalei 集水域ケースにおいては、2013 年 8 月～12 月の雨量計による実測雨量イベントに対する農業用ため池の面積のシミュレーションと時系列衛星画像 (Landsat-8) との比較により行った。数値解析の結果、定常状態における地下水動態が推定可能 (地下水位 RMSE : 11.37 m) であること、降雨イベントベースの流出動態が高精度で推定可能 (ため池水位 RMSE : 0.40 m, $\kappa > 0.8$) であることを示した。さらにジブチ・シティ周辺の取水地点における 1960 年代からの地下水揚水量 ($245 \text{ m}^3 \text{ day}^{-1}$) を加味し、地点における ca. 1.5 m/40 yr の地下水低下減少を高精度 (RMSE : 0.15 m) で推定することに成功した。また、Ambouli 流域の各玄武岩帯水層内に蓄積されている地下水賦存量の推定分布図を示すことが可能となった。

これら得られた研究成果は、ジブチ国の今後の水資源管理に資する技術として有用であり、

他の乾燥地での広域水循環把握にも適用可能であることなどを評価し、審査員一同は博士（農業工学）の学位を授与する価値があると判断した。