

地下構造可視化技術を用いた深井戸計画の成功例と失敗例

キーワード

深井戸, 電磁波探査, 地下水

株式会社アスカソイルコーナー 正会員 奥野日出

大阪府立大学大学院 生命環境科学研究科 国際会員 小山修平

1. まえがき

深井戸による水源確保は灌漑目的の水不足や防災用の非常水源だけでなく、地域環境保全に資する水として広く注目されているため、今後も地下構造の可視化技術を大いに活用して、有効な調査計画が行われることが予想される。

地下構造の探査技術は、従来より鉱床脈、地山の硬軟、断層位置などの判定に有効に利用されているが、地下水水源位置の選定に関しては必ずしも適用性が高いと言い難い。その理由は、比抵抗や地山速度は地域の地質条件に支配され、地山の成層状態、亀裂や乾燥湿潤状態、帯水層の間隙の状態などから多様な測定値を示すために必要な地層区分が困難になることが挙げられる。また断層が水脈かどうか、どの程度の湧水を得るかの判断は比抵抗値のみでは無理な面があり、探査技術単独で水源位置を確定できないことがあるからと言えよう。

本論文では、深井戸計画に必要な探査手法の選定条件を先に述べ、調査事例から井戸資料に基づく地域特性と水源位置選定を目的とする探査技術の有効性について検討した結果と計画井戸の成功例と失敗例の要因について記載した。

2. 探査手法の選定条件

広域な地下水盆地で既設井戸の干渉や周辺地盤の沈下の影響のないところで水源位置を決定するため、候補地を複数選択する上で電気探査が行われることが多い。

電気探査は、垂直電気探査、高密度電気探査他により1次元ないし2次元の比抵抗断面図を作成して基盤層、帯水層、不透水層、推定断層などを把握し、水源位置として相応しいかどうかを判定する。

しかしながら、これらの手法は電極配置の障害物(耕作地、国道他)により測線展開上探査深度に限界があったり、垂直探査では地下構造の複層や傾斜に解析誤差が生じるため、予め地質条件や計画井戸を考慮した適切な調査手法を選択する必要がある。

表1には地形地質条件と計画井戸長に基づき電気探査を選択して深井戸計画を行った事例を示す。湖北平野では水平3層地盤で比抵抗値と帯水層との対応が良好に得られた。淡路島洪積台地下では測線展開上、垂直及び高密度電気探査が困難であったため、電磁波探査法(CSAMT法)を適用して基盤と帯水層との境界を比抵抗値から把握できた。

表1. 地質条件と探査手法の選定事例⁶⁾

地域	滋賀県・湖北平野		兵庫県淡路島・洪積台地	
探査手法	垂直電気探査		電磁波探査(CSAMT法)	
帯水層年代	洪積層・更新世		大阪層群・鮮新世	
地質特性	湖岸沿い成層状態良		基盤岩直上・断層有	
地質区分 と比抵抗 の関係	地層	比抵抗	地層	比抵抗
	シルト 優勢層 30m	- m 8	粘土 優勢層 25m 固結粘土 優勢層	- m 10 ~ 50 270
	砂・砂礫 優勢層 70m	455	~ 砂・粘土 互層 95m	~ 170
	粘板岩 100m	925	砂・礫 115m (風化帯) 花崗岩 500m 以深	170 (30 ~ 50) 500 ~ 1000

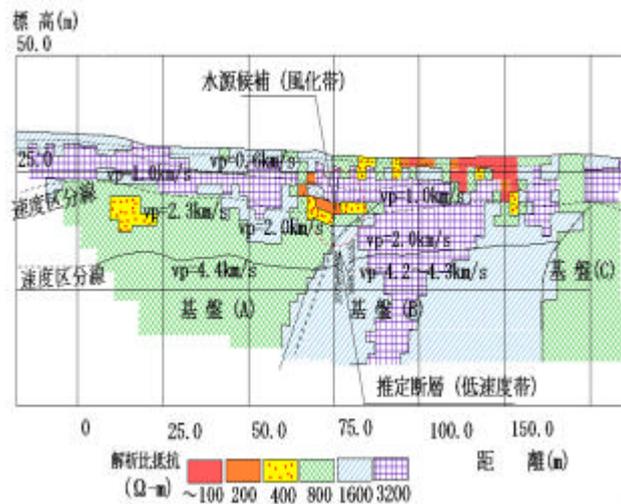


図1. 高密度電気探査と弾性波探査の併用測定事例

図1には岐阜県中生代丹波帯が基盤を成す谷底平野で高密度電気探査と弾性波探査を併用して水源位置を選定した事例を示す。丹波帯はチャート、頁岩、砂岩などの互層により比抵抗分布がブロック状に表われ明確な基盤深度が定まらなかったが、断層及び断層付近の風化帯が把握でき、弾性波速度値からは基盤層が推定できたので、これらを総合検討して地下水脈を形成している断層位置

Some examples of the success and failure deepwell plan by electric prospecting in the structure of the underground.

Osaka Prefecture University Graduate School Life and Environmental Sciences

Co.,Ltd. Asuka Soil Corner Hizuru Okuno

Syuhei Koyama

付近に井戸が計画された。

以上のように、深井戸計画を行う際は、既往資料による基盤の岩種、起伏、帯水層の成層状態、断層位置などの地質条件の推定と計画井戸長(探査深度)を考慮して電気探査の各手法を選定できれば弾性波探査等の組み合わせを行うことが望まれる。

3.深井戸候補地の検討結果^{4),5),6),7)}

深井戸候補地を選定するために地下構造可視化技術を用いる目的は、地下水盆の規模・形状、断層破碎帯、基盤の性質などを把握すること、帯水層の成層状態、断層破碎帯あるいは透水性や逸水性などを推定することである。

比抵抗値よりこれら全ての詳細な状態を明らかにすることは困難ではあるが、少なくとも地下水盆の規模や起伏の形状、断層破碎帯、帯水層の成層状態を把握することは可能である。一方、帯水層の透水性や揚水量などの水理定数は、既設井戸のデータ集積より目安を得ることができる。¹⁾

従って、深井戸計画は調査地の比抵抗値より知り得る地下構造と既往資料から得られた水理定数を併わせて検討することが必要と考える。

次に、前表1に掲げた淡路島洪積台地下における水理定数などの地域特性と比抵抗値から得た地下構造から深井戸候補地として有望性があるかどうかについて検討した結果を述べる。

3-1.鮮新世大阪層群の帯水層⁴⁾

一般に沖積平野で井戸計画を行うときは、地形的に広域な地下水涵養源を有して、地下水供給が盛んな透水性の大きい砂、礫の帯水層を見出し、透水性・不透水層の成層分布に着目し、さらに既設井戸との干渉や河川からの伏流水を避ける位置を選定することになる。

一方、調査地の洪積台地下では、基盤岩上の帯水層は新第三紀鮮新世に形成された大阪層群の固結度の高い砂、粘土層が主体であり、沖積地盤のルーズな砂、礫層と比べると間隙が小さく透水性が低いことが知られる。

このため、洪積台地下の深井戸は、砂層以外にもストレーナ区間が多くとられていて、粘土層においても亀裂性の高いところから揚水が可能と考えられている。

調査地の洲本市北部と南部の地下水盆で集積した井戸データから、ストレーナ区間全長を帯水層とみて揚水量との関係を調べた結果を図2に示した。また透水性との関係を図3に示した。

透水性は揚水試験時の回復法で求めたヤコブの式と下記のテームの式(1)による値がほぼ一致しているが、各井戸の透水性は井戸間あるいは山地境界を影響範囲としてテームの式を用いて求めた。

$$Q = \frac{2.72 \cdot k \cdot (H - h_0) \cdot d}{\log_{10} (R/r_0)} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、

Q: 適正揚水量(m³/min), k: 透水性係数(m/min)

H: 自然水位(m), h₀: 揚水位(m), d: 帯水層厚(m),

r₀: 井戸の半径(m), R: 影響半径(m), R=250 ~ 1000m

である。

図2よりdとQの関係においてバラツキはあるが、Q=a・dの相関式では南部に揚水量が多く、また北部との地域差が出ていることは涵養域や地下構造の違いの影響が出ているものと考えられる。すなわち、南部の涵養面積は北部の6倍に相当し、地下構造は次節に示す基盤岩の起伏や岩種の違い(南部は和泉層群堆積岩互層、北部は洲本花崗岩)と地下水供給が断層以外に層状亀裂の状態によることも考えられる。

図3に示す大阪層群または大阪層群と沖積層を伴う帯水層での平均的な透水性係数のオーダーは10⁻⁴ ~ 10⁻² (cm/sec)の範囲にある。

この透水性係数のオーダーは当大阪層群の井戸性能の特性として注目すべきであり、更新世以降の沖積洪積地盤では通常、帯水層として扱いにくい値と言える。また、図3から揚水量Qは透水性係数について対数紙上で直線関係が認められるようである。

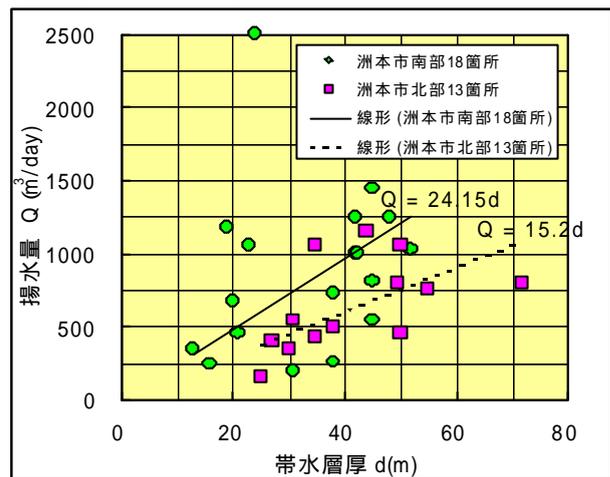


図2.帯水層厚 d と揚水量 Q との関係⁴⁾

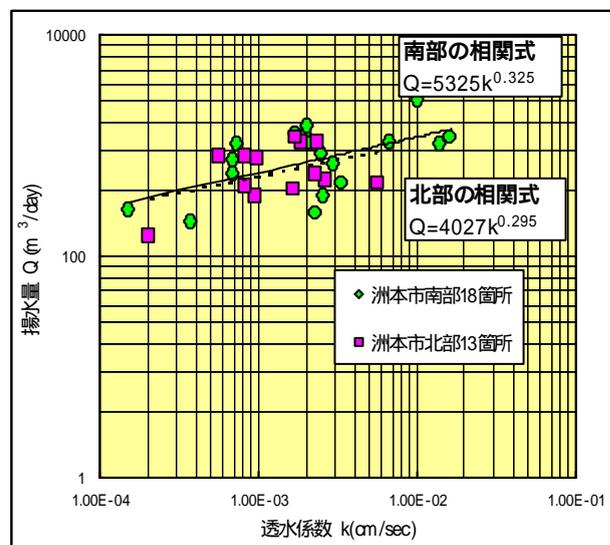


図3.透水性係数 k と揚水量 Q との関係⁴⁾

以上より、井戸計画時には地域特性に基づく d-Q 相関式により計画揚水量が概算でき、また帯水層を構成する地層を考慮した透水係数を与えて計画揚水量を試算することもできる。

3-2.比抵抗断面図による基盤岩分布

地域特性に基づく d-Q 相関式や透水係数より計画揚水量の概算ができて、地下水供給が良好な水源位置であるかについて周辺の地下構造を把握することが必要である。

地下水盆の規模・形状は、比抵抗分布または弾性波速度値などを併用して把握することが候補地を選定する上で重要である。当然帯水層が殆ど得られない浅部で不透水岩盤にあたる位置を選定するわけにはいかない。

調査地の洲本市北部に位置する東西方向約 1km の洪積台地で電磁波探査法による比抵抗分布を測定した結果(平成 13 年 1 月)を図 4 に示す。

地下水盆の西端は標高 300m の洲本花崗岩からなる先山丘陵と活断層(確実度、活動度 A)に接し、東端は標高 250m 未満の丘陵で先山丘陵と同様に花崗岩類からなる^{2),3)}。すなわち、調査地付近は東西両側に上昇地塊である基盤岩が分布し、洪積台地下は相対的に沈降部に相当する。図 4 には表層地質図²⁾、活断層図³⁾、踏査結果を参考にして比抵抗値から基盤岩の分布、大阪層群の地層区分を記入した。

各地層は概ね以下のような比抵抗値で区別される。

・基盤岩	風化帯	10 ~ 50	-m
	軟岩	50 ~ 160	-m
	硬岩	160 ~ 1000	-m
・大阪層群	粘土優勢層	5 ~ 50	-m
	砂礫優勢層	50 ~ 320	-m

なお、各地点毎の比抵抗区分は、逆解析を用いて求めた。比抵抗断面図における基盤岩、破碎帯及び大阪層群の区分は、東部の破碎帯に関する低比抵抗が標高-400m の深部に至る地点ではニアフィールドを考慮して求めている。

図 4 より当地域では断層や破碎帯を伴う基盤岩起伏の著しい様相が推定でき、既設井戸 K-1、S-1 は大阪層群の沈降部に位置していることが分かる。また既設井戸と新設井戸 S-2 の井戸ボーリング柱状図から地質断面図を図 5 に示す。図 5 の帯水層は図 4 に示される基盤岩の起伏より断層が推定される。図 5 より、K-1 は井戸長が浅く帯水層厚も薄いのが、揚水量は 3 井戸の内最大であり(Q=1150m³/day)、初期水頭(湧水ポテンシャル)も著しく高い。また比湧出量は帯水層単位厚当りで K-1 (72m³/day/m) > S-2 (30m³/day/m) > S-1 (25m³/day/m)。揚水時の水位低下量に対しては K-1 (48m³/day/m) > S-2 (30m³/day/m) > S-1 (27m³/day/m) となった。

このように同一の地下水盆でも揚水量、初期水頭、比湧出量に差があるのは、帯水層の亀裂度・透水係数や断層に伴う基盤岩からの裂力水の供給量などが影響していると思われる。

以上より、比抵抗分布の測定結果から地下水盆の規模や基盤底の形状が把握でき、大阪層群の帯水層が地表下 150m より深い基盤の凹部にあり、この位置でもって揚水良好な井戸が施工された。しかし、この比抵抗断面図の基盤岩凸部やその延長上にある位置で過去に幾つかの試錐が行われたが揚水不能の報告を得ている(図 8 井戸 Wd 参照)。

従って、深井戸計画は基盤岩凹部が有望であり、基盤岩凸部は断層、破碎帯などの水脈からの地下水供給が乏しく、井戸の候補地として相応しくないように思われる。

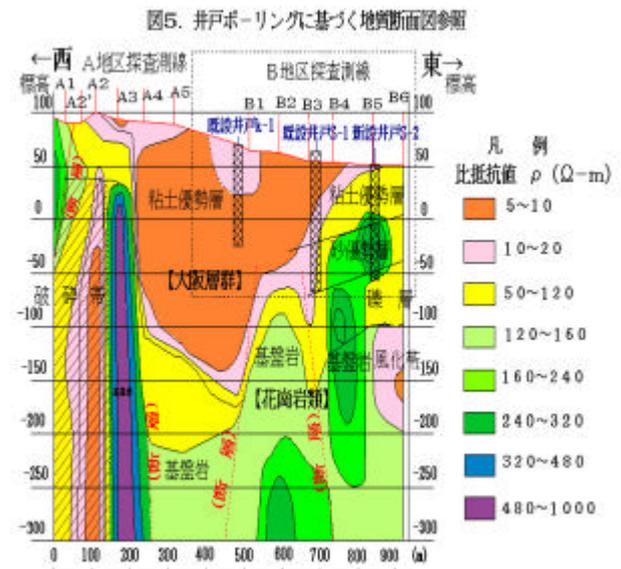
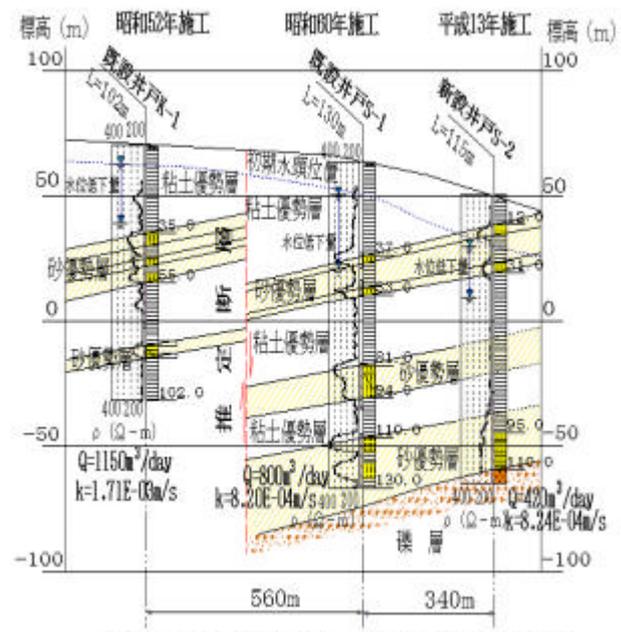


図 4.洲本市北部の一次元解析比抵抗断面図⁶⁾



*井戸ボーリング柱状図には土質と電気検層結果を記載。

図 5.井戸ボーリングに基づく地質断面図⁶⁾

3.3.地下水盆の地域特性⁴⁾

井戸計画では地下水盆の既往資料から水理定数の統計処理を行い、地下構造の様相を電気探査などで詳細に調べることによって揚水源位置を選定することが肝要であり、以上に述べたことから調査地の地域特性を表2にまとめた。

当地域は大阪湾に面する洲本市街より内陸に至り南北に地下水盆領域が二分され、これらの地域特性は涵養域の広さ、地下水盆下の基盤岩起伏、断層付近の地下水供給から揚水量の多少や多様な地下水賦存の形態が想定される。また地下水の水質が井戸水の用途に影響することも推察される。新設井戸の計画時には、表2に示すような地域特性を捉え、計画揚水量が確保できる井戸長、帯水層厚、井戸干渉のない位置、用途に適する水質の目安を把握することが必要と言える。

洲本市南部の地域特性は、地下水盆内にある孤立丘で分断される表層地形から井戸水の用途が区分され、洪積台地下は水道・農業水、沖積低地では工業・雑用水に集中している。一方、同市北部の特性としては涵養域が南部の約1/6程度にある洪積台地下に井戸が多くあり、ため池による水不足を補うため昭和40年代から今日に至り水源開発が進められてきた。しかし、近年既設井戸の枯渇や目詰まり、電蝕などによる井戸性能の低下に加え、新設時の井戸干渉や揚水量確保のための位置選定は重大な課題となってきた。

表2. 地下水盆の地域特性⁴⁾

地域区分	洲本市南部	洲本市北部
地下水盆面積 (km ²)	87.92	14.13
(長径短径) 単位 km	(7,4)	(3,1.5)
表層地形	洪積台地 沖積低地	洪積台地
山地境界の地質	花崗岩類 和泉層群	花崗岩類
帯水層の地質	大阪層群砂層他 沖積層砂礫	大阪層群砂層他
基盤底の起伏	詳細不明	顕著(図4)
地質構造	山地境界に断層	断層・撓曲複数
井戸水の用途	水道・農業・工業	農業
井戸調査個数	18	13 (15)*
井戸長 (m)	46 ~ 162	59 ~ 167
揚水量 (m ³ / day)	200 ~ 2500	150 ~ 2300

(15)*の内、2箇所がデータ不十分

なお、洲本市南部では電気探査などによる基盤岩分布の資料を得ていないので、基盤岩起伏の様相は不明であるが、和泉層群の堆積岩上での複数の既設井戸の分布位置から判断して揚水不能箇所が殆どないように思われる。この理由としては、図6に推定地質断面図を示すように、地下水涵養は遠方に至る地層から供給され、水脈は断層以外の堆積岩における層状亀裂にあることが考えられる。

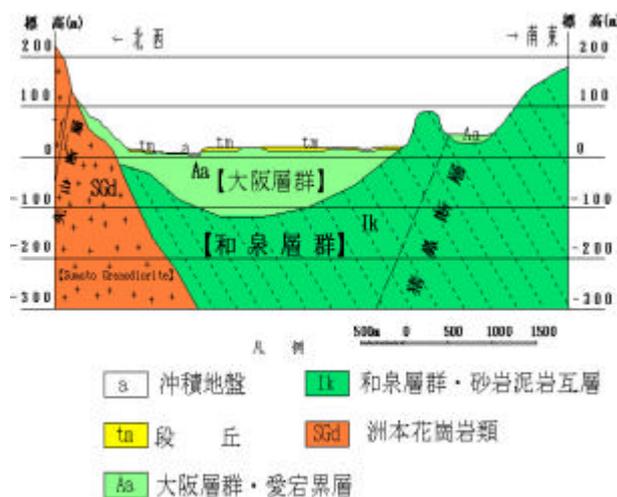


図6. 洲本市南部の推定地質断面図

4. 深井戸計画の成功例と失敗例^{5),6)}

調査地周辺ではため池の水不足や既設井戸の枯渇により、揚水源を確保する事業が継続している。著者らは洲本市北部のF地区(図4北方の延長上)とN地区(図4南方の延長上)で新設井戸候補地を新たな電磁波探査結果を加えて検討した。

以下には、新設井戸を提案した所で計画揚水量が確保できた成功例と計画揚水量以下であった失敗例について記載すると共に、失敗例の原因についても検討した。

4-1. F地区の成功例

図4に示した東西比抵抗断面の位置から、北方約500haの範囲で新設井戸の候補地を検討した(平成15年8月)。

図7に示す探査測点(F1 ~ F7)は地下水盆下の基盤底凹部、基盤岩隆起凸部の関係が求まるように配置し、また踏査と地質図から南北に走る安乎撓曲²⁾の延長上(F2, F4, F5)の配置も考慮した。

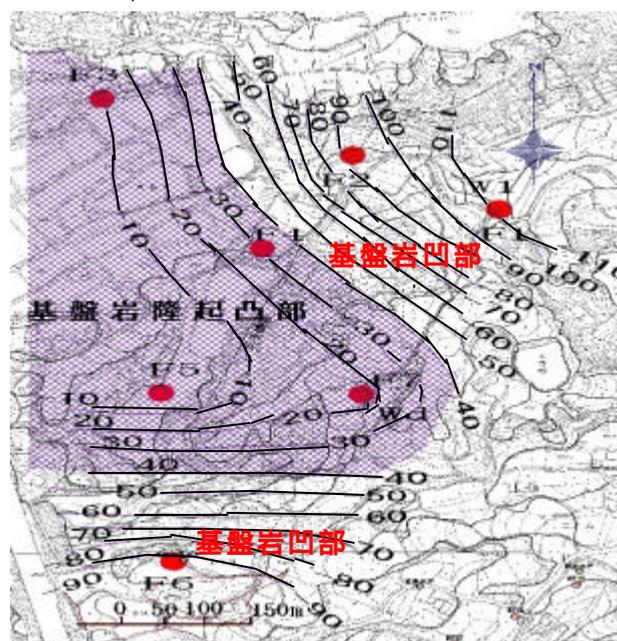


図7. 比抵抗基盤面の分布状況⁵⁾

探査結果より、図7に比抵抗基盤面(基盤岩表層の風化帯比抵抗コンター)を示し、基盤岩凹部、凸部の状況を明らかにした。

新設井戸は図7より基盤岩凹部のF1,F2付近が望ましいと考えられるが、F3より北東近傍に既設井戸があるため、候補地をF1に提案してW1の新設井戸が施工された(平成15年10月)。図8のF1,F7,F6(図4の既設井戸K-1)の比抵抗断面図より、既設井戸K-1と新設井戸W1間の地下構造の様相が把握されるように、既設井戸Wd(揚水不能箇所)の基盤岩凸部を挟む井戸間650mにおいては揚水時の相互干渉が殆どないものとする。

W1井戸は計画揚水量500m³/dayの2倍以上優る1054m³/dayの適正揚水量が得られ、F2付近に安乎撓曲の延長と思われる破砕帯の低比抵抗が深部に至ることが確認され、基盤からの地下水供給も良好と考えられた(図9)。

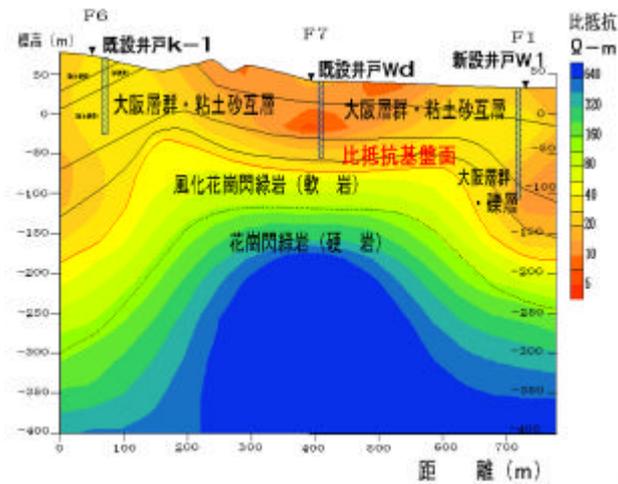


図8.新設井戸W1付近の比抵抗分布図⁵⁾

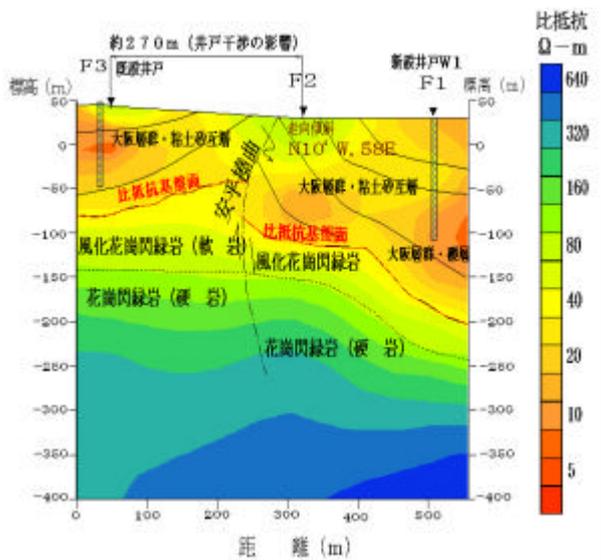


図9.新設井戸W1付近の撓曲構造

4-2.N地区の失敗例と成功例

N地区では既往資料より豊富な揚水量(適正揚水量

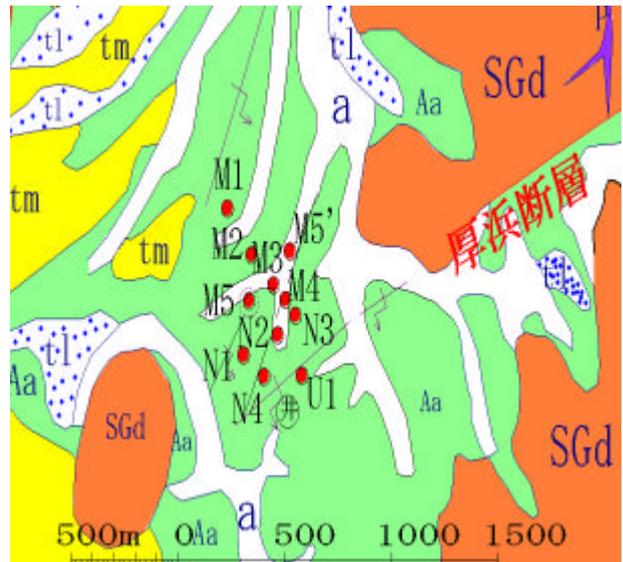


図10.N地区の探査測点既設井戸U1位置(地質記号は図6と同様)

2,300m³/day,井戸長170m)が得られる既設井戸U1を現地で確認した。この北方で新設井戸の検討を行うため、探査測点を図10の位置に11地点選んだ(平成15年4月)。

既設井戸U1は施工前に事前調査が行われていなかったが、地質図²⁾から大阪層群沈降部に相当し、また厚浜断層延長上の撓曲構造付近に位置しているため揚水源位置として相応しい条件を満たしていることと、井戸長が170mまで達していることは帯水層が厚く、調査地は新設井戸の選定に比較的に有利な地域にあると考えた。

しかし、比抵抗分布より基盤岩起伏が著しいと思われ、U1地点以北には僅かな凹状の基盤底しか想定できず、M5地点を第一候補として施工が行われた。新設井戸M5では井戸長が120mに達し当初は計画揚水量400m³/dayの連続揚水が可能であったが、揚水に伴う水位低下が次第に発生したため、適正揚水量は170m³/dayとなり計画は失敗した。

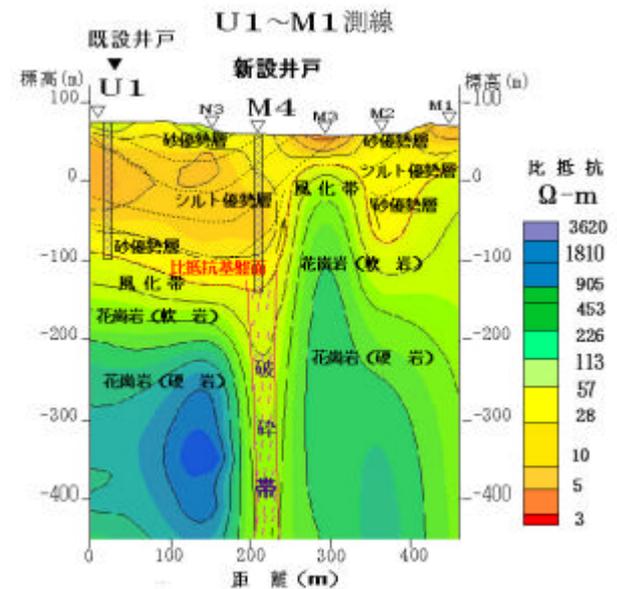


図11.新設井戸M4付近の比抵抗分布図⁶⁾

基盤底の深い位置に新設井戸を設けるには U1 地点に近づけるしかないが、N1 ~ N3 付近では相互干渉が起こり得るため、複数の撓曲構造に挟まる M4 地点の破碎帯直下に水源を求め 2 回目の施工を行った(図 11 参照)。

図 11 に示す新設井戸 M4 では適正揚水量 400m³/day が確保できた。

4-3.まとめ

平成 13 年から平成 15 年にかけて淡路島中部地域の洪積台地下で深井戸計画を行うため、井戸の既存資料と電磁波探査結果を検討し、井戸長、計画揚水量の概算をして新設井戸の候補地を数箇所提案した。当地域は先山丘陵より東方約 3km で大阪湾に面する地下水涵養の乏しいところにあるため、既設井戸との相互干渉を極力避けて必要揚水量を確保し、また塩害の影響を受けない水源位置を見出すことを留意した。

表 3 に深井戸計画の成功例と失敗例に関する施工井戸の諸元と地下水盆の形状、断層・破碎帯などの水脈の影響など地下構造の状況を示した。また洲本市南部の先山断層に隣接する S 地区での失敗例も併記した。

表 3. 深井戸計画の成功例と失敗例

井戸位置	F地区(M)	F地区(S)	N地区(M)	N地区(S)	S地区(1)
施工時期	平成5年	平成13年	平成15年	平成15年	平成16年
井戸長 L(m)	142	110	150	120	150
スクリーン長 h(m)	50	35	(70)	70	詳細不明
計画揚水量 Qp(m ³ /day)	500	400	400	400	500
適正揚水量 Qm(m ³ /day)	1054	420	400	170	詳細不明
透水係数 k(cm/sec)	1.31E-03	8.24E-04	詳細不明	7.70E-06	詳細不明
地下水盆の形状(基盤底)	凹	凹	破碎帯	凹	流れ盤
断層の影響(地下水供給源)					
井戸干渉の影響(R:影響半径)	無(R=325m)	やや有(R=175m)	やや有(R=170)	やや有(R=170)	無(R=500m)
評価	成功	成功	成功	失敗	失敗

表 3 より深井戸計画の目的が達成できる井戸位置の主な選定条件としては、基盤底の凹部が広く、必要揚水量を確保し得る帯水層が得られるまで井戸の掘進が可能であること、断層破碎帯に隣接し地下水供給源が得られることなどが考えられる。一方、選定位置の失敗例は基盤底が凸部で帯水層が確保できず、水脈にも恵まれないことや基盤底の流れ盤も揚水量の確保が困難であるように思われる。

5.あとがき

深井戸計画で成功例の目安となるのは、地域毎の井戸資料から得られた帯水層厚、透水係数と適正揚水量との相関式に基づき計画揚水量が得られる井戸が施工できた

場合である。施工後の適正揚水量が計画時の相関式より大きく下に外れる場合は、井戸の選定位置に問題があったと言える。

したがって、井戸の候補地は地下構造可視化技術を駆使して基盤の規模・形状を精度良く求め、断層破碎帯などの水脈をつかむことが重要と言える。

今回の調査地は基盤が花崗岩類でその風化帯、軟岩、硬岩及び断層破碎帯、また大阪層群の帯水層などを比抵抗分布で区分し、これらの探査結果と施工時の電気検層結果、地質(スライム、着岩)との対応がよく整合していることを確認した。しかし、洲本市南部やその以南においては和泉層群の堆積岩類が基盤であり、この比抵抗値は電磁波探査では概ね 200 Ω-m を示すため、大阪層群の砂、礫層との比抵抗値に差がないため、弾性波探査、高密度電気探査などの手法との併用により地下構造可視化でもって検討することが必要である。

以上のように、深井戸計画は地域の地形・地質条件と断層などの地質構造が及ぼす要因に支配されるため、有効な地下構造可視化技術の選択を行うと共に、計画揚水量を確保するには、地域特性としての水理定数を既往資料から整理・検討しておくことが不可欠と言える。

(謝辞)

本論文を作成するにあたり、電磁波探査の測定に終始ご支援、ご意見を頂きました有限会社ネオサイエンス城森 明氏、高密度電気探査と弾性波探査の貴重な資料とご意見を頂きました有限会社地下構造研究所 故清水啓三氏、また有限会社ジオインフォメーション佐野彰彦氏の各位に厚く御礼申し上げます。

<引用文献>

- 1) 「全国地下水資料台帳」：平成15年、国土交通省
- 2) 高橋・寒川他：洲本地域の地質、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、地質調査所、p46、1992年
- 3) 岡田篤正、東郷正美：近畿の活断層 東京大学出版会、2000年発行
- 4) 奥野日出、小山修平：淡路島中部地域における深井戸に関する調査研究、第42回地盤工学会研究発表会論文集(名古屋)、p.1009-1010
- 5) 奥野日出、小山修平：電磁波探査による洪積台地下の揚水源選定(),平成18年度農業土木学会大会講演会(宇都宮)、p.914-915
- 6) 奥野日出、小山修平：電磁波探査による洪積台地下の揚水源選定(),平成15年度農業土木学会大会講演会(沖縄)、p.932-933
- 7) 奥野日出、小山修平：電磁波探査による洪積台地下の揚水源選定(),平成13年度農業土木学会大会講演会(盛岡)、p.656-657