

69. “水文地質”のフレームワーク (その5)

はじめに：前号に掲載した表1は本課題の骨子ともいえるものなので、一部修正したものを併せて再録する。

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	キーワード：堆積相 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)	キーワード：帯水層単元・層序 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水質の対比が重要。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)	キーワード：堆積盆地 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。
	地形的要因	キーワード：微地形 地表の起伏は堆積物の性状を反映していることが多く、扇状地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 DEM による微地形解析は有効。(図4, 5参照)	キーワード：地形単元 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。	キーワード：地下水流域 未固結堆積層からなる台地、丘陵地などにみる高次の谷は地下水質を反映していることが多いので、地下水流域の第一近似として水系網図、接峰面図は有効(図12, 23参照)。また最近では立体衛星画像による地形解析が可能となり、その活用機会が増加(写真6参照)。なお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。
地下水の動態にみる注意すべき現象		地層の不均質性(図25、写真9-11)を反映した選択流(写真12-14)の存在は重要。その通路となる間隙部分は降雨浸透→流出の過程で成長し(写真15-17) Preferred pass way を構成する。なお不飽和帯-飽和帯で発生するゼロフラックス面は土壤汚染の長期化に関わる。(図24)	層準を異にする帯水層の水頭差によって生じる漏出現象(図29)。これには過度の地下水揚水や地下工事などの人為的な要因が関わって発生するケースが多い。なおこれらの解析の際には深度別の水頭記録が不可欠。ここでは建設工事に伴う地下水障害事例を中心に据えて話を展開した。	地下水流動系の範囲や性格は堆積盆と重なることが多く、また多くの場合、地形がその大枠を規定する。その際、切峰面図(図3)や水系図(図4)は有効な情報となる。地下水盆地の性格は、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によって特定される。
解 説		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。	・漏出現象は浅層地下水、深層地下水を問わず、水頭勾配が自然のそれを大きく上回る場合に発生することが多い。 ・不圧地下水の動態に関与する地形要因は大きい(図34)。この場合、その影響が被圧地下水に及ぶこともある(図34)。 ・漏出現象を直接追うことは容易ではなく、この現象に関しては涵養域における地下水涵養機構、汚染物質の深部侵入のメカニズムなど追究すべき課題も多く残されている。	・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。したがって地下水盆地の性格把握の第一歩として地形情報は不可欠。 ・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。往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だけでは不十分。 ・陸域~水域の複雑な堆積環境にある涵養域の水文地質の把握の際、電気検層記録は有効(図9)。

(着色部は本号の話題、紫色の字は本文に掲載した鍵図)

a) 本項の企図

本項で紹介しようとしている関東平野北西部にあたる地域と筆者との関わりは昭和38年ごろの日本鑿泉探鉱株式会社（現在の株式会社日さく）の社員時代に遡る。それは当時の工業技術院地質調査所（現在の産業技術総合研究所地質調査総合センター）からの受託調査に関わったことが切っ掛けである。この業務の対象地域は両毛地域から関東山地東縁の洪積台地群を経て武蔵野台地西部にいたる広範囲なもので、電気探査を中心とする水文地質調査に加えて、鑿井資料の収集整理であった。これは筆者の研究人生に大きな影響と財産を与えてくれたと言ってもよい。

その後、川越市郊外に新設された東洋大学工学部の土木工学科に移ってから、地の利を生かし、多数の学生達の協力を得て、筆者自身の研究としてこの作業を続けることが出来た。これは昭和56年に筑波大学に移るまで続いた。

ところで本号でとり上げた関東平野北西部に焦点をあてた調査・研究は、昭和43年の「河川流域における水収支機構に関する研究」（科学技術庁研究調整局）が組織的に行われた最初のものであろうか。これは蔵田延男、村下敏夫、木野義人、森和雄、永井茂、など錚々たるメンバーがかかわった仕事であった。また同じころのものとして、関東農政局によってまとめられた昭和49年の「農業用地下水調査・利用基礎調査」がある。これは農林省関東農政局の重要業務として実施されたものであったが、一方では同じ年に東京通産局による「北関東地下水利用計画基礎調査－水理解析報告書」も公表されている。なお同年には筆者も関わった「北関東広域水機構調査報告書」が公にされている。これはその後、数年にわたって実施された。これらの調査もさることながら筆者自身の重要な課題としてきたのは、涵養域の水文地質構造と地下水涵養機構の解明であり、加えて豊水期（夏季）と渇水期（冬季）における河川流量観測に基づく地下水涵養量の実態把握であった。

今回の話題はこの関東地下水盆の西北部、特に次ページに示した写真1にみる利根川、烏川、神流川が合流する高崎付近から下流、館林～野木付近に至る地域に焦点を当て、これを表1にある水文地質のフレームワークの最後の部分の典型例として取り上げた。

ところで図1はAAPG(American Association of Petroleum Geology)編集によるPetroleum Geology of Deepwater Settings(2007)から引用したもので、陸域から海域にかけての部分の貯留層(≒帯水層)の特徴をよく表現しているように思われる。これを当地に当てはめれば、左端の図はまさに写真1の地域にあたり、中央の図はこれより下流の太田～館林地帯、また左端の図は古河から加須地域になるであろうか。

このようなモデルを踏まえ、実用に耐えられるレベルで、地下水の涵養域から流動域にかけての水文地質構造を明らかにするためには、それに対応する詳細な情報の蓄積と解析が必要であり、容易ではないことがわかる。加えてそのバックグラウンドとしての堆積規制要因(図2参照)も解明される必要がある。その際、表1に触れたシーケンス層序の考え方は有効であると期待される。

このように水文地質研究の難しさは地表の地質と異なって、これを直接観察することや、その広がりを追って、従来の地質学が説くレベルを超えるフルスケールの水文地質構造を追究することが簡単にはできないことである。材料としては点情報としてのボーリングや各種物理探査による間接的なものに限られる。これまで表層地質で確立している層序を実用に耐えられるレベルで地下に追った研究は少なく、とくに涵養域は地下水管理上、重要な地域であり、地表地質と地下地質の接点という純粋地質学の上でも重要な場所でありながら、研究例が少ないのはこの点にある。今回の話題は今後のこの方面の研究の進展を期して敢えてこれに焦点を当ることにした。



写真1 神流川合流点付近の利根川の河床 (河床と周辺の地形に注目)
 (出典：関東地方建設局(1987)新利根川誌)

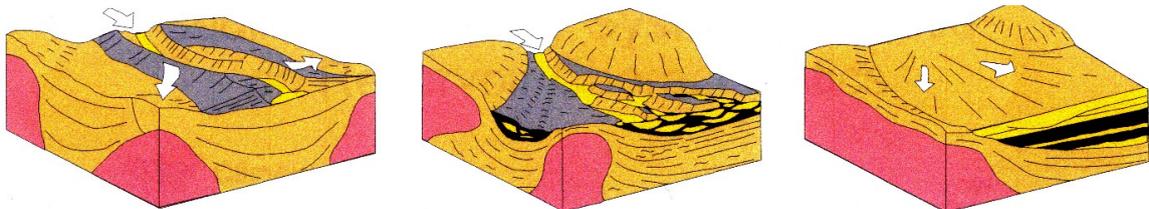


図1 写真1に対応して想定される涵養域～流動域の帯水層構造

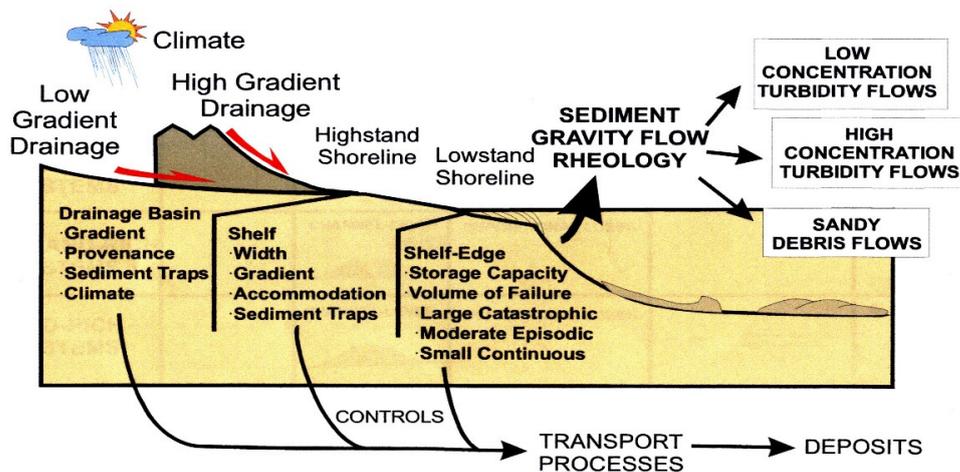


図2 貯留層(帯水層)の形成に関わる堆積規制要因
 (出典：AAPG(2007): Petroleum Geology of Deepwater Settings)

b) 地下水盆の輪郭

我が国の地下水は、その水循環の時間的、空間的特質から、大陸などの場合と異なって地形单元 (=分水界) が原初的、かつ基本的であると考えた方がよい。また海水準変動の影響が内陸にまで及んだような地域では、後期鮮新世以降の堆積物の特徴にその影響が直接及んでいることも多い。さらに運搬される土砂の供給地が隆起するような地域では、後背山地の中新世中・後期に遡る地質構造史が関わっている可能性が大きいことにも目を向ける必要がある。このような地域では、その時間的かつ空間的な背景が大きく関係しているので、従来の地下水学のような一元的な捉え方では本質を抑えることはできない。ここでは以下の諸例をあげて、この地域の輪郭について考察する。

i. 切峰面図

図3は全国をカバーする5kmメッシュのDEMによって作図した全国の切峰面図とそれから切り出した関東地方の切峰面図である。これによると我が国の主な地下水盆の輪郭は地形に支配されていることがよく分かる。関東地下水盆についてみると、埼玉北部から両毛地方に至る地域と鬼怒川流域が、後背山地を含めてその主要な地域であることが浮彫りされる。なお最近DEMの精度は更に上がり、より詳細な地形情報が得られるようになった。地下水盆の輪郭を掴むためには第一近似としてこれで充分である。

ii. 水系網図

図4は北関東地方を中心とした水系網である。水系網を支配する要因として流域の地質環境は重要なのは言うまでもない。ここで特に注目されるのは両毛地域の向心的な水系パターンで、これには地殻変動が関与していることを窺がわせる。この地域の地質が地溝状を示すことについては後に触れるが、それとの関係でこの水系パターンを説明することは可能と思われる。

iii. 立体斜度図

図5は国土地理院の10mメッシュ数値標高モデルから作成した関東平野北西部の立体斜度図である。これは斜度を白黒階調で表したアナグリフ画像で、図化する際に縦横比を強調することによって、地形の特徴を浮かび上がらせることができる。

図の下の方に北西-南東に走る深谷断層が認められる。また北に位置する榛名、赤城の両火山体がこの地方の“水がめ”としての役割を果たしているのが手にとるようにわかる。図に添えた利根川を挟んで北東-南西に切る地形断面図によれば、次に述べる重力図とあわせてこの地域が地溝の特徴を有していることが窺える。

iv. 重力図

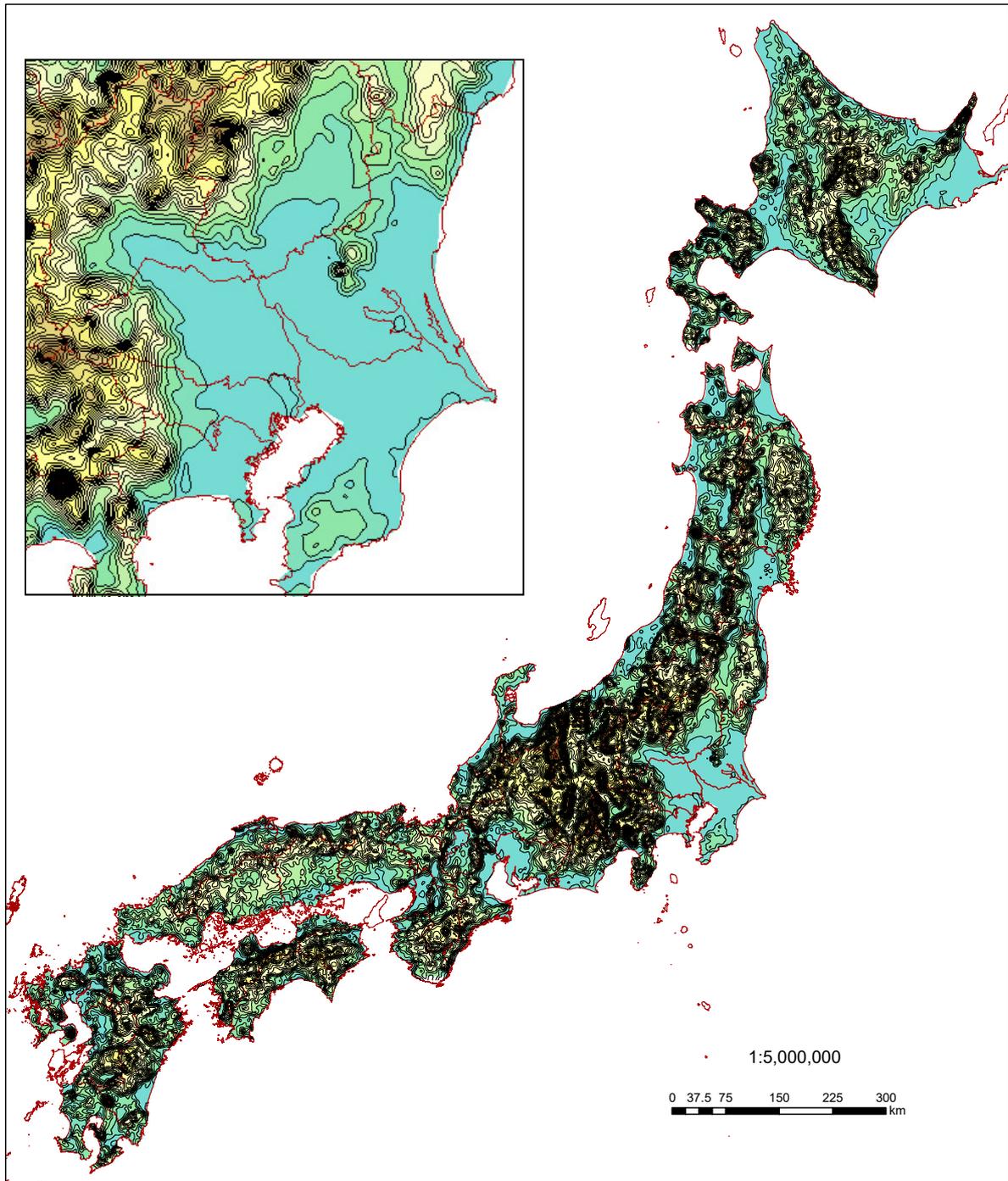
重力図は地下水盆の輪郭や堆積物の物性(密度)を把握し、地下水盆の性質や輪郭を探るのに有効である。図6は地質調査所(1985)による「関東地域重力図」から切り出したこの地域のブーゲ異常図である。古期岩石が分布する足尾山地や関東山地は高重力域を示し、また前橋・高崎方面から行田方面にかけての中央部は低重力を示していて、密度が小さい新期地層群がトラフ状に厚く堆積していることを示唆している。

v. その他

上記に加え、地下水面、地盤沈下量、地下水質、地下水温等の分布図は地下地質を反映していることが多いので地下水盆の輪郭を把握する際に参考になる。

c) 地下地質の様態

図7は本項で利用した鑿井記録の位置図である。なお実際の鑿井数は、全国地下水(深井戸)資料台帳(関東地方編)、首都圏地下水(深井戸)資料台帳、埼玉県地質柱状図集に加えて、農水省や通産省等の報告書にあるものを加えると、この地域だけで500本以上は優に存在し、この地方が一大地下水利用地帯であることが理解できる。



凡例

- 100m	600m - 700m	1300m - 1400m	2000m - 2100m	2700m - 2800m
0m - 100m	700m - 800m	1400m - 1500m	2100m - 2200m	2800m - 2900m
100m - 200m	800m - 900m	1500m - 1600m	2200m - 2300m	2900m - 3000m
200m - 300m	900m - 1000m	1600m - 1700m	2300m - 2400m	3000m -
300m - 400m	1000m - 1100m	1700m - 1800m	2400m - 2500m	
400m - 500m	1100m - 1200m	1800m - 1900m	2500m - 2600m	
500m - 600m	1200m - 1300m	1900m - 2000m	2600m - 2700m	

図 3 日本列島と関東平野の切峰面図

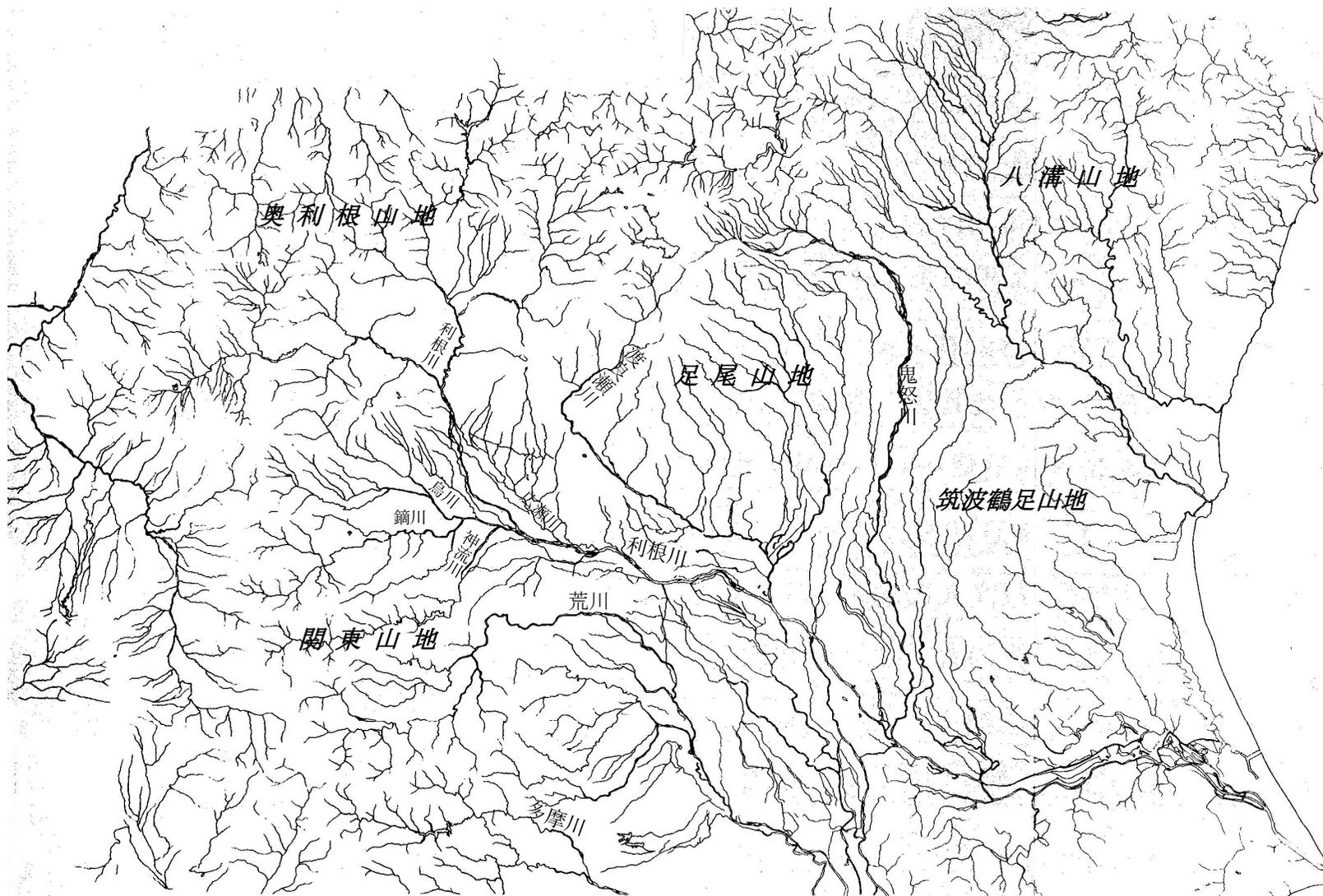


図4 北関東地方の水系網

(出典：建設省関東地方建設局(1974)北関東広域水機構調査報告書—その2—)

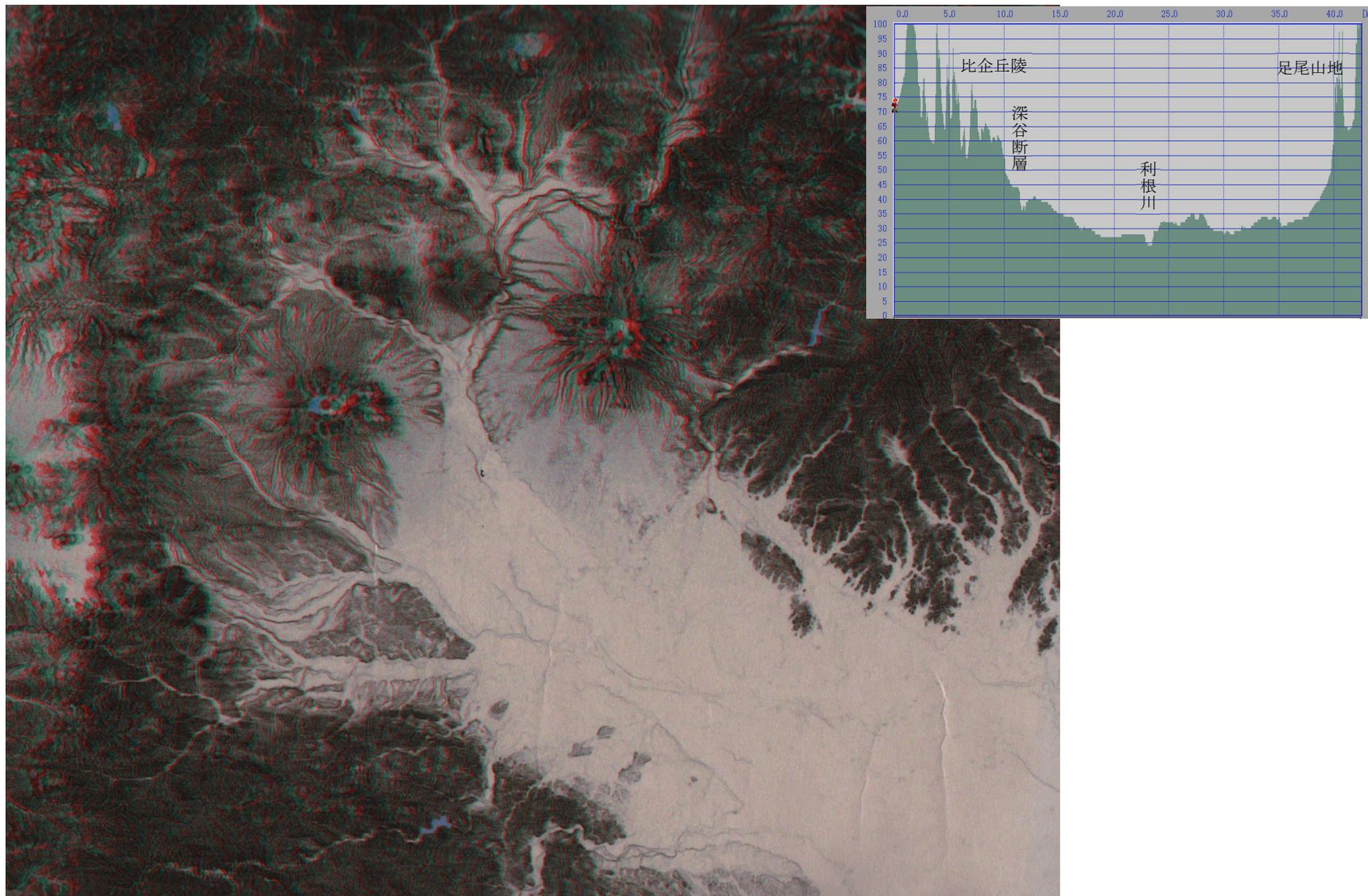


図 5 北関東両毛地域の立体斜度図 (横山空間情報研究所作成)

(赤青メガネを使用のこと)

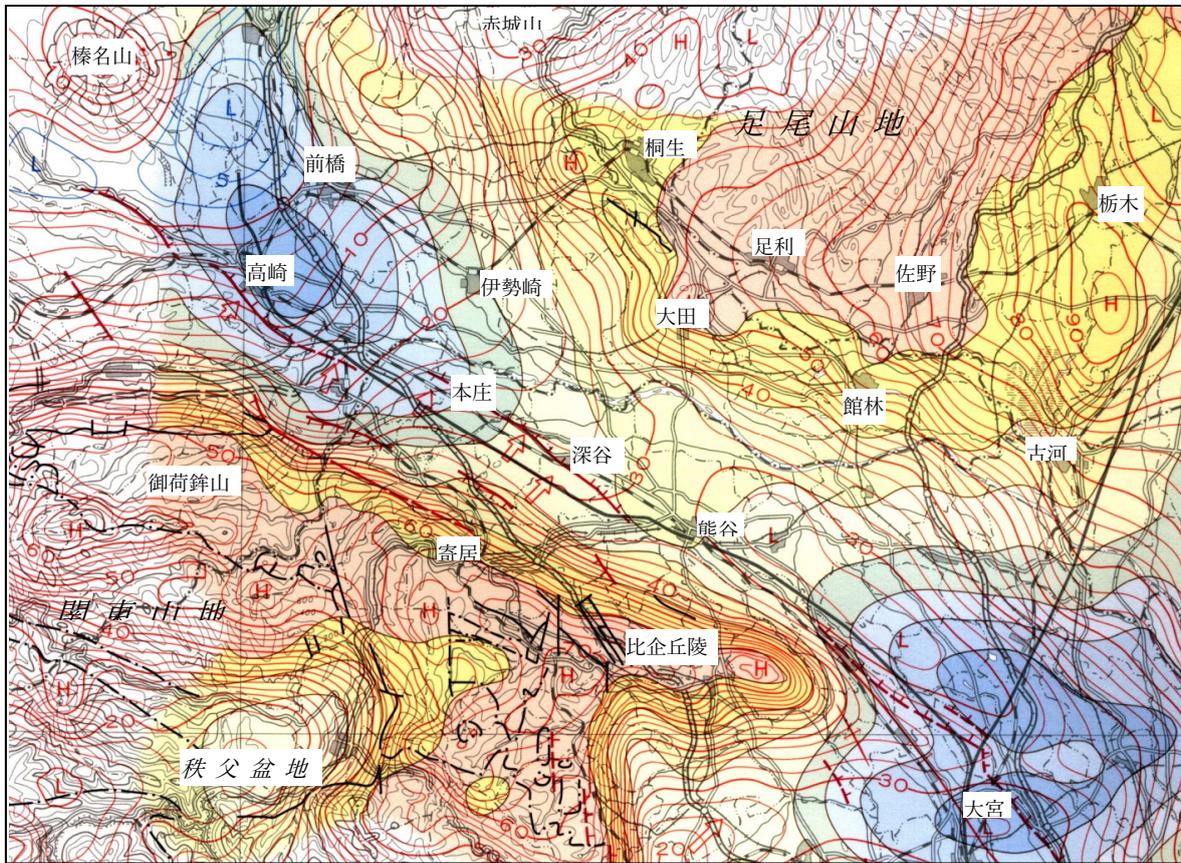


図6 関東平野北西部のブーゲー異常図
(出典：地質調査所(1985)「関東地域重力図」)



図7 本文に利用した深井戸資料の分布
(実際にはこの数10倍の深井戸が存在する)

参考までに筆者がこれまでに整理してきた台帳の一部を図8に切り出して示す。このように図化しておいたものを時折ながめては新たな発想に繋げようと心掛けている。

ところでこの地域の主な取水層は鮮新世から前期更新世にかけて堆積した上総層群および、その上位の洪積層(下総層群)であるが、それらの堆積環境は後背山地の隆起と平野部の沈降が並行して進み、大量の礫質堆積物が極めて急速かつ乱雑に運び込まれる状況にあったと考えられる。このため図にあるような深井戸台帳に記載されている地質名称だけの情報では地層の対比が不可能なほど地域変化が激しく、かつ錯綜しているのが特徴で、堆積プロセスは“mass-transport deposits”の様態をなす場合が多かったのではないかと推測される。

このような地下地質の様態にあって有効な地層対比の手段になるのはスクリーン位置の判断に多用されている比抵抗法による電気検層である。

図9はこれを上流域から下流域にかけて並べてみたもので、本文ではこれをコアとして地層対比を広げていった。

図示の破線は曲線の形状や比抵抗値から、明瞭な地層境界が存在することを示しており、層相と併せて上総層群の上限にあたる可能性を示唆している。

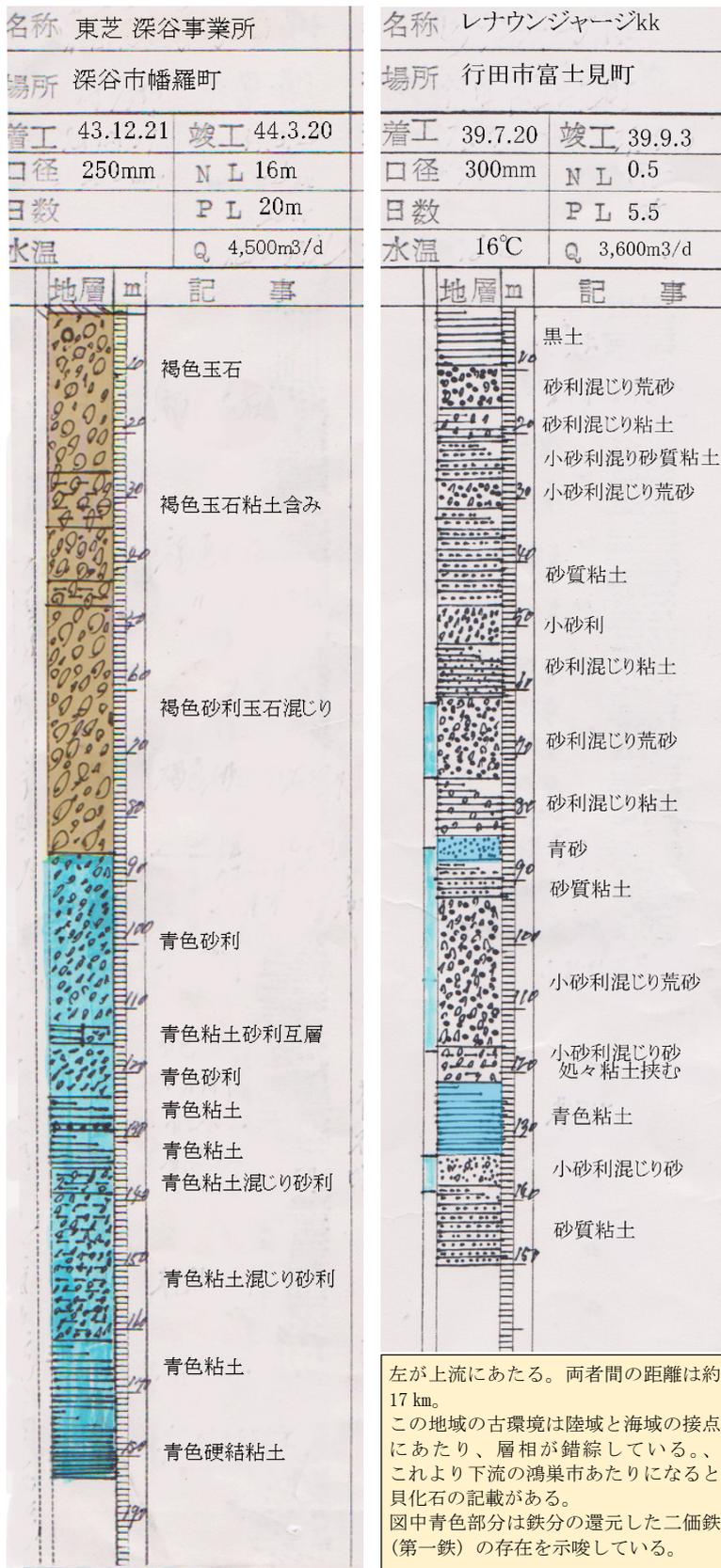


図8 鑿井柱状図の一例

次ページの図 10 はすべて電気検層図をもとに画いたこの境界の等高線図で、トラフ状の凹地帯がよく再現されている。上述のように、これを上総層群上面の地形としている論拠は、比抵抗値に加えてこれより上位は図 8 にあるように、“玉石”と記載されていることが多く、堆積の様態が急変したことが示されていることや、貝化石の有無、細粒堆積物の多寡等からである。

なお図にみるように谷のかたちが南北方向で非対称的なのも大きな特徴で、これは深谷断層の影響によるものと思われる。

(以下次号に続く)

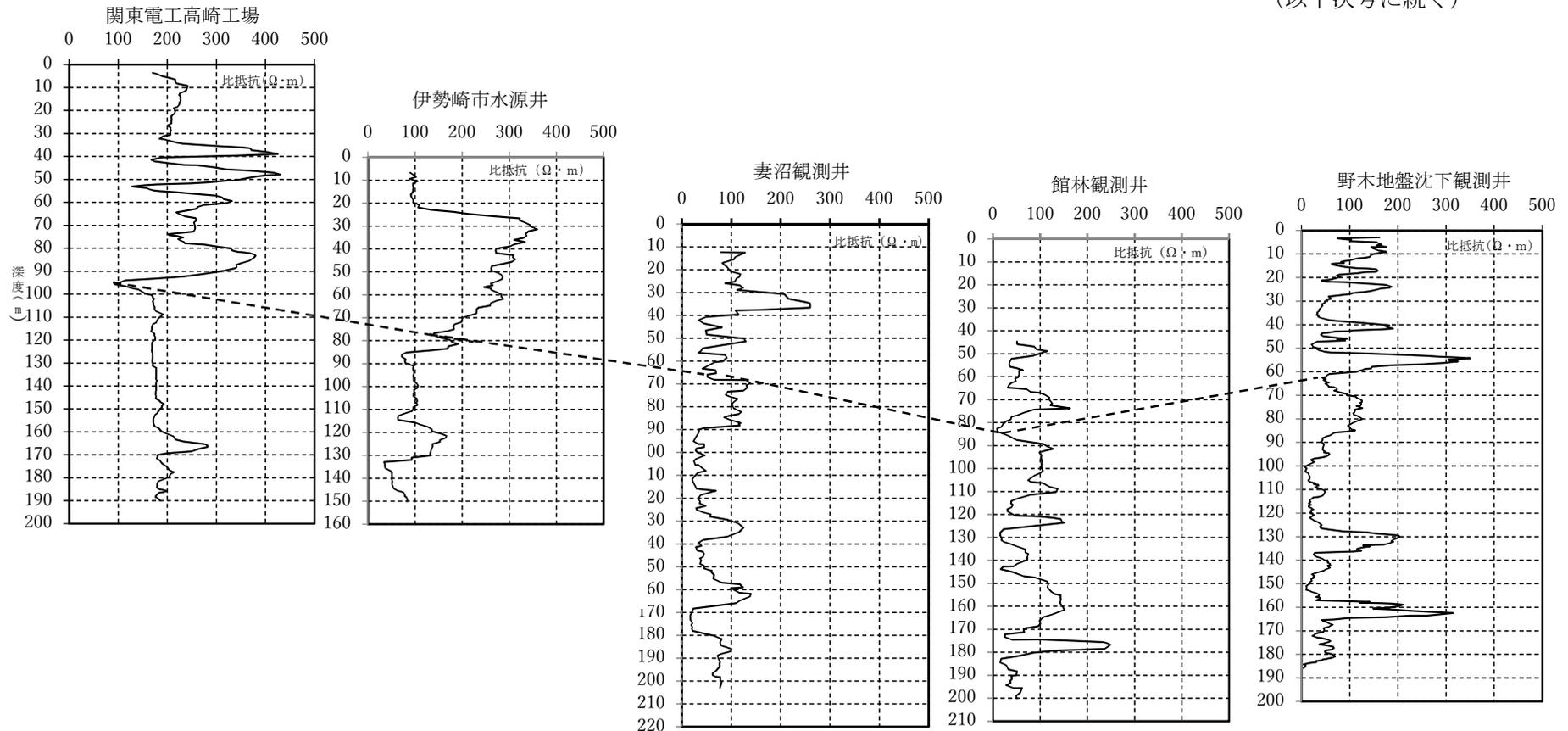


図 9 電気検層図の対比例

(電極配列や間隔が多様なので比抵抗の絶対値は参考にならない)

