# 統合型水循環解析を用いた別府湾奥部の水・エネルギー・食料ネクサスの解明

八千代エンジニヤリング株式会社　正会員　○石井　明
同上　正会員　竹内　博輝

## １．研究の目的

大分県別府市は火山地熱地域に位置し，全国有数の温泉地である．別府温泉においては，明治時代中期から末期にかけて進行した多数の温泉井戸掘削，昭和 30～40 年代の高度経済成長期における高地部での大規模な温泉開発が低地部での温度低下，泉質変化に影響を与えていることは継続的に実施されてきた温泉一斉調査結果[1)]等で指摘・懸念されているところである．また，2011 年 3 月 11 日の東日本大震災を契機に環境・エネルギー問題の対応策の一環として，温泉水が有する熱エネルギーの利用により温泉発電開発が進み，更なる温泉水の利用がもたらす水環境の悪化が懸念されている．さらには，近年，淡水地下水の海底湧水，温泉排水が生態系（水産資源）にも影響を与えていることが調査・研究により明らかになってきた．

これらを踏まえ，本研究では，別府湾奥部を対象に健全な水循環系を保持し，温泉水の直接的・間接的利害関係者間の調整を行いながら持続可能な社会の在り方を構築するため，陸水～地下水～海水に至る水循環機構の解明，定量的な把握を地圏流体挙動を完全に連成させた流体シミュレータ GETFLOWS[2)]を用いて実施し，水収支による現状把握とシナリオ検討方法および水産資源のポテンシャル評価方法について検討を行った．

## ２．統合型水循環モデルの構築

地形起伏や主要河道流域等を参考として別府湾奥部の水循環域を水平解像度約 100m，垂直方向は流体移動がモデル底部と干渉しない十分な距離として 1,000m 迄とし，陸域地形は国土地理院の 5m メッシュ基盤地図情報（数値標高モデル），海域地形は海底地形デジタルデータ，地質構造は産総研の 20 万分の 1 シームレス地質図から第三紀層を風化・緩みゾーンと新鮮部に区分し，主要平野に分布する第四紀層に対しては分布域と基底面標高を設定し厚さ 1m の表土層を設定した情報をベースに，微動探査結果[3)]による詳細な地質情報を組み込んだ三次元格子モデルを構築した（図１）．また，上水道水源確保のための河川取水や地下水揚水および温泉水揚水の人為的な水利用もモデル化を行った．

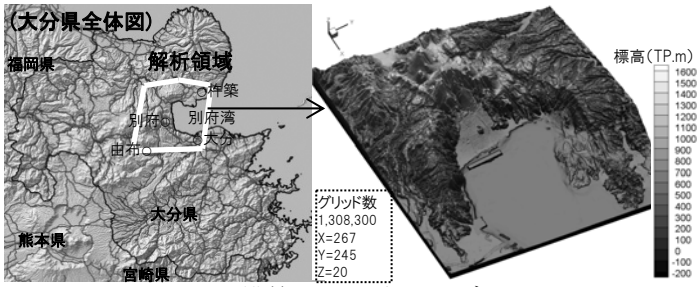


図１－構築した三次元モデル

## ３．モデルの再現検証

モデルの検証計算は，流況観測が実施されている 2013～2014 年を対象とし，気象条件は，近傍の気象観測所の観測データから，日雨量および日平均気温をティーセン法により空間分布させた．なお，平均気温は標高による低減率を考慮し，蒸発散はハーモン式で評価を行った．

また，熱条件は，モデル底面には活動度指数[4)]から推定した地下温度，大気には上記の日平均気温，海底温度には日本近海の表面温度[5)]を与えた．以上の条件で計算した結果（図２），計算と観測データ[6)]のマッチングが良好であり，構築モデルの妥当性が示せた．

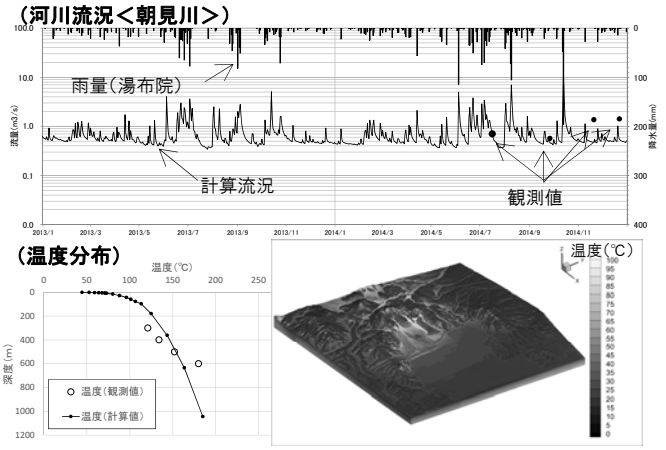


図２－再現結果（河川流況，温度分布）の一例

## ４．水循環機構の把握

構築した解析モデルを用いて，平水年(1993)/渇水年(1994)/豊水年(2008)毎に図３に示す集計範囲の水循環諸量，地温を解析し，水収支図，温度分布を整理した(図４，図５，表１)．

キーワード　統合型水循環解析，水収支模式図，地熱，海底湧水量，水産資源，ネクサス
連絡先　〒111-8648　東京都台東区浅草橋 5-20-8CS タワー　八千代エンジニヤリング株式会社　ＴＥＬ03-5822-6234

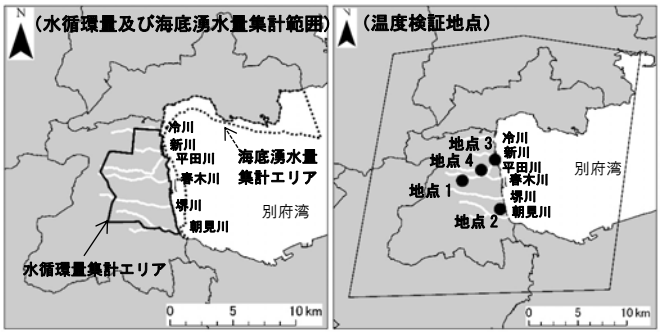


図３－水循環量及び海底湧水量集計範囲，温度検証地点

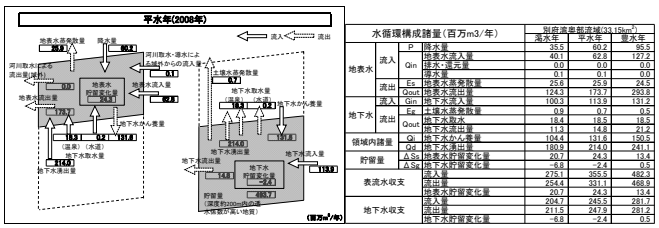


図４－水収支図（平水年），水循環諸量の整理結果

水収支では，地下貯留量は豊水年は僅かにプラスであるが，平水年および渇水年はマイナスと評価され，年間降水量が平水年以下で水位すれば地下水貯留量は減少しており，現状の水利用では今後の水環境の悪化が示唆された．

また，温度は，地表付近は降水量が少ない状況では温度が高くなり，逆に，地下へ涵養される水量が多くなる状況では地表層付近の低温化が起きる．一方，深部の温度は各パターンともほぼ一定値であり，熱源に与える影響は少ないことが分かった．

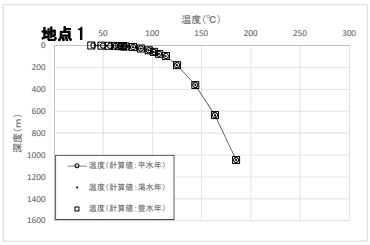


図５－温度分布図

## ５．水産資源のポテンシャル評価

温泉一斉調査（H28.11.13）の温泉水採水による栄養塩類測定結果（栄養塩濃度）（図６）に，前述の解析よる海底湧水量を用いて栄養塩フラックスを算出し，海底へ供給された栄養が全て一次生産に利用されると仮定することで，生物生産に果たすポテンシャル評価を行った（表２）．なお，海底湧水量は一次生産が行われると想定される深度-30m より浅い沿岸域沿いで集計した．

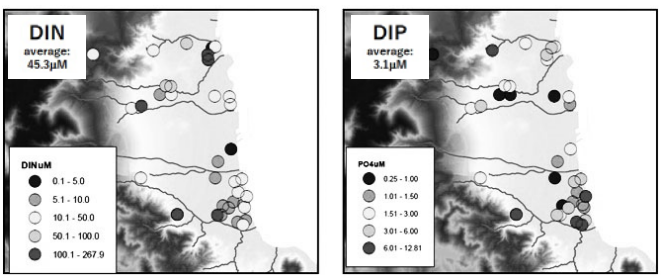


図６－窒素とリンの平均栄養塩濃度 [7]

表２－海底湧水量と栄養塩輸送量の関係

| | 海底湧水量 ($m^3$/year/) | 栄養塩輸送量 | |
|---|---|---|---|
| | | 窒素 N(kgN/day) | リン P(kg/P/day) |
| 渇水年 | $25.0\times10^6$ | 43.5 | 6.6 |
| 平水年 | $37.5\times10^6$ | 65.2 | 9.9 |
| 豊水年 | $51.3\times10^6$ | 89.2 | 13.5 |

渇水年と豊水年では栄養塩輸送量は約 2 倍の差が生じている．前述の水収支図と併せて陸域の水資源状況の変化を海底湧水量の変化として影響評価でき，海底湧水量を介する別府湾の栄養塩輸送量が推定可能となった．

## ６．まとめ

本研究では，別府湾奥部を対象に３次元地下水シミュレーションモデルを構築し，水循環機構の解明，定量的な把握を行い，水収支による現状把握とシナリオ検討方法および水産資源のポテンシャル評価方法を示した．

流域の水循環量を表した水収支模式図，海底湧水量と栄養塩輸送量の関係は，自然や社会の変化が水循環系および水産資源に及ぼす影響を評価できるものである．今後は，健全な水循環系を保持し，社会経済の維持，発展のための温泉水利用の在り方，温泉水の直接的・間接的利害関係者間の調整のため本成果を活用していく．

## ７．謝辞

本研究は，総合地球環境学研究所のネクサスプロジェクトに関わる研究者からの協力，助言を得てとりまとめを行った．ここに記して敬意を表す．

## 参考文献

1) 2016(平成 28)年 11 月 13 日の別府温泉一斉調査

2) Tosaka H., Itho K. and Furuno T. (2000): Fully Coupled Formulation of Surface flow with 2-Phase Subsurface Flow for Hydrological Simulation, Hydrological Process, 14, 449-464

3) Yuji Miyashita (2017): The relationship between flow path of Beppu Onsen and S velocity distribution by microtremor array survery, A-HW34-P16

4) 数値地質図 GT-4 全国地熱ポテンシャルマップ（2009），国立研究開発法人 産業技術総合研究所

5) 理科年表 平成 28 年, pp624-625, 丸善出版, 2016

6) Fujii, M., S. Tanabe, M. Yamada, T. Mishima, T. Sawadate, and S. Ohsawa (2017), Assessment of the potential for developing mini/micro hydropower: A case study in Beppu City, Japan, Journal of Hydrology:Regional Studies, 11, 107-116.

7) 水・エネルギー・食料ネクサスとガバナンス-温泉編-, 6.3 章, 近代科学社, 2018