

「扇状地の地下水研究における応用地質学」－全ては記載から始まる

扇状地水環境研究会 九州事務局 宮崎精介

はじめに

私たちが日常相手にしている地盤は、それ自体の性状や分布を規制する地質構造に支配されており、不均質なものの集合体である。これらを地質工学的特性が反映された設計図面としての地質図に導くには、①不均質な地質体を記載し、②設計や計算できる単位（均質体の組み合わせ）に近似させる作業が必要となる。

図-1に示す二つの地質断面図では断層分布に違いがあり、その結果として描かれるルジオンマップに大きな違いを生じている。また、図-2では同じボーリング柱状図を用いて描かれているが、左は単に層相を対比しただけのもの、右図は微化石や形成史を編んだ上で描かれたものである¹⁾。地質図が違えば設計も違った結果を導く。「理学でダムは造れない」との批判を受けることがあるが、「ダムを造るため」には不均質さを的確に描いた地質図を用いて設計施工する必要がある。ここに地質技術者にしか出来ない重要な仕事が横たわっている。

地下水解析では、器としての堆積盆の水文地質構造を知ること、その上にたつて地下水流動や水収支を検討することが求められる。ここに地質技術者がなすべき仕事があり、そのためには、必要精度で記載する力と全体構成を概観しうる感性を養う必要がある。

地質技術の原点は、地盤としての「不均質な地質体」を設計や計算に必要な「均質体の組み合わせ」に置き換えることにある。そのためには、①「地質体を的確に記載する」、②「形成史を編み、地質体の時空分布に基づいて均質体に分割する」、③「個々の均質体に強度や物性値、透水係数を与える」、④「設計施工思想との整合性を計る」、ことを繰り返し試行することが大切で、その結果としての的確な地質図を描くことができ、同時に記載力と豊かな感性が養われる。

本講演では、このような視点を踏まえて実施した筑後川扇状地の地下水研究の成果を紹介しながら、応用地質学のあり方について問題を提起したい。

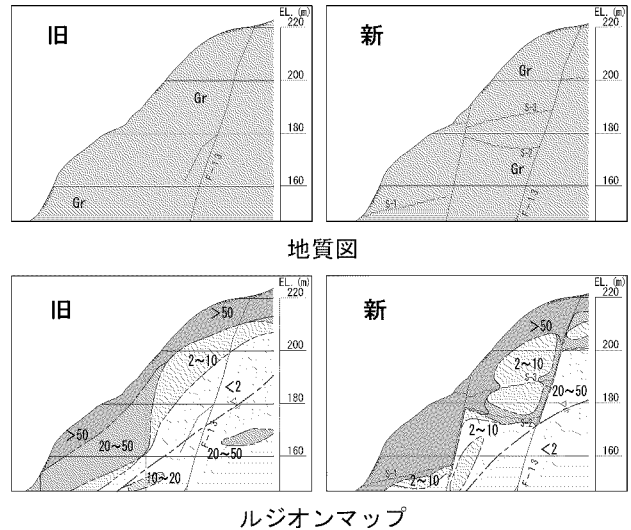


図-1 地質図によってルジオンマップが変わる

1. 扇状地の地下水研究と扇状地水環境研究会

扇状地は古来より生活の場である。生活の場は、初期には平塚・川添遺跡に見られるように扇状地の縁辺部にあり、後には地下水開発技術の向上とともに扇状地全域へと広がって行った。そのような扇状地を研究対象としたのは、境界条件の設定で一種の閉鎖系と見なせるということだけでなく、人の生活との係わりで地下水を研究することによって得られる成果を地域に還元できるからである。

研究では、現況の水収支と気候変動に伴う将来予測を行い、比較研究のため多〜豪雪地帯、少雪地帯、無積雪地帯の6扇状地を取りあげ、その成果を応用地質学会の研究発表会^{2~3)}やIAH2008富山大会での特別セッションで報告し

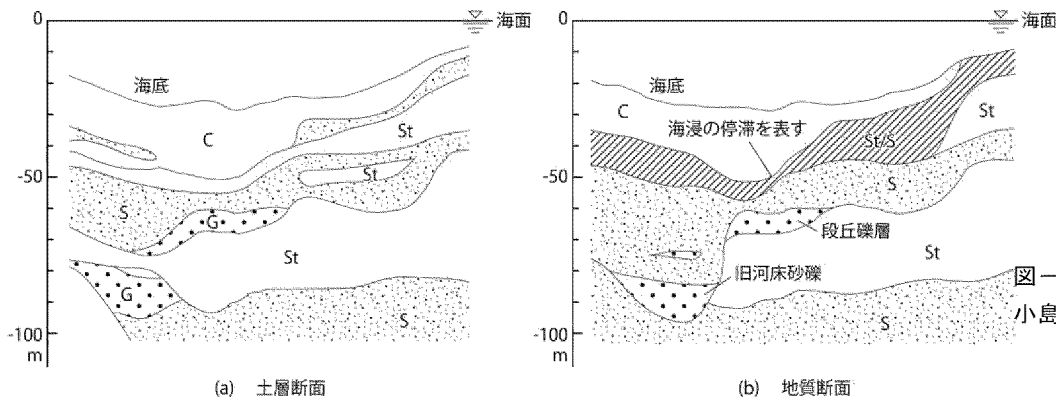


図-2 地盤図―地盤地質図
小島ほか（2009）を一部改変

(C:粘土, St:シルト, S:砂, G:礫, St/S:互層)

た4~9)。

扇状地水環境研究会では、研究を主導する委員会を立ち上げ、各扇状地毎に研究グループを配し活動してきた。九州では、最も代表的な構造平野である両筑平野を選定し、小石原川と佐田川が形成した扇状地を取り上げた。ここでは、この両扇状地を併せて「筑後川扇状地」と呼ぶ。

この研究に当たり、国土交通省筑後川河川事務所、(独法)水資源機構 両筑平野用水総合事業所、福岡県両筑土地改良区、朝倉市役所の各機関には、資料の提供や現地調査で便宜を図って頂いた。厚くお礼申し上げる。

筑後川扇状地研究グループの構成は以下のとおりである。

委員会委員(研究指導) 熊本大学大学院教授 嶋田 純

研究グループ
 宮崎 精介(九州事務局長)
 大石 朗(九州事務局)
 長谷川 怜思(九州事務局)
 松本 俊夫
 下大迫 博志
 花村 修
 牧野 隆吾

2. 資料収集の視点

必要と思われる資料は可能な限り広範囲に集めると良い。一例として、井戸の分布状況は地下水の生産性の違いを間接的に示しており、生産性の低い井戸ではその周囲に別の井戸を設けることをしないので、井戸分布の粗密から地下水の水径(みずみち)が想定できる。また、井戸調査で地元の人に会ったら、井戸の少ない理由(あるいは多い理由)を聞いてみると、色々教えて頂けるでしょう。

もう一つの事例は瀬切れである。地下水面が河川より低く、流量が少なくなる季節になると瀬切れ現象が現れる。扇状地にあっては普通に見られる現象なので、発生時期や降水量・河川流量との関係を整理することで、地下水面の変動が理解しやすくなる。このような意識を持って、以下のような資料を収集整理すると良いでしょう。資料整理の

一例として井戸配置、気象(気温・降水量)、河川流量の変化、土地利用の変遷について示しておく(図-3~5)。

収集整理項目

- ・遺跡、天然記念物、流況(瀬切れ)
- ・水文気象
- ・河川・水路の流量
- ・井戸分布、湧水分布
- ・土地利用、灌漑水路網・上下水路網
- ・地形地質データ

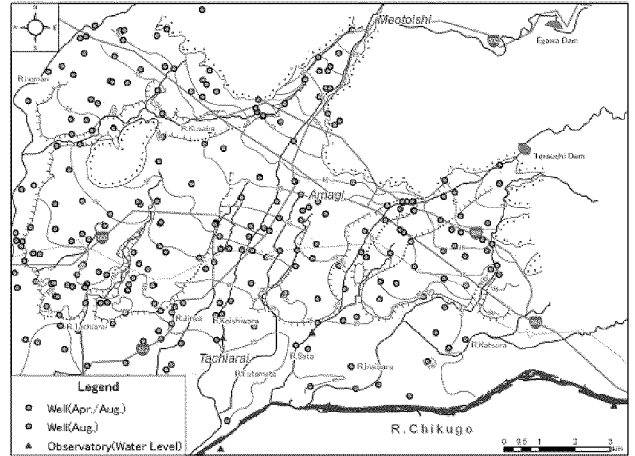


図-3 井戸分布(分布の粗密がハッキリと見て取れる)

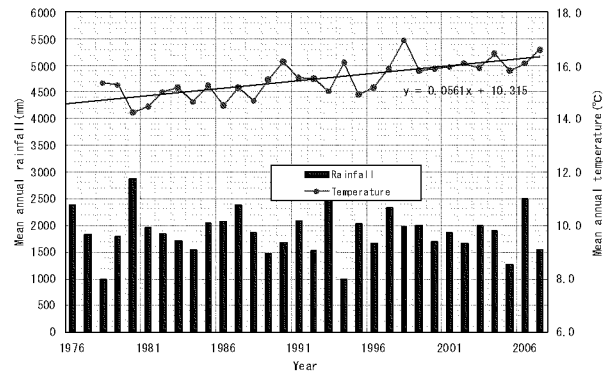


図-4 気温・降水量

(1970年頃より気温が上昇、10~15年毎に渇水が発生)

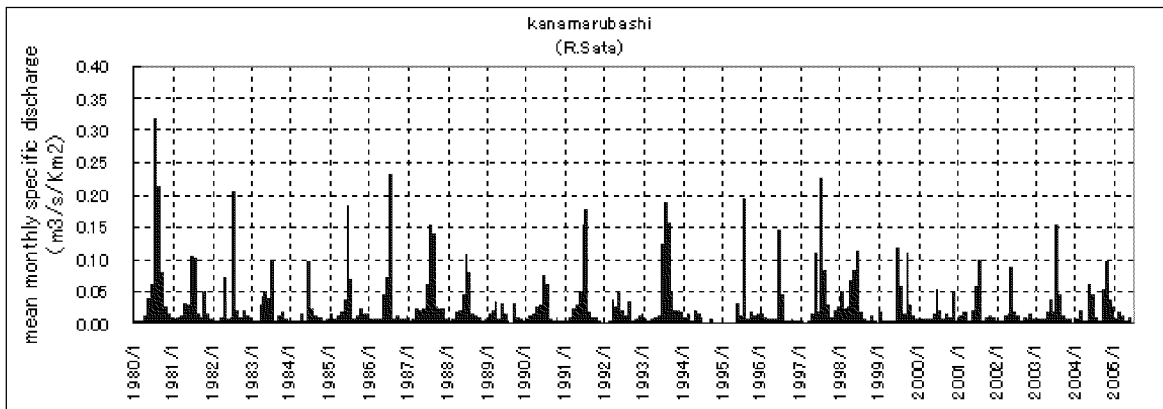


図-5 河川流量(金丸橋、渇水年の1994は河川流量も激減)

土地利用の変遷からは、畑地を主体とした台地に用水路網などのインフラを整備することで水田が拡大し、減反政策や都市化によって水田が畑地や宅地に転換されてきたことが見えてくる。このような変化は、社会構造の変化や政策と係わっているため、社会的背景や政治の流れにも留意すべきである。最近では、水循環庁構想や水循環基本法制定（水制度改革国民会議）の機運が高まっている。従前の縦割り行政では流域の水管理に有効な手だてがなく、地下水と表流水を一貫して管理保全できる法整備が望まれていただけに、このような流れは注目に値する。どのような形で実を結ぶのか定かではないが、私たちもこのような動きに呼応しうる技術を身につけて置く必要があるでしょう。

3. 水文地質構造

3.1 調査の流れ

地下水解析計算において、地下水の器を把握した上で、水文地質構造モデルを作成することが望まれるが、昨今の日本では、必要精度で水文地質構造を把握することなくモデルを作成し、水理定数あわせの再現計算がなされる傾向にある。こうした現状から脱却するための調査フローを示しておく（図-6）。

個々の作業を経て成果としての地質図を得るが、大切なのは成果に至るプロセスであって、成果自体ではない。このように述べると「成果こそ業務である」と嘯く技術者がいるが、「間違った成果」に基づいていくら計算したところで有用な結果は得られない。最終的には、帯水層と難透水層の性状や分布状況を地質図として表現しなければならないが、可能な限り露頭やボーリングコアを直接観察・記載したうえで水理性状を評価し、水文地質構造モデルを作成することが望ましい。

既存の柱状図だけを参考に水文地質構造モデルを作成せざるを得ないこともあるが、こうしたモデルは新規のボーリングコアや水質分析結果などで検証しておく必要がある。検証を経ずしていくら再現計算をなしたところで、有用な結果が得られないことは既に述べたとおりである。

では次に、水文地質構造モデルの基礎となる記載について触れておく。堆積物を見かけると、真っ先に礫・砂・シルト・粘土を発想するでしょうが、透水性をあぶり出すにはこの程度の記載では不十分である。透水性の高い礫や砂では、透水性を規制する要素がたくさんあり、それに対応した記載が求められる。

一例を挙げると、粒子の充填具合によって水の通りやすさが異なるので、粒度組成や組織についての的確に記載する必要がある。具体的には、大きな粒子を小さな粒子が取り囲んでいる基質支持組織を持つ堆積物では透水性が低く、大きな粒子だけからなる礫支持組織を持つ堆積物で透水性が高い。砂で言えば前者がワッケ、後者がアレナイトに相

当する。また、粒子の形状によっても透水性は変わるので、記載に際して留意すべき項目を3.3節に挙げておく。

透水性の低いシルト・粘土も扇状地には少なからず分布する。扇頂から扇中央にかけて、旧河道沿いの後背湿地に堆積した有機質シルト、氾濫した洪水に含まれる細粒の浮遊物が沈積したものなどがある。前者は分布が狭く、河道が暴れるたびに堆積場が変わるため分布が局所的、後者は薄く広く堆積するが浸食により保存されにくい連続性に乏しい。このように透水性が低くても、連続性に乏しければ水文地質構造を支配する難透水層とは見なせないため、堆積場の根拠となる堆積構造を的確に記載し、連続性に乏しいことを確認しておく必要がある。礫層に挟まれるシルト層を延々とつなげて描いた断面図を時々見かけるが、このようなことはあり得ないでしょう。

このようにして記載と地質図の作成を繰り返し行うことで、地層の連続性や透水性に対する感性が養われることでしょう。感性は思いつきや感覚的ではないので、記載的事実に裏付けされる必要がある。

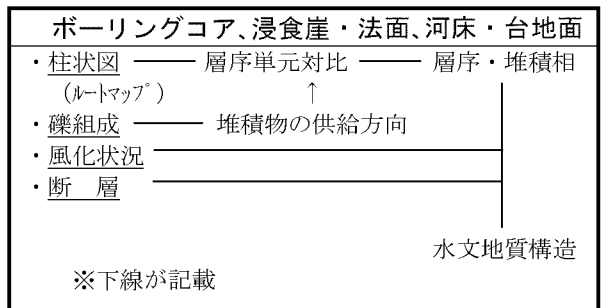


図-6 堆積盆を理解するための調査・検討の流れ

3.2 地形

扇状地において、堆積相は地形要素に規制されるため、地下水解析において地形の特徴を把握することは非常に重要である。

扇状地 (alluvial fan) は、河川によって形成された谷口を頂点とし平地に向かって扇状に開く半円錐形の砂礫堆積地形 (地形学事典：二宮書店)、川が山地から平地に流れ出る所にできた緩傾斜の扇状の地形 (広辞苑：岩波書店) と定義されている。前者は成因を含んだ定義であり、後者は地形的特徴のみによる定義である。このように、定義とは目的によって変わるもので、絶対的な定義は存在しない。では、このような地形がなぜ出来上がるのか、それは活構造に係わっていて構造盆地の縁に扇状地が形成されるからである。従って、活構造に関係する地形も読み取らなければならない。

また、扇状地は大小様々な規模のものがあり、日本では数～数十kmと比較的規模が小さく、勾配が比較的急なため、流量の少ない河川では瀬切れが季節的に発生している。大陸では数百kmに及ぶ大規模なものや緩勾配で湿地を伴うも

のもある。Okavango Delta (Botswana) がその好例で、前面に海が開けておればダニューブ河口のようにデルタと言うべきものであるが、乾燥した内陸にあるため形態的に扇状地の態をなしている。これも定義次第でデルタとなったり、扇状地になったりする例である。

筑後川扇状地で識別された地形的特徴を以下に示しておく。

- ・両筑平野：水縄山地、古処馬見山地、背振山地に囲まれた構造盆地で、その南縁を水縄断層が走り、北東縁を警固断層の延長が走っているらしい(図-7)。
- ・扇状地面の識別：段差や勾配の違いで小石原川扇状地をⅠ面・Ⅱ面に、旧河道沿いの浸食崖で佐田川扇状地をⅠ面・Ⅰ'面に識別している(図-8)。
- ・扇状地末端：筑後川本川及びその支川の浸食崖にあたる。湧水のほとんどはこれらの面境界や扇端、末端の浸食崖で認められ、それらを利用したと思われるため池もある。
- ・平塚川添遺跡などの初期集落はⅠ面の縁辺にあり、昭和期の土地利用は畑地-水田-転換作物畑へと変化している。前半は灌漑水路網の整備、後者は減反政策に起因している。
- ・小石原川佐田川に挟まれる地域はどちらの扇状地なのか、人工改変の進んだ現地形では判断がつかない。

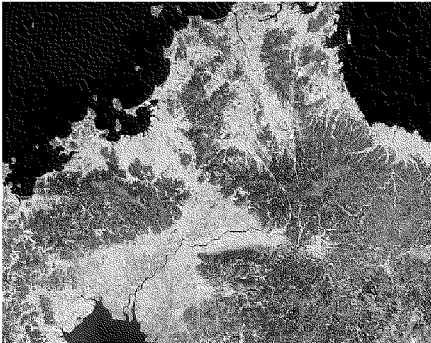


図-7 衛星画像

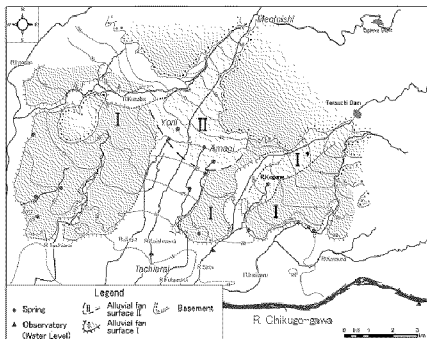


図-8 筑後川扇状地の地形特性

3.3 水文地質構造

上流域には、三郡変成岩類とそれに貫入した白亜系花崗岩類、それらに貫入や被覆した鮮新統火山岩類が基盤岩として分布する。小石原川流域では花崗岩類がまとまって分布しており、その点が両流域での有意な違いである。このことは扇状地堆積物の礫組成が場所によって違うことを意味する。両筑平野は構造性陥没盆地(図-9)で、扇状地堆積物や氾濫原堆積物が厚く堆積しており、由布川火砕流堆積物(Yfg)や阿蘇火砕流堆積物(Aso-4)などのテフラを挟む(表-1)。この盆地は、南側に位置する北落ちの正断層(地質時代に右ずれ変位)の水縄断層の活動に伴って形成されたもので、更新世になって厚さ600m以上の堆積物をため込んでいる。なお、北側の朝倉市街地下にも北西-南東方向の断層が伏在する可能性が高い。

扇状地での水文地質構造を組み立てる上で留意すべき点を以下に示しておく。

1) 作業の手順

- ・地下水盆を構成する堆積物を記載し、層相区分を定める(表-1)。
- ・堆積物の特徴(土石流堆積物・氾濫原堆積物など)や堆積様式の違いを考慮して層相を対比し、運搬・定置のプロセスと連続性を検討する。その際、テフラを鍵層として用い、堆積物の異方性や古期風化にも留意する。
- ・層序を編み、地質断面図を作成する。

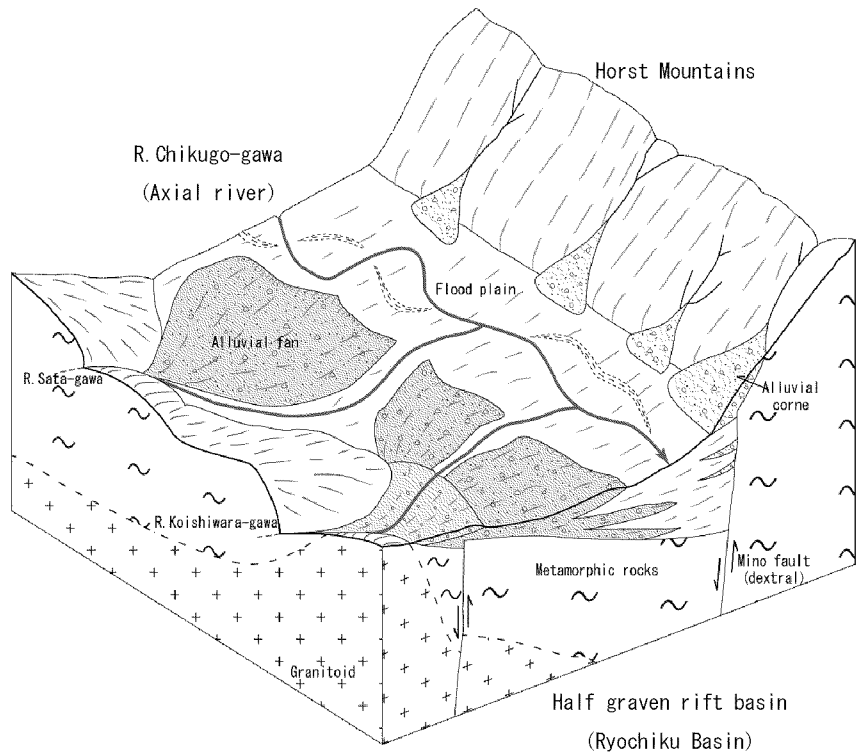


図-9 両筑平野の概念図

表－1 層相区分表（代表的な層相の特徴）

層相名		特徴	写真
扇状地	1c 河床砂礫	現河床沿いに分布する空隙に富む礫層、基質を含まない	
	1b シルト・砂薄層	シルトは細礫混りシルトで厚さ15cm以下、細砂は厚さ3cm以下で土石流堆積物に頻繁に挟まれる	
	1a 土石流堆積物	基質支持、構成礫や基質粒子はともに垂角～角礫、締り良好	
氾濫原	2c 有機質シルト	植物片を含む灰～暗灰色シルト、砂粒子を含む	
	2b 中流砂	火山灰起源、分級が良く長石や有色鉱物粒子を主体とする	
	2a 円礫混り粗砂	火山岩礫を含む粗砂、結晶片岩礫は全く含まない	
火砕流堆積物	3b Aso-4	軽石と角閃石が特徴的、全て二次堆積物でラミナが発達、一般に灰色、シルト質ラミナで小豆色	
	3a Yfg	軽石と黒雲母が特徴的、灰色で締まりが良好	

2) 記載の視点・項目

- ・層相区分を定める際に鍵層を設定する。
- ・土砂の生産－運搬－一定置のプロセスを引き出す（層相の連続性、透水性の違い）
- ・記載項目 岩種・鉱物種の違い（礫組成、テフラの同定）
粒形・粒径分布、礫組織（礫支持－基質支持、堆積構造）、空隙率
堆積場（植物片：湿地、風化：乾陸、分級砂：河道・氾濫原など）

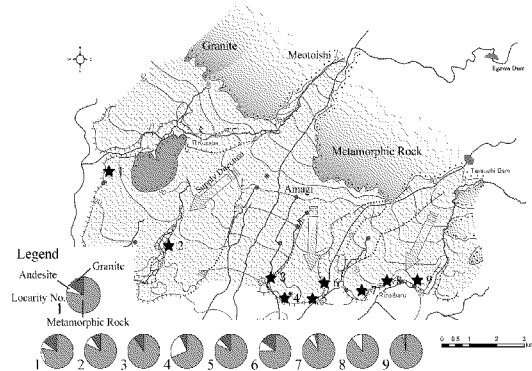


Fig.3 Gravel composition and supply direction

3) 礫組成からわかること

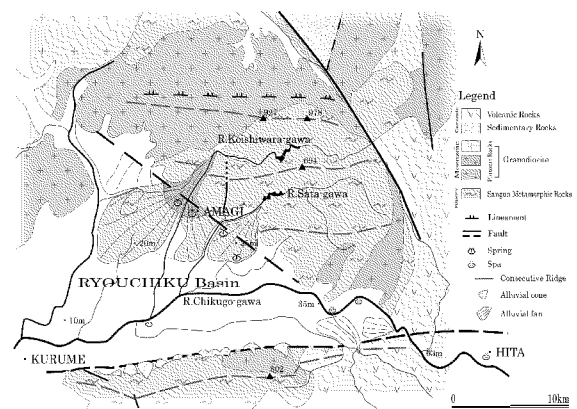
- ・上流域に分布する地質の違いから、礫質堆積物の供給源が想定できる。礫組成から、小石原川と佐田川に挟まれる扇状地の堆積物が小石原川から供給されたことが分かる（図－10）。

4) 礫の円磨度についての留意点

- ・礫の円磨度は、水磨の程度だけでなく、岩石組織や風化によって異なることがある。両輝石安山岩では比較的小型の円礫、花崗岩では大型の円礫を産しやすい。

5) 断層

本来であれば基盤地域の踏査で、断層などの地質構造を把握すべきであるが、両流域で別途に踏査を行った経緯があり、今回はこれらの成果を参照した。また、朝倉市街地下に伏在する断層については基盤上面の形態からその位置を推定した。



図－10 礫組成から見た堆積物の供給方向（上）と供給方向をイメージして作成した地質図（下）

3.4 帯水層

帯水層は水を蓄える能力のある地層であり、水を蓄えている地層ではない。難透水層とは相対的に透水性の低い地層で、地下水が難透水層を突き破って上下に流れるよりは層状に流れる方が容易である。帯水層を難透水層であるAso-4でもって上位のⅠと下位のⅡに区分しているが、Aso-4は小石原川沿いなど一部で欠如している（図-11、12）。

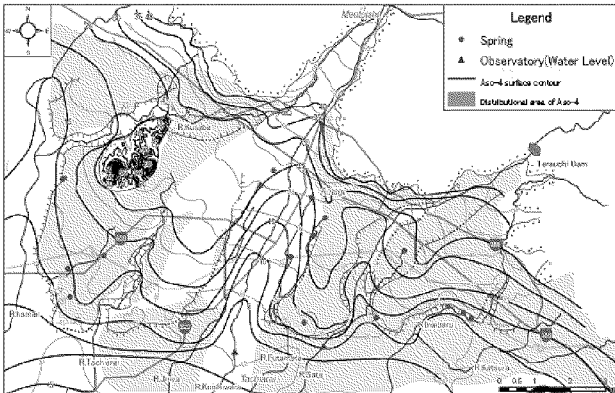


図-11 Aso-4の分布

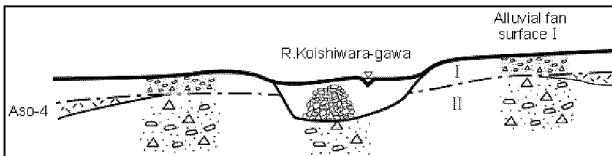


図-12 小石原川を横断する地質断面図

4. 地下水流動

4.1 一斉測水

天気安定している短期間に河川および井戸を測水し、ある時間面での水文データを取得する。河川では流量測定箇所、取排水箇所の位置および形状を記録しておく。井戸では事前に用途・位置＝基準点・出来型・ストレーナー位置などを明記した台帳作りが必要である。

河川では、取排水路も含めて水位や流量を把握し河道水分配・水収支を求めることで、涵養区間と浸潤区間を知ることが出来る。そのためには、測定地点毎に測定値を流量に換算し河川流量の変化を確実に押さえることで、流量変化が取排水によるものか、涵養・浸潤によるものなのか判別できるようにしておく。

井戸や湧水については、水位、簡易水質、水温、湧水量を測定し、地下水面等高線や簡易水質分布を検討することで、地下水流動が見えてくる。その際、井戸の経年観測を行い水位の季節変化を把握しておく事が重要である。得られた地下水面等高線は、小石原川Ⅱ面で扇形、下流側のⅠ面や佐田川で凹状を示し、灌漑期に地下水位が2～4m上昇しても等高線の形状に変化はない。

4.2 水質特性と地下水流動

溶存イオン分析結果を整理し、水質から見た地下水流動についても単独で検討しておく。なお、陰陽バランスの悪い分析結果を得た場合には、測定精度のほか、炭酸水素イオンの逸散や施肥による硝酸イオンの急増などが考えられるため、適切な追試が望まれる。溶存イオン分析では、小石原川兩岸と佐田川左岸で傾向が異なる。帯水層Ⅰでの傾向は次の通りである。

- ・小石原川右岸では相対的に透水性が低いと想定されCa-SO4型が支配的、灌漑期には水路などからの涵養の影響でCa-HCO3型となる。左岸でも同様な傾向を示す井戸が多いが、通年Ca-HCO3型を示すものもある。
 - ・佐田川左岸では通年Ca-HCO3型が支配的、一部の井戸では四月にCa-SO4型を示す。
- 帯水層Ⅰ・Ⅱの関係は次の通り。
- ・小石原川沿いはAso-4が欠如しており、通年河川水が帯水層Ⅱにも涵養される。台地では帯水層が二層に分離しており、帯水層Ⅰの地下水は流動性に乏しいため、灌漑期には灌漑水の影響を強く受ける。帯水層Ⅱは灌漑期になるとⅠと異なる水質を示すことから、独立して流下していると思われる。
 - ・佐田川左岸では、帯水層が二層に分離、帯水層Ⅰは通年灌漑水路からの涵養が支配的で、帯水層ⅡはⅠと異なる水質を示すことから、独立して流下していると思われる（図-13）。

また、夏季には硝酸イオンによる汚染が確認される。常飲基準（10ppm）を一時的に越える井戸もあり要注意である。

このようにして、地下水面等高線や河道水分配から想定される地下水流動と水質分布との整合性を検証しておく、地下水流動の確からしさが確保できる。

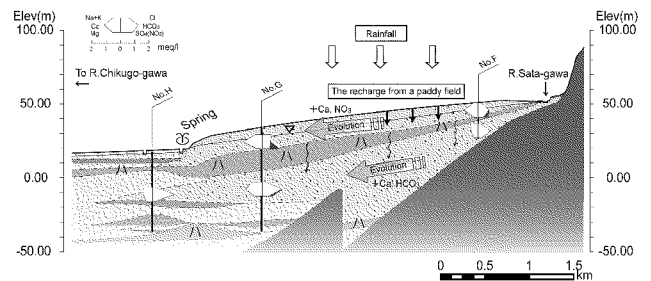


図-13 水質の帯水層別変化（佐田川）

4.3 地下水流動特性

小石原川は、河川流量の減少する区間の長い典型的な扇状地河川で、草場川はある時期の旧河道と見られる。減少区間で涵養された地下水は、その多くが帯水層Ⅰを流下し扇状に広がるⅡ面の末端で湧水するが、一部は湧水することなく流下し筑後川沿いの低地に達する。大刀洗川、二又

川、陣屋川はⅡ面末端の湧水を源としている。また、Aso-4の欠如する本川沿いでは、涵養された地下水は水頭の低い帯水層Ⅱにも浸透し流下する。

佐田川扇状地では、Aso-4が広く分布することで、河川や水路から涵養された地下水のほとんどが帯水層Ⅰを流下する。扇状地のほぼ中央に地下水水面等高線の尾根が認められ、その東側で涵養された地下水は南に流下し扇端の急崖で湧水している。尾根の西側で涵養された地下水の一部は黄金川に流出するが、河川流量の減少区間で涵養された地下水は河川脇のⅠ'面を流下していると見られる。

灌漑期になると水田からの涵養を受け地下水水位が2～4m上昇するが、地下水水面等高線の形状に有意な変化がない。帯水層Ⅰの水位は常に帯水層Ⅱの水位よりも高く、下方浸透を示す。従って、帯水層Ⅱでの過剰揚水は帯水層Ⅰの水位低下に直結するので、留意する必要がある。

5. 水収支

以上の成果から得られた収支モデルの一例を図-14に示す。その特徴は次のようにまとめられる。

- ・水田の減少と市街地化…最大3.2mの地下水水位低下、モデル全体で地下水流出量が5.3万m³/日減少。
- ・気温上昇では、蒸発散量が増加しても地下水涵養量に対する影響は僅か。
- ・降雨パターンの変化は、表面・中間流出が増大し地下水涵養量に影響を及ぼす。
- ・河川水—地下水間で往復する量が全体の水循環系で大きなウェイトを占める。
- ・河川水位の変化を扱えるモデルにすることが望まれる。

今後、生活の場である扇状地で地下水資源を有効利用するには、扇状地の水文地質構造とそれに規制される地下水流動特性を考慮した、河川水—地下水の一元管理が望まれる。

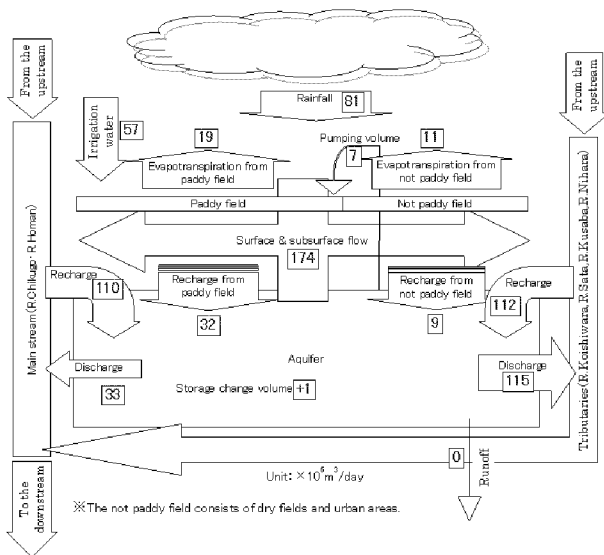


図-14 水収支概念 (2007)

以上述べた展開を保証するには、水理定数合わせの単なるシミュレーションではなく、記載的事実に基づいた水文地質構造モデルを用いて水収支計算が行われなければならない。そのためには、地質技術者・研究者による適切な記載と感性に基づく地道な作業が必要である。

引用論文

- 1) 小島圭二・大塚康範・大野博之・軽部文雄・土屋彰義・徳永朋祥 (2008) : 東京湾岸地域における地質工学—50年の実績—, 応用地質, Vol. 50, No3, pp126-139
- 2) 松本俊雄・宮崎精介・大石朗・扇状地水環境研究会 (2006) : 扇状地研究その7. 筑後川扇状地の地形と地質, 日本応用地質学会平成18年度研究発表会講演論文集, pp153-156
- 3) 長谷川怜思・下大迫博志・高田香織・嶋田純・扇状地水環境研究会 (2006) : 扇状地研究その8. 筑後川扇状地における地下水流動状況 (予報), 日本応用地質学会平成18年度研究発表会講演論文集, pp157-160
- 4) 宮崎精介 (2008) : 筑後川扇状地, 日本の扇状地における水環境の研究, 扇状地水環境研究会編, pp273-288
- 5) 宮崎精介・長谷川怜思・西平秀明・花村修・牧野隆吾・松本俊雄 (2008) : 筑後川扇状地の水文地質構造, 日本の扇状地における水環境の研究, 扇状地水環境研究会編, pp289-298
- 6) 長谷川怜思・深見大介・宮崎精介・高田香織・嶋田純 (2008) : 筑後川扇状地の地下水流動, 日本の扇状地における水環境の研究, 扇状地水環境研究会編, pp299-314
- 7) 小原直樹・長谷川怜思・柳田三徳・下大迫博志 (2008) : 筑後川扇状地の水収支とモデルによる将来予測, 扇状地における水環境の研究, 扇状地水環境研究会編, pp315-344
- 8) 大石朗・宮崎精介・長谷川怜思 (2008) : 筑後川扇状地における水環境の変遷と今後の地下水管理, 日本の扇状地における水環境の研究, 扇状地水環境研究会編, pp345-348
- 9) Hasegawa S.・Oishi A.・Miyazaki S.・Kohara N. (2010) : Hydrogeology and water balance in R.Chikugo-gawa plain Fukuoka prefecture, Japan, Grandwater response to changing climate, IAHS-selected papers