

6.5. “水文地質” のフレームワーク (その 1)

(1) はじめに

筆者の研究人生のスタートは那須野が原の地下水である。我が国の純粋地質学研究の一翼を担っていたともいえる東京教育大学地質学鉱物学教室で卒業論文として、このような課題を取り上げるのはかなり異端ともいえるが、筆者の恩師である渡部景隆先生と、その内地留学生として当時この教室に在籍していた栃木県立那須農業高校の提橋 昇氏からの影響が大きい。昭和 31 年の筆者学部 3 年の終わりのころである。

当時は戦後の食糧難はまだ続いており、日本各地の火山山麓や扇状地での開田や開墾が進んでおり、その灌漑用水としての地下水開発が盛んに行われていた。両先生もこの時期に那須野が原の地下水研究を始めたばかりで、指導する方も指導される方も手探りの状態であった。

地下水に関する参考書も実用的なものは、「地下水探査法」山本莊毅著（古今書院）、「水理地質学」蔵田延男著（朝倉書店）位なものであった。調査は露頭が観察できる那珂川や箒川の河床をひたすら歩くことと、農家の井戸を調べさせていただきだけの毎日であった。その日々にあって、上記農業高校の学生諸君の協力によって実施した電気探査は、足だけで得られる地下情報の限界を越えて研究を軌道にのせてくれる有力な武器になった。すなわち比抵抗法による $\rho - a$ 曲線の解析は露頭調査をしっかりとやることによってその信頼性が高まる、との経験を得たからである。その詳しいことは別の機会にまわすことにして、まず本題の主旨を述べることにする。

地下水はその器ともいえる地圏表層部の諸要因に規制されて存在し、流動している。その様態は地質学、地形学、水文学に関わり、水文地質学^{脚注 1)} という名称で括られる。ところでこのことに関して気になるのは、我が国ではいつごろからこの名称が使われるようになったのかということである。ご存知の方もいると思うが、現在の日本地下水学会の前身は「水文地質研究会」と称し、昭和 30 年 4 月に日本地質学会第 61 回総会の折に開催された夜間小集会の一つとして発足したものである。その頃の様子が「水文地質研究会」会誌第 3 号(1959)に掲載されているので、これを次頁に転載させていただく。なおこの記事は元工業技術院（現産総研）地質調査所の故村下敏夫氏によるものである。小生はわが国ではこの頃が「水文地質」という呼称が普遍化し出した最初ではないかと考えている。

参考までに付言すると中国でも同じ用語が用いられており、「水文地質研究所」という名の立派な研究所が河北省の正定というところにあり、300 人を超える研究者を擁し、かつ全国要所にその支所が存在する。それに比べて我が国の貧弱さは情けない、の一言に尽きる。

筆者の卒論は渡部、提橋両先生との共著で地質学会誌に掲載され^{脚注 2)}、それが山本先生の目に留まり、その縁で現在の株式会社日さく（当時の社名は日本鑿泉探鉱株式会社）に入社することになった。余談になるが配属された部署は“鑑定部”といい、上司は早川松五郎部長、部下は小生一人という、殆ど有名無実に近いものであった。しかし思いおこせば、これがその後の筆者を育ててくれた切掛けになったことは間違いない。早川氏は東大の地質学科出身の博学の方であった。出張の折には殆ど毎回筆者を伴い、現場を見る目を鍛えてくれた。多少なりとも経験を積んだのち、筆者が会社に提言して開設し、人員も増強した物理探査部門をベースとして全国の地下水調査を手がけてきたことは、現場知識を重ねる上では勿論のこと、関係省庁や同業者等との人脈をつくる上でも大きな財産になった。今回の話題はこのような体験と、その後の長期にわたる研究経験を踏まえたもので、単に“机上の論”だけでは現場には対応できない、という理念を基調としている。

脚注 1：別に「水理地質学」という用語が用いられることがあるが、きわめて限定された事象を扱うように感じられるので筆者はこの用語は使わないことにしている。

脚注 2：渡部景隆、提橋 昇、新藤静夫(1968)：那須野が原の地質構造、特に那珂川の河道変遷について、地質学会誌, Vol.66, No.773.

(2) 水文地質のフレームワーク

水文地質に関わる要因は多種多様なので、一概に一定の型枠に収めるのは難しいが、表 1 のように、地下水の存在場の性格と流動系の規模を基とした枠組みのもとに、これを整理すると地下水問題の分析や思考上有効である。

以下にこの表中にあるキーワードを中心として事例を挙げて解説する。なお個々については、筆者が東洋大学、筑波大学、千葉大学に在籍中、指導した学生の卒論や修・博論、また講座の先生方の協力に負うところが多い。これらの方々の名を文末に記して感謝の意としたい。

a) 堆積相

堆積相とは地層が堆積した際の環境を反映している諸特徴を指し、別に層相ともいう。

一般に見かける地質断面図は砂や粘土といった地質材料だけで表現されていることが多いが、汚染問題などを扱う際には詳細な露頭調査に基づく堆積相断面図が有効である。

図 1 に例示した地質断面は霞ヶ浦北岸の出島台地を東西に切るもので、最上部の新时期ローム層とその下位の常総粘土層を除いた、それ以後の後期更新統の下総層群上部層に焦点をあてて画いた堆積相断面図である。この図からこの地域が浅海域から内湾～湖沼、潟～沼沢地、河川の氾濫原といった古環境変化を辿ってきたことや、それらの地域的広がりを読み取ることが出来る。

調査ではこれを手がかりとして、当時水質汚染が進行していた霞ヶ浦の湖水を水源とする灌漑水の導水に起因する陸田地域の硝酸態窒素の広がりや、その動きを追跡する手がかりとした。なお参考として、下総層群上部層中の斜交層理を示す堆積相での物質移動の様子を写真 1 に、また堆積構造と異方性（透水係数）の関係を図 2 に示す。

水文地質研究会の 内容と活動状況

昭和 30 年 4 月、日本地質学会の 36 回総会に際し、同学会員中の有志によって、水に関する地学・水文学の研究を進展させ、会員相互の連絡を図る目的で、水文地質研究会が組織された。当初、種々の事情によって不便ではあったが同会の事務所は弘前大学におかれ、酒井軍治氏が委員長となった。研究会が発足した当初の会員は僅か 22 名で、その後会員が増して現在では 38 名となっているが、それにしても極めて淋しい数である。

同会が発足してまず最初に企画されたのは、「地下水、温泉文献目録」の編集で、会員の協力を得て本年の初春、古今書院から発行された。この目録は、1955 年未までに日本人が発表した地下水および温泉に関する研究を集録しており、項目別と地域別とに分類して、文献の利用が容易に出来るようにしてある。

本年 6 月に委員改選があり、新委員長に福留忠男氏が互選されたのを機会に、事務所を東京に移した。しかし先正つものは運営に関する費用で、入会金以外の会費（年間 ¥100）未納の人が 9 割以上もあるので、どうにも動くことが出来ないう現状にある。しかし文献集の発売によって得た費用が若干あるので「水文地質研究会誌」を発行することに決め、近く創刊号が上梓される運びとなった。

水に関する研究は当会のみでなく、応用地質研究会においても極めて重要な研究としてとり上げられておりこの分野の研究のために相互の協力を得たいと思っている。なお当会の事務所は大成建設 K.K. (東京都千代田区銀座 3〜4) 内においてある。(地質調査所：村下敏夫)



表1 水文地質のフレームワーク

地下水流動場のスケール		局 所 的	局 地 的	地 域 的
ディメンジョン		10 ¹ ~ 10 ² m ²		10 ⁴ ~ 10 ⁶ m ²
自然的要因	地質的要因	<p>キーワード：堆積相</p> <p>比較的小単元の堆積古環境、たとえば蛇行河川の寄州堆積物や海岸の沖浜堆積物などにみるポーラスメディアの異方性は汚染物質の局所的な動態に関わる。(図1, 2, 写真1参照)</p>	<p>キーワード：帯水層単元・層序</p> <p>堆積相解析やシーケンス層序に基づいた帯水層単元という概念が水文地質構造の把握に必要。また地表地質と地下地質の対比が重要。その際、電気検層記録などの各種検層資料が活用される。(図3参照)</p>	<p>キーワード：堆積盆地</p> <p>堆積盆地の成因には鉛直方向の構造運動に起因するものやプレートの水平方向の圧縮に伴う構造運動に起因するものが考えられている。近年はプレートの引っ張り、圧縮に起因した半地溝構造（ハーフグラーベン）も提案されている。重力探査、弾性波探査などの各種物理探査は堆積盆地の構造解明に活用される。</p>
	地形的要因	<p>キーワード：微地形</p> <p>地表の起伏は堆積物の性状を反映していることが多く、特に扇状地などのように河川が頻繁に氾濫して堆積層の多重性がみられるようなところでは浅層地下水は其々これに規定されて存在している。このような場合、小メッシュのDEMによる微地形解析は有効。(図4, 5参照)</p>	<p>キーワード：地形単元</p> <p>山地、丘陵地、台地、低地といった明確な地形境界に限られた地域を指す。但しそれぞれの地形形成過程に地域差が存在し、それが水循環系の在り様を強く規制しているような場合にはそれに対応した“水文地形単元”が必要となる。(図6~11 写真2,3,4参照) なお現在目にする地形はそれより前のステージの地形を引き継いでいることが多いことに注目。</p>	<p>キーワード：流域</p> <p>水系網図、切峰面図は地下水盆地や地下水域の特定に有効。(図12参照)</p> <p>地盤沈下地帯の変遷や沈下パターンは地下水盆地像を反映していることが多いので参考になる。(図〇参照)</p>
地下水の動態にみる注意すべき現象		<p>地層の異方性、不均一性を反映した選択流、いわゆる“水みち”の存在は重要。これが表層部に存在する場合は降雨・流出の過程で成長し、大間隙～ソイルパイプに成長することがある。いわゆるパイピングと呼ばれるこのような現象は“地下浸食”を促し、水系発達に貢献する。</p>	<p>層準を異にする帯水層の水頭差によって生じる漏水現象など。また水頭差によっては下部から上部への流れも生じる。地層の連続性を欠く場合、汚染物質はそこから深部に浸入する。(写真〇参照) (図〇参照)</p>	<p>地下水流動系の範囲や性格は堆積盆と重なることが多いが、地下水盆地を特定する場合には、涵養域、流動域、流出域あるいは滞留域といった地下水流動系を明確にする必要がある。(図〇参照)</p>
解説		<p>詳細な露頭観察により、堆積サイクルを基準とした堆積時間面の枠組みのもとに堆積相や堆積システムなどの成因論的な観点から地層を解析する「堆積相解析」、「シーケンス層序」が重視されている。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・同一層準の地層でも方向によって透水性が著しく異なることがある。 ・最初ランダムに発生したフィンガリング現象は降雨滲透の繰り返しとともに固定化する。 ・これは汚染物質の浸透過程の上で注目すべき現象。当初ランダムに発生したその浸透経路は繰り返し浸透の後固定される場合が多い。(写真〇参照) ・汚染物質に起因する地層の変質が水の移動に影響することがある。(写真〇参照) 	<ul style="list-style-type: none"> ・地形的分水界では不透水性の地層を横切る下方への水の流れが観察される。 ・流出域ではこれとは逆に顕著な上向きの流れが観察される。 ・不圧地下水の場合、流速は一般に流線が集中する流出域で速く、涵養域で遅い。 ・上記の現象は灌漑水の導水などの人為的要因が加わって誇張されることがある。 ・層準を異にする地層間の漏水現象は特定帯水層からの過度の揚水によって惹起される。 	<ul style="list-style-type: none"> ・巨視的にみて地下水面は地形と対応していることが多い。この際、地下水盆地の規模の第一近似として切峰面図が有効である。 ・地下水流動系の詳細は基本的に堆積盆の水文地質構造を踏まえたものでなければならない。 ・種々にして地下水の水理水頭（全水頭）や水温などの情報だけで地下水流動系を特定している例がみられるが、それは妥当とはいえない。

(図中赤字は本文に掲載したもの)

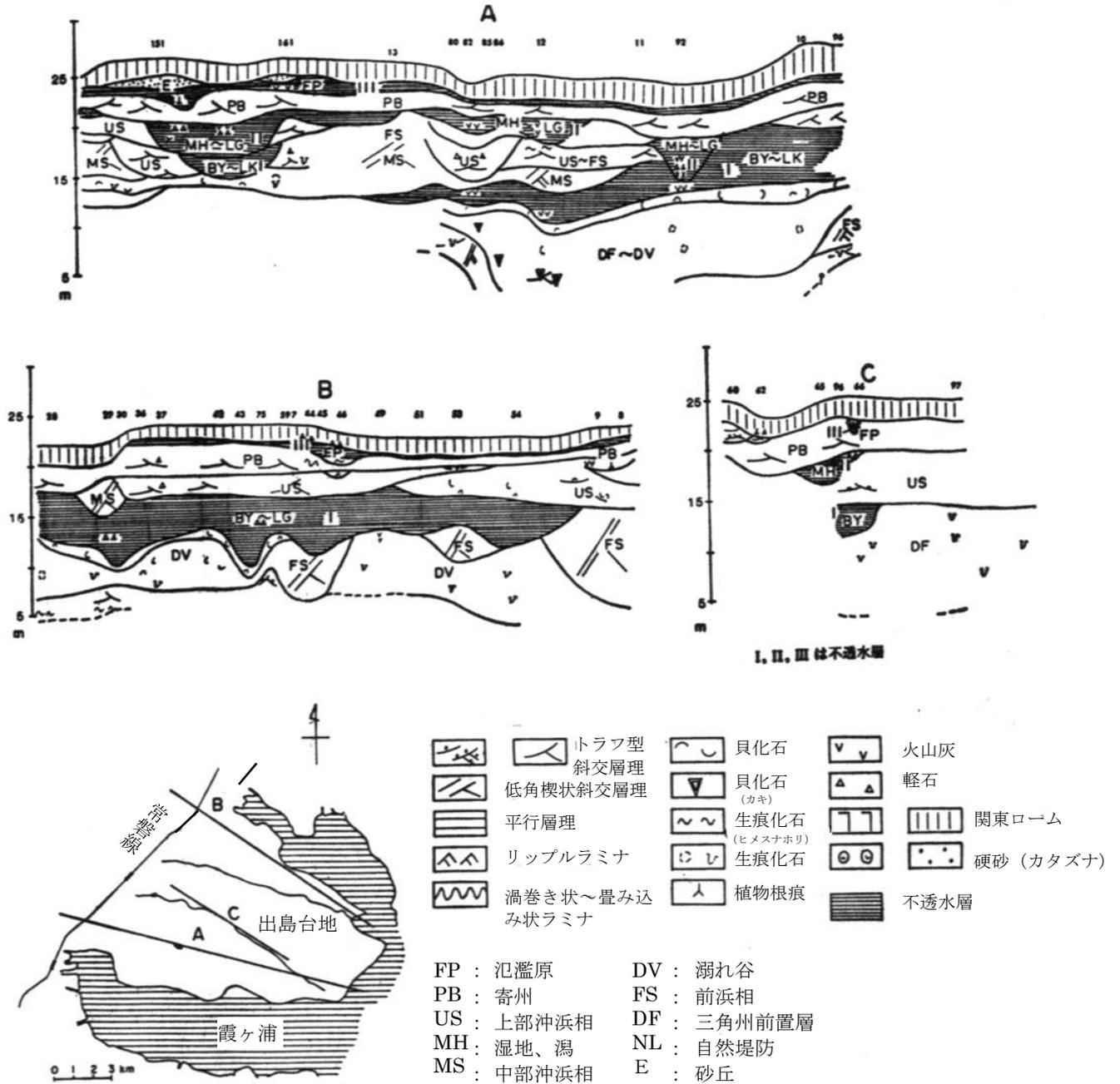


図1 堆積相を中心とした地質断面図(茨城県土浦市出島台地(地層の多様性と連続性に注目))
(出典: 岡崎浩子(1983): 筑波大学環境科学研究科修士論文)

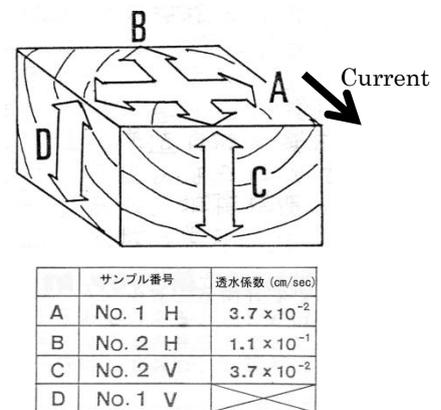


図2 堆積構造と透水係数
(出典: 図1に同じ)

写真1 斜交層理を示す成田層中の物質移動の様子

b) 帯水層単元・層序

“帯水層単元”という用語を時に見かけることがあるが、概念としては理解できてもその明確な定義や意義、つまりその水文地質学上の位置づけは必ずしも明確ではない。地下水の流動系は、その場の特徴から、よく涵養域—流動域—流出域あるいは滞留域に区分されることがあるが、これもまた曖昧な点が多い。

筆者はこの用語の基礎となるのは、堆積層序の確立とその空間構造にあると考えている。その際に重要な手掛かりとなるのは、層相変化の周期性である。これは堆積環境の変化に周期性があることを示していて、地質学的事象の明確な背景が存在し、同時にこれが地下水の流動系と一体的であるからである。帯水層単元はこの点が明確にされることによって、その具体性を有することになる。

ここで筆者が地下地質構造の把握の際に層相変化の周期性の例として重視してきたのは“互層”、あるいは“サイクロセム(Cyclothem)”である。一つの鑿井記録の中で、このような特徴の見られる部分を抜き出して、これを横に追跡するという手法である。しかし露頭を追うのとは違って、これでも必ずしも簡単ではない。その際、有効な情報を与えてくれるのが電気検層記録（特に比抵抗法による電気検層記録）である。筆者の知る限り、この方法を活用したのは森 和雄(1969)である。図3はその一例である。

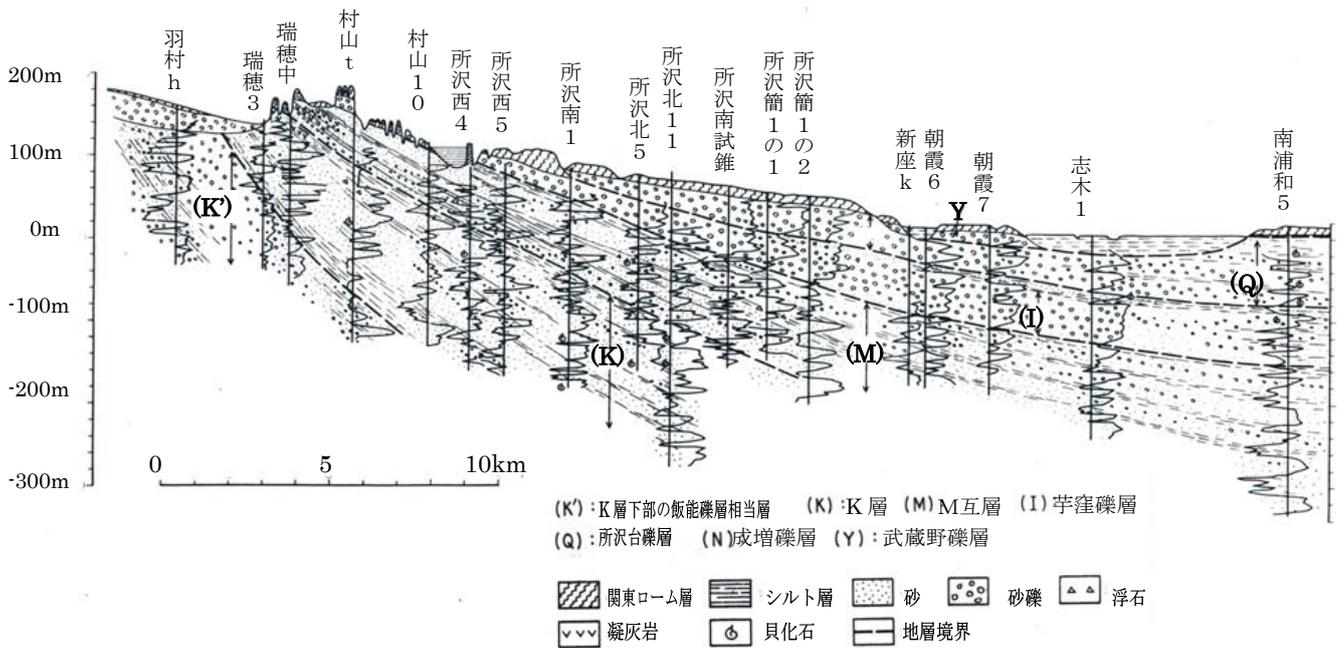


図3 武蔵野台地の水文地質構造

(出典：森 和雄他(2009)：埼玉県新座市・所沢市の試錐井とそれに関連する地表及び地下地質、地質調査所月報、25巻8号)

c) 微地形解析

ここに云う微地形とは、同一の成因により比較的短時間のうちに形成された堆積地形を指すものとする。

最近水循環基本法の成立、地下開発の進行、地下インフラの整備、環境保全、土砂災害対策等に対処するための課題として、詳細な水文地質環境の把握が必要とされることが多くなった。これは対象とする事業規模の大小にかかわらず、その最小ディメンションは 10^2m^2 のオーダーになることも多い。微地形の例としては山麓斜面、扇状地形

成時の旧河道、自然堤防、後背湿地などがあげられるが、問題によっては、より低次の地形単元の把握も必要となる。この際、現地調査の前に第一近似として航空レーザ計測による数値標高モデル (DEM) を活用した微地形解析は有効である。

図 4 に国分寺崖線沿いに見られる湧水群とその涵養地域の関係についての解析例を示す。この図に見る注目すべき特徴は崖線沿いに認められる地形の高まりで、かつて籠瀬良明 (1996) が崖線を削って立川段丘つくった河川が残した自然堤防であるとしたものに相当する。砂質堆積物からなり、崖線湧水の涵養源になっている可能性が高い。

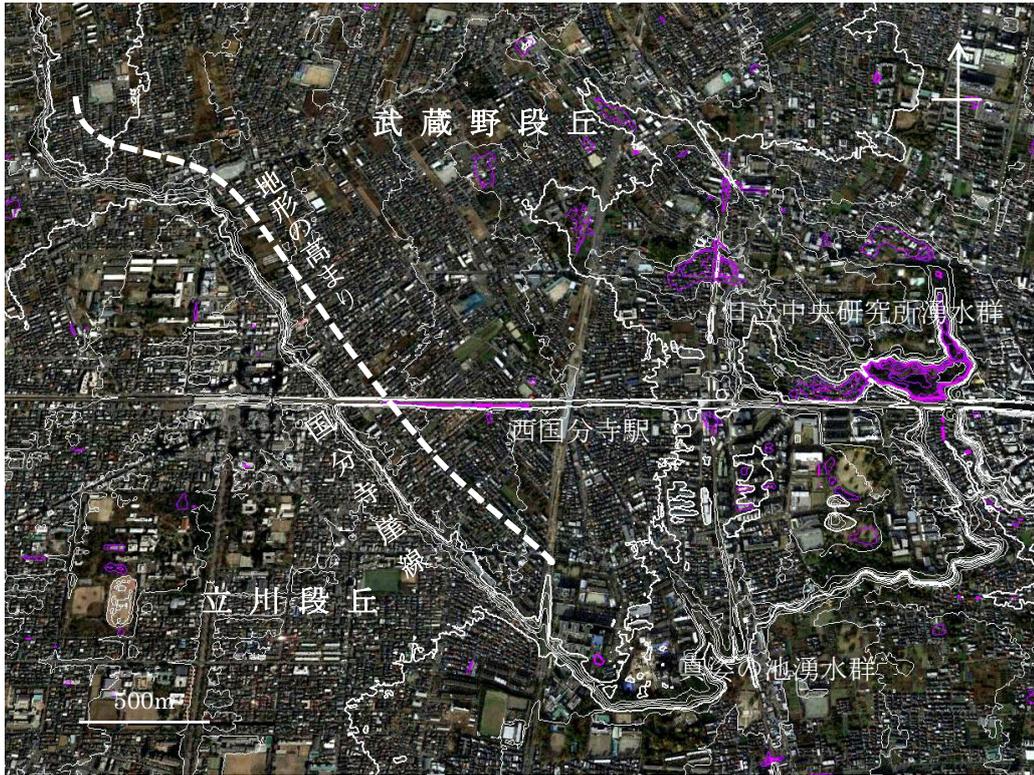


図 4 国分寺崖線とその後背地の微地形(5m メッシュ DEM による。赤色コンターは凹地)

図 5 は同地域の地下水面図、地下水深図、地形図をあわせ示したものである。赤→橙→黄→薄緑→緑の順に地下水面の位置が浅くなることを示している。上記の地区は図に見るように地形の高まりを反映して地下水の位置が深いことが分かる。

なお図 4 にある日立中央研究

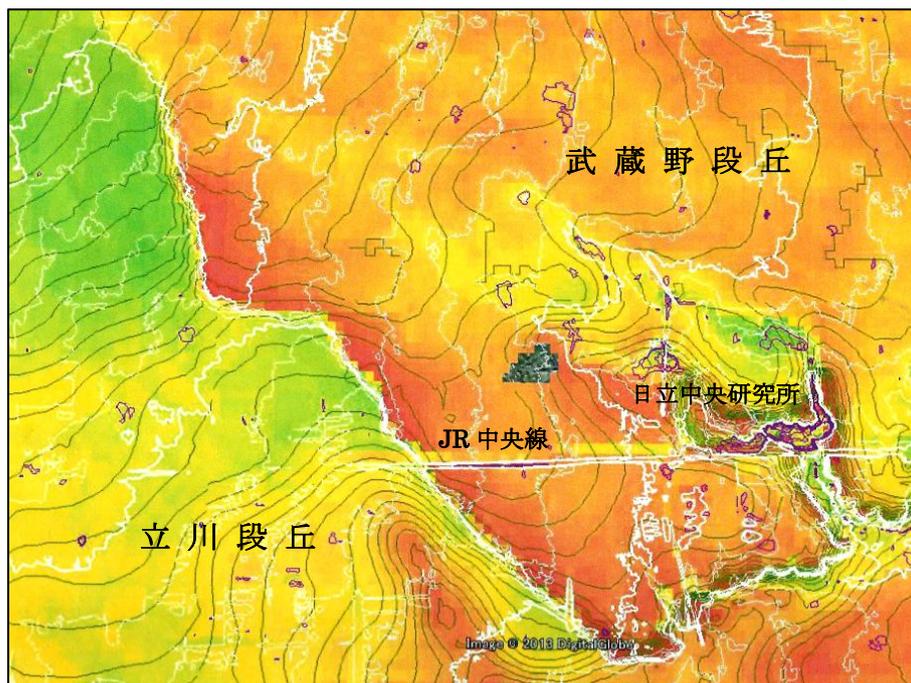


図 5 国分寺崖線湧水の水文環境 (黒実線は地下水面等高線、白は等高線、着色は地下水深)

所は国分寺崖線上にある湧水のなかでも格段に多い湧水量を誇っているが、この図から推定される湧水流域は決して大きいものではないことが分かり、土地改変などの環境変化に敏感に反応することが懸念される。

d) 地形単元

地形単元とは、ほぼ同一の形成時期、形態、成因、構成物質を踏まえた地表部分の集合体と捉えられるが、これらを基としてつくられる地形型の分類の用途によっては地形単元の取り方が変わってくる。そのため、それらのどれに力点を置くかによって多様な地形分類ができる可能性がある。

筆者は地殻表層部の水の存在と、その循環機構を地形型と結び付け、最近話題になっている“水循環基本法”への関心の高まりに応えるための“水文地形図”もその延長に位置づけて新たな工夫が必要になると考えている。これはいわば発展途上にある課題といえ、今後の発展が望まれる。ここではこれに関連する事例を示すに留める。

i. 胆沢扇状地

胆沢扇状地は一般的な扇状地に比べて、かなり特異な性格を有しているといえる。それはこの扇状地の形成年代が古く、また表層部を構成する地層が薄いため、地下水面が地表に近い位置にあるという点である。そのため各所に地下水の湧出がみられ、地下水利用もしやすいということもあって、石器時代や古墳時代といったごく古い時代から人間の居住を可能にしてきた。

扇状地の規模としては延長（東西）20 kmを越え、わが国第一級の範疇に入る。扇頂部の標高は 300m、扇端部は 70~80m と東側へ標高を下げ、北上川河岸低地とは崖線をなして接している。扇状地面は南から北へと、図 6 にあるように 6~7 段の段丘が全体として高度を下げながら発達しており、この地域が北落ちの傾動の場にあることが推察され、このような地形上の特徴も我が国の一般的な扇状地とは異っている。

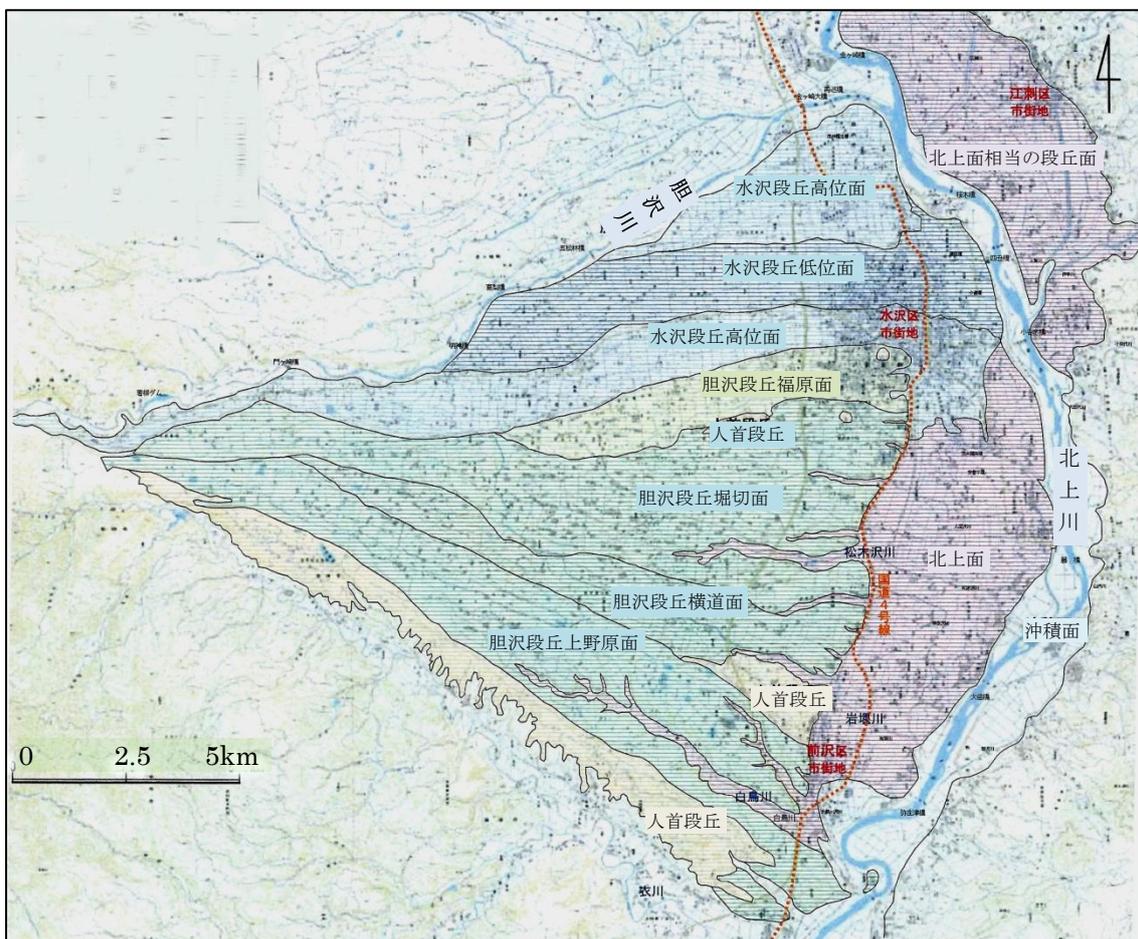


図 6 胆沢扇状地における段丘面区分

(出典：東北地方整備局岩手河川国道事務所(2008)：平成 9 年度胆沢扇状地水収支解析業務報告書

なおこの扇状地によく見られる傾向であるが、集落の配置は写真2にみるように扇状地をつくった河川の氾濫の跡を物語る自然堤防の発達状態を示唆している。集落の北側は防風林が並び、薪炭や堆肥の供給地として利用されてきたことが読み取れる。またこのような傾向は浅層地下水の網状の流れを示唆し、また扇状地における浅層地下水の存在や流動は通常の地下水調査の精度ではキャッチし得ない局地的かつ選択的な流れ (preferred pass-way) になっていることを示している。



写真2 胆沢扇状地における集落配置の特徴

なお参考として写真3に国土交通省胆沢ダム工事事務所の作成による地形模型図を引用させていただきます。

この写真にみる注目すべき特徴は、北上川低地に望む扇端部南部の前沢町から北部の水沢市にかけての崖線沿いの地形の僅かな高まりや、“見分森自然公園”などの残丘の存在である。これらの特徴はこの扇状地の発達過程に関係するものと予想され、その究明は筆者にとっての課題となっている。

最後に盛岡市産学官連携研究センター内にある「横山空間情報研究所」の横山隆三岩手大学名誉教授からの提供による胆沢扇状地の立体衛星画像を掲載させていただく(写真4)。この画像には上記の特徴以外に、扇状地の中央部西寄りのところに南北に走る複数のリニアメントが認められる。これは出店断層と呼ばれ、西側が東側に対して相対的に隆起する逆断層とされているものに相当する。

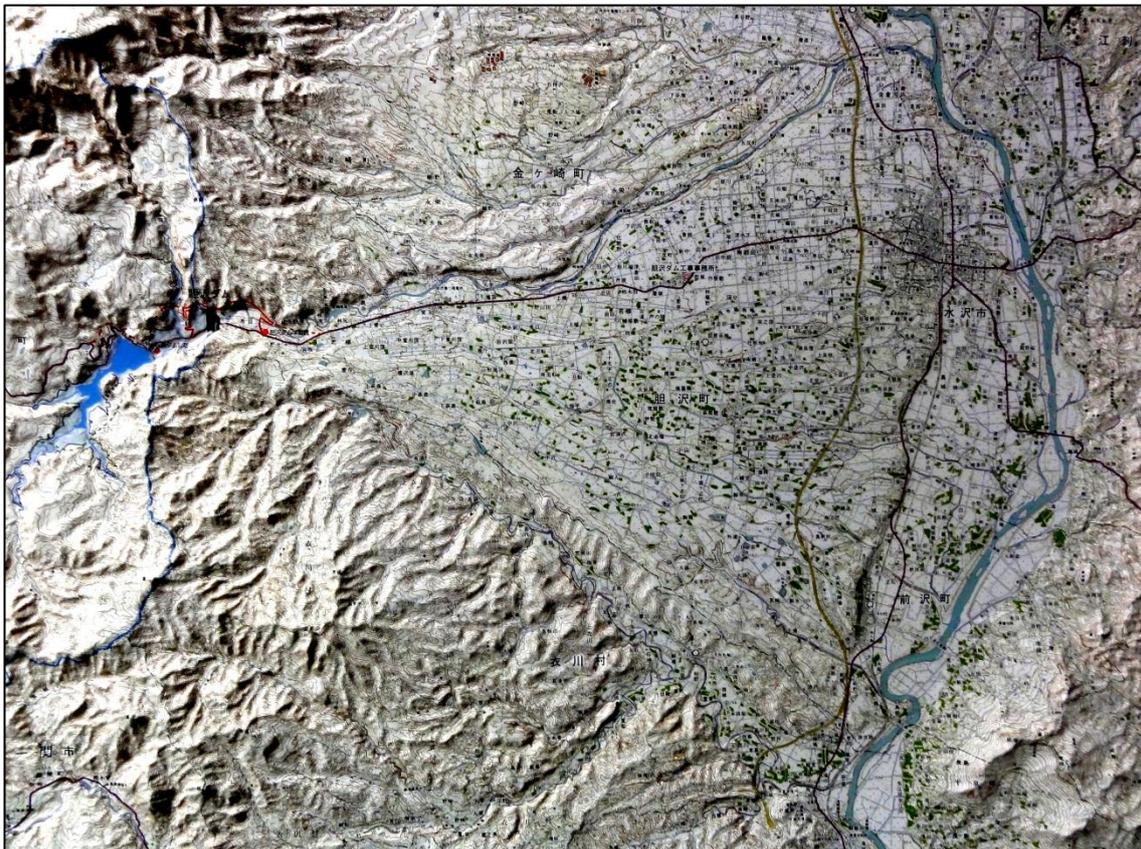


写真3 胆沢扇状地の立体地形図

(出典：胆沢ダム工事事務所)

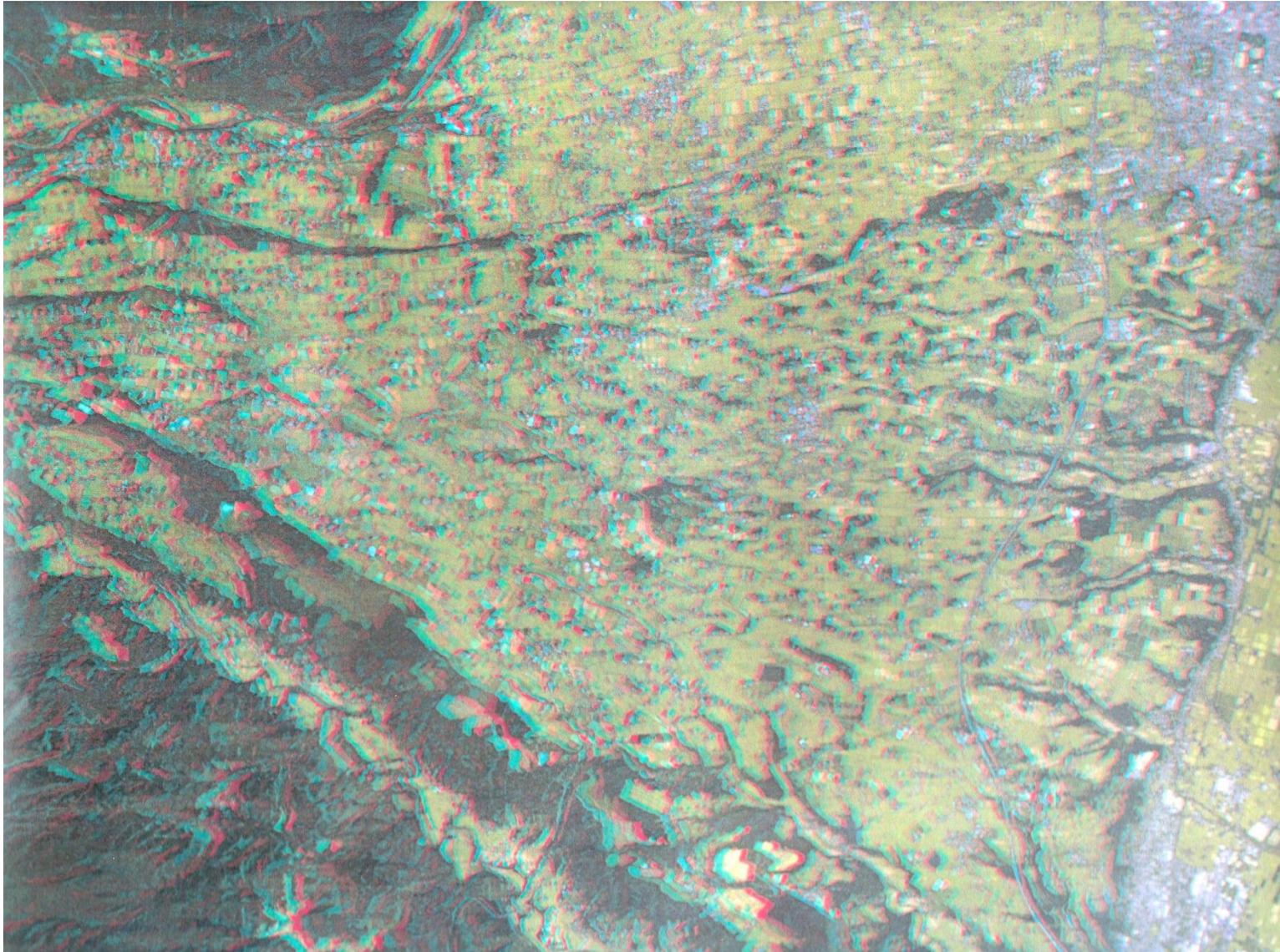


写真 4 胆沢扇状地の立体衛星画像（横山空間情報研究所作成）（赤青メガネ  を使用のこと）
USGS/NASA LND SAT 国土交通省国土数値情報

ii. 愛知川扇状地

鈴鹿山地を背後に控えた琵琶湖に面する平野には図 7 にみるように段丘化した扇状地群とそれを切る現世の扇状地群がよく発達している。また平野の所々には火成岩類からなる観音寺山や安土山などの孤立丘が存在する。

上記の扇状地地帯は戦後、地下水利用による農地開発が進み、次いで湖水を灌漑水源とする陸田地帯が広く展開するようになり、さらにその後、新幹線や高速道路の開通に伴って各地に工業団地が立地するようになった。

滋賀県ではこのような環境変化が地下水汚染につながることを懸念して昭和 58 年に地下水汚染実態調査を実施したところ、安土町の水道水源井において水道水の暫定基準を上回るトリクロロエチレンが検出された。

この結果を受けて調査対象地域をさらに広域に広げた結果、上記以外の地域での有機塩素系化合物による汚染が広く確認された。すなわち汚染地域は上流の旧八日市市から下流の近江八幡市や安土町にまで達するような広域に跨るもので、規模は当時全国有数といわれるものであった。筆者が本格的に地下水汚染を手がけるようになったのはこの事件からである^{脚注)}。

長期にわたる追跡調査の結果、以下の点が注目された。

- ① 汚染源は旧八日市市の工業団地の中にあるラジエーター製造工場内の一角に特定された。
- ② 高濃度の汚染が確認された地区は図 8, 9 のようにきわめて限られた地帯に集中している。
- ③ 汚染は延長 10 数キロ m という距離を極めて短期間のうちに広がった。
- ④ 最初に汚染が確認されてから 10 年以上経過したにもにもかかわらず、図 9 のように汚染濃度は低下するものの、その範囲は当初と殆ど変わらない。

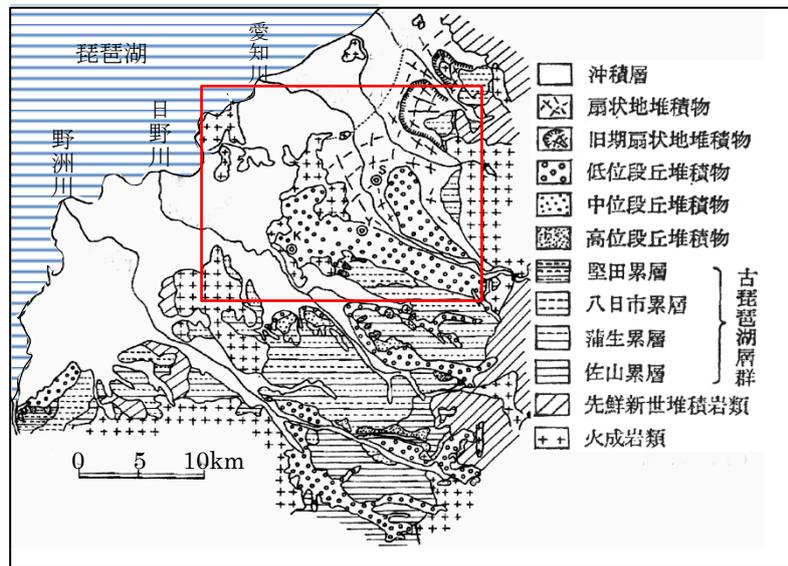


図 7 近江盆地南部の地形・地質の概要(□は図 8~11 に対応)
(出典:「日本の地下水」編集委員会(1986):地球社)

上記の ②は汚染物質が扇状地中の一つの水文地形単位ともいえる透水帯、すなわち地下谷を集中的に流下したことを意味し。③は ②に加えて灌漑期における琵琶湖からの大量の灌水の地下浸透が地下水流動を加速させたことを示している。さらに④は地下谷の底に溜っていた当初の原液に近い高濃度の汚染プルームが少しずつ希釈され、流下していることを意味している。

図 10 はこのような透水帯を裏付けるために実施した電極間隔 10m に固定した水平探査法による比抵抗分布図である。図にある比抵抗値の高い部分は透水帯を意味し、扇状地全体を一地形単位とする枠組みでは対処し得ない地下構造が存在することに注目する必要があることを示している。加えて注目すべき点はこのゾーンが段丘面にあることで、汚染はこれより標高差の殆どない愛知川低地には広がっていないことである。

脚注: 滋賀県から筑波大学環境科学研究科に派遣された県職員との共同研究。

この事実は図 11 に示した愛知川扇状地の流量ベクトル図とは明らかに矛盾しているように見える。

この図によれば流量ベクトルは汚染源から現愛知川側と異なる別の 2 つに分かれているように見えるが、実際には地下水面図と透水係数から数値処理しただけでは事実は語れない自然の姿が示されて興味深い。
(以下次号)

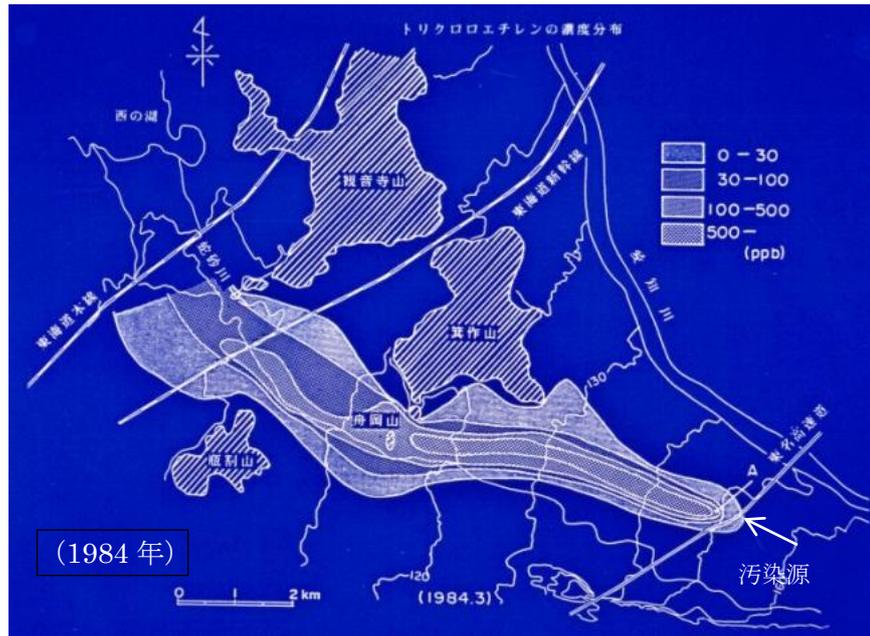


図 8 トリクロロエチレンの濃度分布 (滋賀県愛知川扇状地)
(出典：杉江広行(1986)：筑波大学環境科学研究科修士論文)

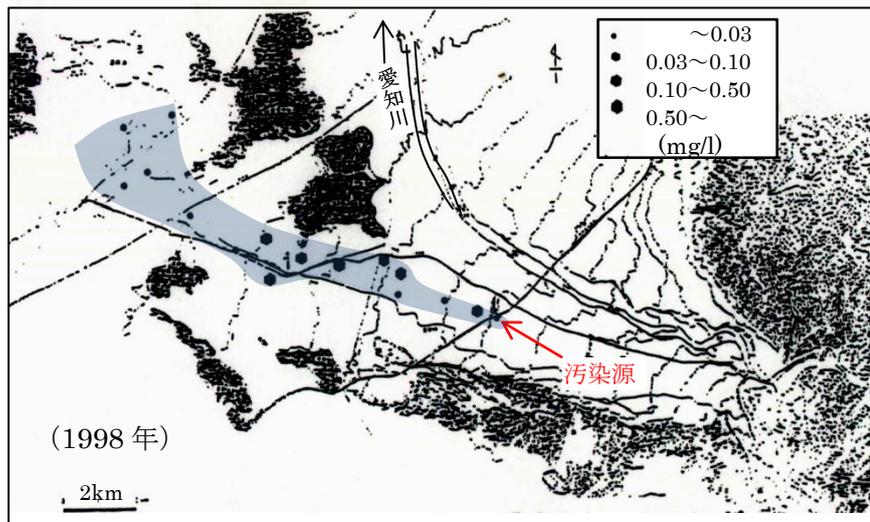


図 9 トリクロロエチレンの濃度分布 (滋賀県愛知川扇状地)
(出典：滋賀の環境 1999「平成 11 年版環境白書」)

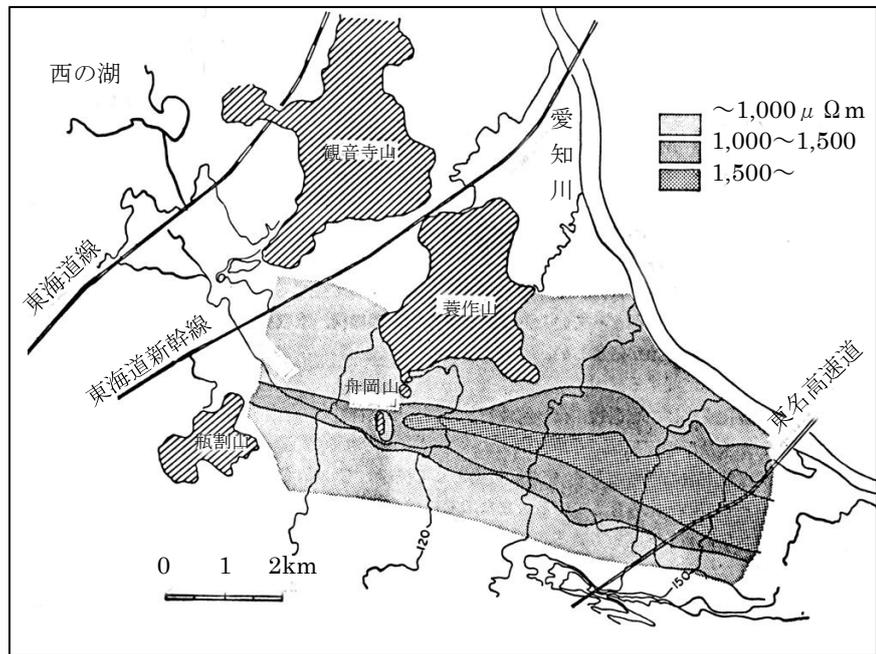


図 10 電気探査（水平探査法）によって推定された地下谷
 (出典：杉江広行(1986)：筑波大学環境科学研究科修士論文)

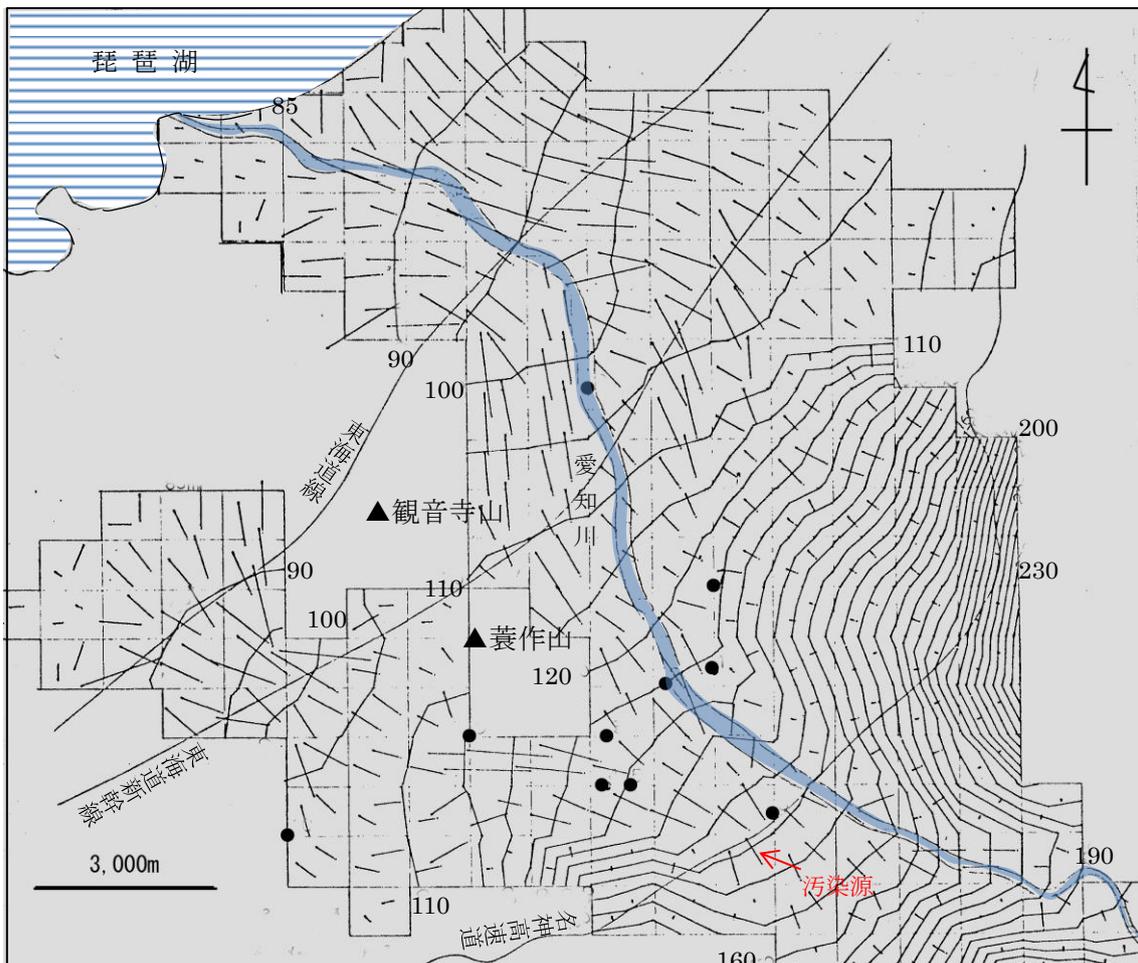


図 11 愛知川扇状地の地下水流量ベクトル
 (出典：近畿農政局(1979)：愛知川地区地下水収支解析業務報告書)