

47. 熊本地域における地表水と地下水の統合型水循環モデル構築の試み

○菊池英明（八千代エンジニアリング株式会社・九州支店）・大石朗（同・大阪支店）・中元道男（国土交通省熊本河川国道事務所）・山田文彦（熊本大学大学院自然科学研究科）・才田 進（同・地下水環境リーダー育成国際共同教育拠点 (Gelk)）

1. はじめに

熊本地域（11市町村、約100万人）（図-1参照）は、生活用水をほぼ100%地下水に依存している特異な地域である。近年における江津湖の湧水量の減少傾向や託麻台地周辺の地下水位の低下傾向などを踏まえて平成16年から白川中流域の休耕田を利用した湛水（涵養）事業などの対策が試みられている。一方、熊本市およびその周辺域では地下水中の硝酸性窒素濃度の上昇傾向が見られる地点も出てきていることから、地下水の量と質の両面からの保全対策が急務とされている。

熊本地域では、これまでの熊本大学、熊本県・熊本市¹⁾²⁾、国土交通省³⁾⁴⁾等の調査・研究により広域的な水文地質構造と定性的な水循環機構が概ね把握されつつある。これらの知見から、阿蘇外輪山西麓域の水循環機構は、白川や菊池川、緑川流域の自然的・人工的水循環系を通じて河川水と地下水の交流がダイナミックに行われていることが分かってきている。したがって、本地域における水管理は地表水と地下水を一体として捉える“総合水管理”の視点が必要である。

このため、総合水管理支援ツールとして、表流水と地下水の流動を定量的に明らかにするため、熊本地域拡大流域圏（菊池川・白川・緑川流域）について地表水と地下水を一体的に解析する「統合型水循環モデル」の構築を試みたものである。

2. 熊本地域の水循環機構の概要

2.1 熊本地域の水環境変化の現状

熊本地域の水環境の代表例として、白川中流域の湛水田（作付け田）の面積及び白川河川流況（陣内地点）ならびに湧水地で有名な江津湖の湧水量の経年変化を図-2に示す。



図-1 熊本地域と熊本地域拡大流域圏

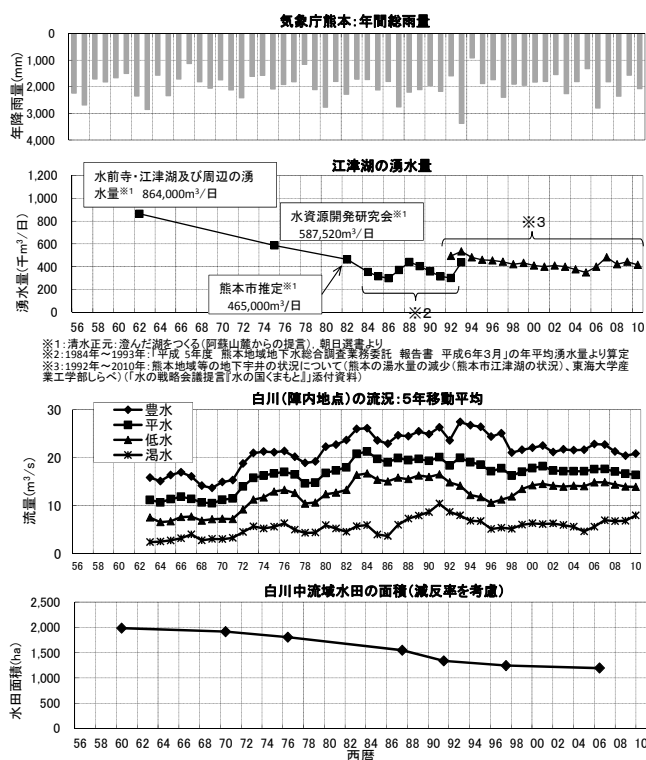


図-2 白川中流域の水環境変化の現状

図-2 より江津湖の湧水量は、現在、日量約 40 万 m³程度で、約 50 年前（1962 年）の湧水量約 86 万 m³の約半分まで減少している。次に、白川中流部の河川流況は、1970 年頃から増加を始め、1997 年以降横ばいとなっている。これに対して、白川中流域の湛水田面積は減反政策が始まった 1970 年より減少し始め、1997 年以降減少傾向が頭打ちとなっており、湛水田面積の減少と河川流況の増加が呼応している。これは、減反政策開始後に減反率の上昇に伴って、かんがい取水量が減少し、白川河川流量を回復させているためである。また、現在の湛水田面積は、1960 年の約半分まで減少しており、江津湖の湧水量も半減していることを考慮すると白川中流域の湛水田面積の減少による地下水涵養量の減少が江津湖の湧水量に大きく影響していると想定される。

このように、白川中流域の湛水田面積の減少が、白川河川流量の増加（回復）や江津湖湧水量の減少に呼応しており、これら白川の水環境変化の現状からも地表水（河川水）と地下水（湧水量）とを一体として捉えることの必要性を示唆している。

2. 2 熊本地域の水循環機構の概要

熊本地域の地下水の涵養域は、阿蘇外輪山西麓域の合志市、大津町、菊陽町にかけての菊池台地、植木台地から白川中流域、高遊原台地にまたがる広大な地域である（図-1 参照）。この地域には約 27 万年前から約 9 万年前までに阿蘇火山の 4 回にわたる大規模な噴火によって噴出された透水性の高い阿蘇火砕流堆積物（Aso-1~4）が厚く堆積しており、図-3 に示すように熊本地域の水循環機構の中で主要な地下水帯水層の役割を果たしている。また、図-4 の地質断面図に示すように、低～難透水性の花房（布田）層が、第 1 帯水層（浅層地下水）と第 2 帯水層（深層地下水）の 2 層構造を作っている。

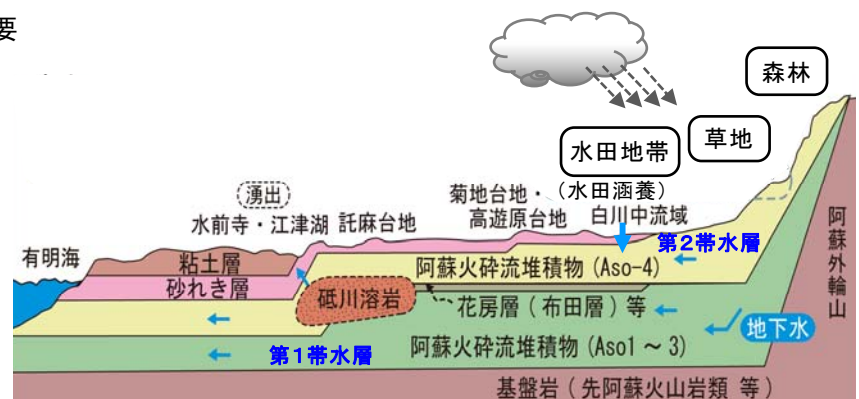


図-3 阿蘇～熊本平野断面での水文地質構造模式図

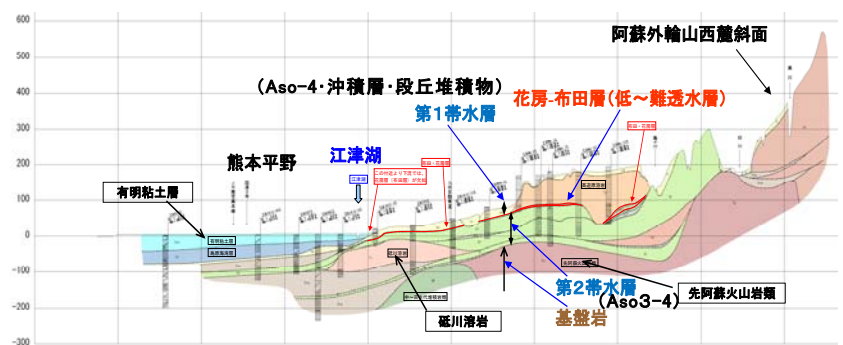


図-4 阿蘇～熊本平野断面での地質断面図

これらの涵養域に降った雨は、地下水となり阿蘇火砕流堆積物中を地形に沿って流れ、熊本市南東部地下にある砥川溶岩と呼ばれる多孔質で割れ目が発達した溶岩に一旦蓄えられ、託麻台地周縁部に位置する多くの湧水地から湧出した後、再び河川水（緑川）に戻る。

熊本地域地下水総合調査（平成 7 年 3 月 熊本県・熊本市）¹⁾によると、熊本地域の地下水涵養量は年間約 7 億 m³と見積もられているが、土地利用別では、台地部の水田 46%、畑・草地など 41%、山地が 13%と推定されている。特に白川中流域の水田は、約 1,500ha の面積であるが、年間約 1.5 億 m³を涵養しており、熊本市の水道の年間給水量 0.81 億 m³を上回っている。このように水田や畑地などの農地が地下水涵養に大きな役割を果たしている。

水田開発は 1588 年に肥後入国した加藤清正による白川中流域の水田開発事業に始まる。白川から

かんがい取水して台地上の水田に導水するための多くの井手を開削した。これにより、河川水→かんがい水→地下水への転化という人為的な水循環系をつくり出した。すなわち、熊本地域に本来あった阿蘇火砕流堆積物という自然的水循環系に約 400 年前の水田開発による人為的水循環系が絶妙に組み合わさって、豊かな地下水に恵まれた現在の水循環システムをつくり上げていると言える。

3. 地表水と地下水の統合型水循環モデルの概要

熊本地域拡大流域圏での広域の地下水流動を精度良くシミュレートするには、深さ方向の帯水層構造を的確に反映可能な完全三次元モデルが必要である。また、熊本地域では施肥や畜産廃棄物由来の硝酸性窒素による地下水水質汚染の解析にも対応できることが要求される。

このような条件を考慮して、本研究では、東京大学大学院工学系研究科登坂博行教授が開発した統合型水循環モデル⁵⁾⁶⁾を用いるものとする。

当該モデルは、地表水と地下水の流れを連成して解き、水質解析も可能な統合型水・物質循環解析モデルである。図-5 に統合型水循環モデルにおける地表付近の地表水と地下水の流れの概念を示す。図-5 に示すように、統合型水循環モデルでは、地表水の流れは開水路流れ（マニング則流れ）とし、地下水の流れは、気・液 2 相ダルシー流れとして記述する。また、両者をつなぐ浸透と湧出は、2 相ダルシー流れとして考える。

このように、地表水の流れと地下の流れを同時に扱う統合型水循環モデルでは、マニング型の地表水の流れを多相ダルシー型非線形流れの枠組みの中に同一形式で取り込むことで連成した解析を可能としている。

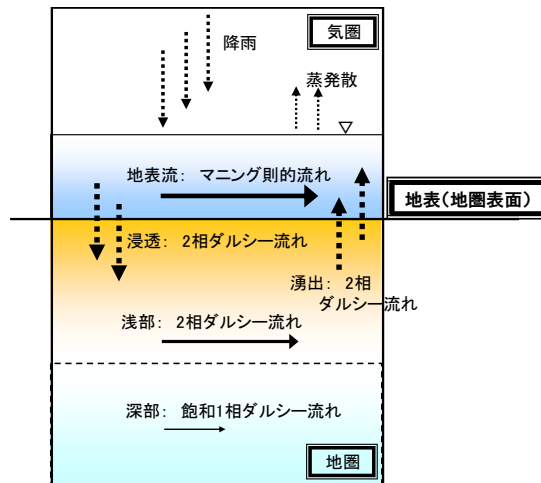


図-5 表流水と地下水の統合解析の概念

4. 熊本地域における地表水と地下水の統合型水循環モデルの構築

4. 1 解析対象領域

緑川流域は湧水群が多く、白川流域から涵養された地下水の湧出域となっている。また、白川流域の北側の菊池川流域は、広域地下水流動場として見ると、熊本地域地下水の涵養域の一部になっているものと考えられる。このため、水循環モデル化の対象領域は、菊池川流域、白川流域及び緑川流域を全て含めた約 3,000km² の範囲とした。また、熊本平野から有明海に流出する地下水流を考慮するため有明海海底部もモデル領域とした（図-6 参照）。

4. 2 帯水層モデル

帯水層モデルは、熊本地域全体の水文地質モデル検討結果より設定した。水文地質モデルは、「熊本県地質図 1/10 万 2007（熊本県地質図編纂委員会）」、「熊本市周辺地盤図 2003（熊本県地質調査業協会）」などの資料を基本に、熊本県・熊本市の既往調査資料¹⁾²⁾等及びボーリングデータを参照した。帯水層モデルは、まず、水文地質モデル検討結果より 5km ごとの地質グリッド断面を作成した後、主要帯水層として沖積層・段丘堆積物、第 1 帯水層、第 2 帯水層の下面コンターを作成し、

これらの成果を基に対象領域の各帯水層分布を3次元数値モデルとして作成した。

4. 3 水循環3次元格子モデル条件

水循環シミュレーションモデルの概要を表-1に示す。解析領域の3次元格子モデルの空間分解能は、流域区分や詳細エリアの部分的な解析ができる精度を保つことを目的として100～500mとした。地表面の標高については国土数値情報の50mメッシュ標高を用いて設定した。

本モデルでは、熊本地域では地下水涵養に水田湛水が果たす役割が大きいこと、また、生活用水のほとんどを地下水取水によって

ることから、降雨⇒地表水⇒地下水への自然循環系に加え、農業用取水、井戸取水等の人工循環系もモデルに組み込んだ。特に、熊本地域の主な水田涵養域である白川中流域では、平成19年より農業取排水量（主要7取水堰掛用水路）の観測を通年実施し、かんがい期取水量の把握ならびに非かんがい期の管理用水の把握を実施した。これにより、白川本川観測流量と農業用水取水量との関係が把握できてモデル同定精度の向上に資することができた。

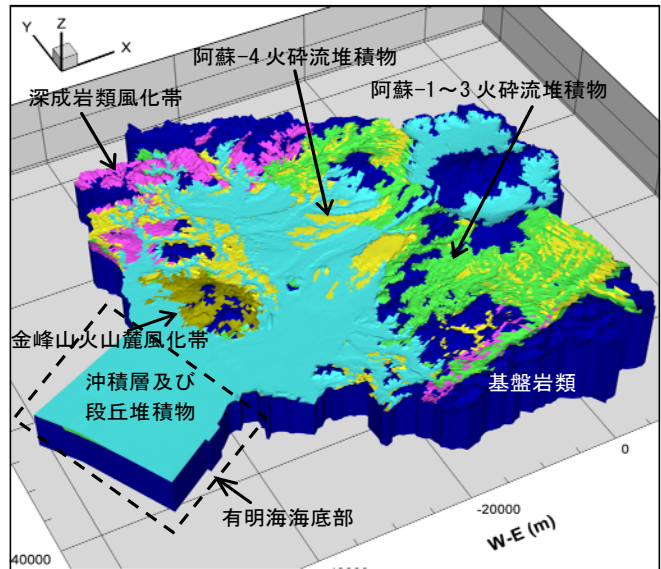


図-6 3次元帯水層モデル（鳥瞰図）

表-1 水循環シミュレーションモデル概要

項目	概要	
モデル諸元	解析領域	・東西方向 60 km×南北方向 70 km (約 3,000 km ²), 深度 -2,000m
	解析格子数	・総メッシュ数: 1,404,000, 東西方向: 208, 南北方向: 225, 深さ方向: 30 層
	空間分解能	・100～500m
水文データ	地形	・陸域: 50mDEM, 海域: 国土地理院 1/200,000 (有明海海底部地質を考慮)
	降水	・データ: 気象庁、国土交通省観測データ ・設定法: ティーセン法による流域平均雨量を設定
	気温	・データ: 気象庁観測データ ・各地域気温設定法: 領域内 8 観測所データに基づき気温減率による標高補正による
	蒸発散 気圧	・日射、気温に基づきソーンスウェイト式より算定。 ・標準大気圧
水理質	土地利用別 地表面水理定数	・土地利用別(水田、畑地、森林、草地、建物用地、その他幹線用地、山地河川、沖積河川等)にマンニングの粗度係数と透水係数を設定
	帯水層(地質) 区分	・第1帯水層(沖積層・段丘堆積物、阿蘇-4火砕流堆積物)、布田層・花房層、第2帯水層(阿蘇-1～3火砕流堆積物)、基盤岩類(先阿蘇火山岩類等)
	地盤物性	・3D水文地質モデルを作成した後に数値モデル化(各帯水層下面標高データ)。各帯水層の水理定数データ: 絶対浸透率(透水係数)、有効空隙率等
	2相流物性	・各帯水層別に毛細管圧力曲線、相対浸透率曲線を設定
人工水循環系	農業用排水系統	・菊池川、白川、緑川、坪井川の農業用排水ネットワークを考慮 ・主要な取水堰と用排水系統を考慮
	水田	・水田浸透能は減水深データにより設定 ・堰取水量=堰掛水田面積×当該かんがいエリア平均減水深+水路管理用水 ・各堰の用水路観測データに基づき非かんがい期取水量を考慮
	人工涵養(湛水)事業 水道用水(地下水取水井戸)	・水田湛水による涵養量(公表値)を堰取水量に考慮 ・井戸台帳データから井戸位置、ストレーナー深度(取水深度)を設定
境界条件	土地利用	・データ: 国土数値情報土地利用細分メッシュに基づき加工 ・S30,S40,S53,S59,H1,H9,H17の土地利用図を作成(S30,S40:国土基本図より)
	固定水位境界	・海域を海水準0m固定、解析領域外周流域界は不透水壁境界

5. 統合型水循環モデルによるシミュレーション結果

モデルの検証は、河川流量と地下水位の再現計算により実施した。検証期間は近年の平成14年～18年の5年間とし、計算ステップは日単位での非定常解析を行った。なお、地下水位初期値は5年間の計算開始前に、5年間の平均降雨量を与えて地下水位が安定するまで非定常解析による予備計算を行って設定した。

5.1 河川流量の再現計算結果

検証地点の代表例として、白川中流域陣内地点（図-1 参照）の日流量の再現結果を図-7に示し、観測流量と再現計算流量による流況曲線を図-8に示す。

図-7より、かんがい期の農業用水取水による河川流量の減少および降雨による河川流量の増加とピーク流量後の低減曲線などの再現状況は良好である。非かんがい期では非降雨期の低水流量を概ね再現できている。

図-8より、平水流量以上で計算値がやや大きくなっているが、低水流量以下の流量が少ない期間での流況は良く再現できている。

菊池河流域、緑川流域における再現性も概ね良好で、解析領域全体での河川流量の良好な再現性が確認できた。

5.2 地下水位の再現計算結果

検証地点の代表例として、菊池河流域の泗水地点及び緑川流域の健軍地点（図-1 参照）の地下水位の再現計算結果を図-9に示す。

泗水地点では、非常に良く地下水位の変動を再現できている。湧水地帯である健軍地点においては、計算地下水位が観測値に比べて2～5m程度高い傾向にあるが多雨期と少雨期による経年的な水位変動傾向は再現できている。

5.3 可視化による広域地下水流動特性の検証

水循環シミュレーション結果より、第2帯水層基底面を出発地点として、水粒子の軌跡を可視化した流線軌跡図を図-10に示す。

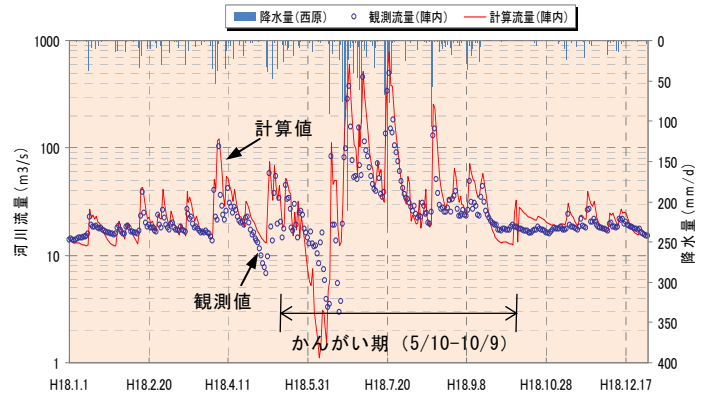


図-7 河川流量再現結果（白川陣内地点）（H18 年日変動）

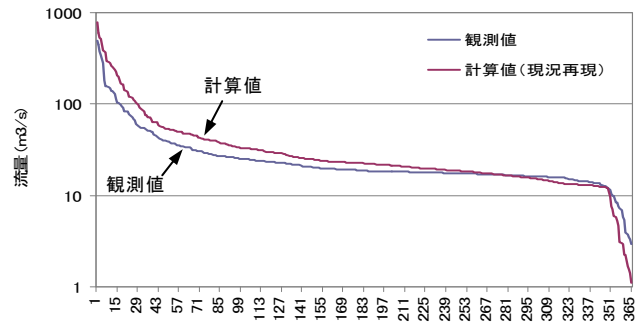


図-8 河川流量再現結果（白川陣内地点）（H18 年流況曲線）

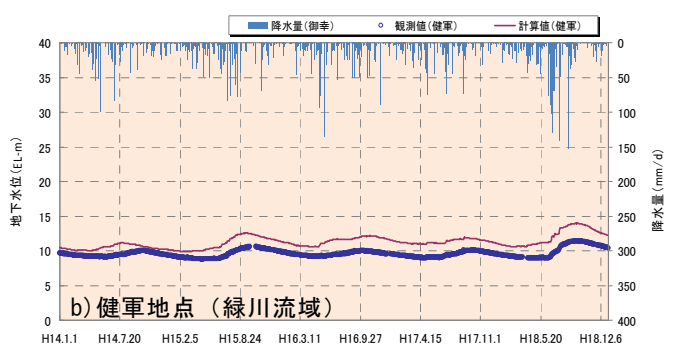
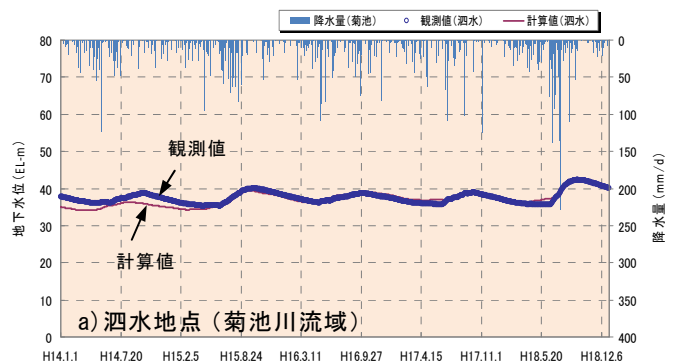


図-9 地下水位の再現計算結果（平成14年～18年）

白川中流域右岸の菊池台地の南端にあたる所に基盤岩の稜線がある。これより北側の菊池台地部から孤立丘の小山山・戸島山と竜田山の間を通り水前寺に向かう地下水の流れが見られる。もう一つは、大津付近で前述した基盤岩の稜線の鞍部を越えて“地下水バイパス”と称される大津から高遊原台地（阿蘇熊本空港）下を南西に流下する主地下水流動帯に合流した後、小山山・戸島山の南側を南西に流下して江津湖とその周辺の湧水群に向かう流れが見られる。

このような流域間を跨ぐ広域地下水流動は、熊本県・熊本市¹⁾²⁾⁷⁾による既往調査で定性的に把握

されていたものであるが、本研究による定量的な解析結果により、より具体的に可視化され、これまで提唱されていた阿蘇外輪山西麓域の地下水流動機構が総体的に概ね整合していることが確認できた。

6. おわりに

本研究の成果としては、阿蘇外輪山西麓域の火山地質分布域で、しかも被圧地下水帯を含め大きくは2層地下水構造を有する地域に、表流水と地下水を一体的に解析する統合型水循環モデルを適用することにより、流域間を跨ぐ広域地下水流動場を再現することができたことである。このモデルは、当該地域のように水循環が卓越する地域での水管理ツールとして活用できる可能性がある。

熊本地域の水循環機構の要は白川中流域である。すなわち、水田を通じてかんがい水として河川水が地下水に転化され、地下水涵養に大きく貢献している。一方、白川中流域下流部から熊本市域東部の水前寺・江津湖湧水群が並ぶ託麻台地縁辺部に掛けて分布する高透水性の砥川溶岩が主要な地下水取水源となっている。このため、地下水保全管理上では、河川水と地下水を含めた白川中流域の水収支を精度良く評価することが重要となってきている。今後は、本モデルを用いて具体的な“総合水管理”への有効的な手法を研究していく方針である。

謝辞：本数値モデルの作成に際しては、株式会社地圏環境テクノロジー技術開発部長の森康二氏に大変お世話になりました。御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 熊本県・熊本市（1995）：平成6年度 熊本地域地下水総合調査報告書
- 2) 熊本県・熊本市（2005）：熊本地域地下保全対策調査
- 3) 国土交通省熊本河川国道事務所（2009）：平成20年度 熊本地域水循環機構調査業務
- 4) 国土交通省熊本河川国道事務所（2010）：平成21年度 熊本地域水循環機構調査業務
- 5) 登坂博行(2006)：地圏水循環の数理 - 流域水環境の解析法, 東京大学出版会
- 6) 登坂博行・小島圭二ら(1996)：地表流と地下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発, 日本地下水学誌, 第38巻, 第4号, 253-267, 地下水学会誌,
- 7) 熊本市水道局（1980）：熊本市およびその周辺の地下水について－豊かさと清らかさを保つために－

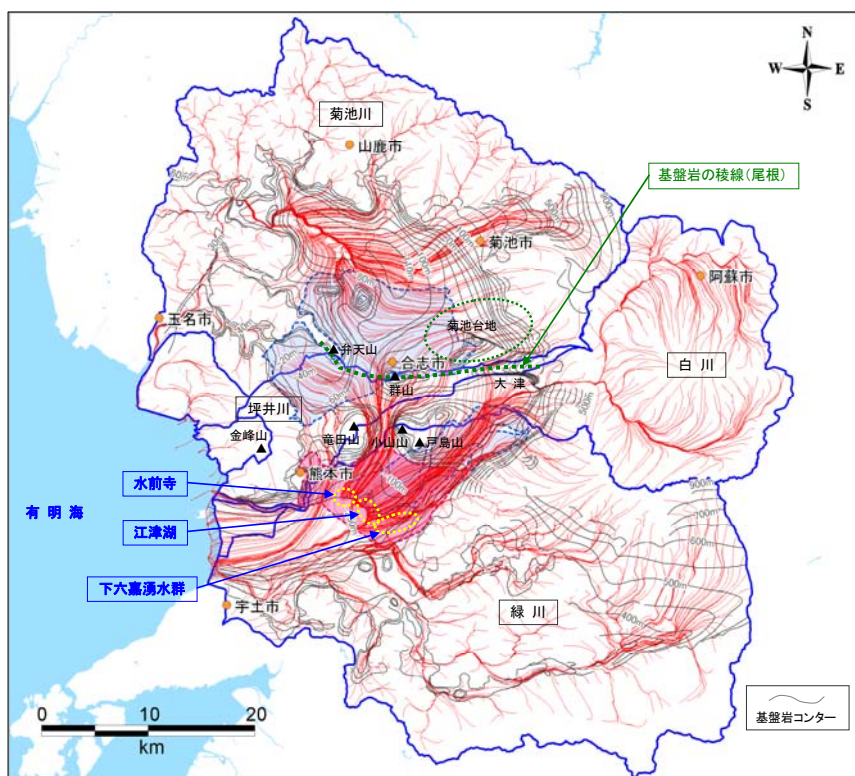


図-10 第2地下水の流線軌跡図