

花崗岩地帯の小盆地における深井戸開発に 関する一事例

奥野 日出*・城森 明**・小山 修平***

1. はじめに

本報は、筆者らが兵庫県淡路島中部において深井戸開発を行った事例について述べるものである。

淡路島は農業用水としてのため池が全国ため池個数の 7% を占めるほど多いが、水不足を補うため、昭和 30 年以降より深井戸による用水が確保されてきた。しかし、淡路島には全般に深井戸が少なく¹⁾、水源開発が行われてきたにも関わらず、淡路島中部の洲本市では著者らが調査した井戸と井戸台帳²⁾を合わせても深井戸は 30 数カ箇所にとどまる。特に洲本市北域で掘削井が実用化した箇所は 1/3 以下で揚水不能や用途に満たされない水量が大半であった。なお、この地域の地下水調査には電気探査の一種である比抵抗垂直探査(以下、垂直探査)が主に適用されていた。しかし、垂直探査からの地質想定と掘削井から判明した地質とに整合性はなく、水源位置を絞り込む探査手法が問題と考えられた。

電気探査は地下水調査に最も広く利用されており、井戸の位置選定に垂直探査に用いられた事例は多い³⁾。垂直探査は沖積平野のような水平な成層構造を前提とした解析が一般的であり、水平方向に地質が変化する場所では高密度電気探査(比抵抗二次元探査)の適用も行われる。当地域の地下水盆は基盤の花崗岩の沈降部上位にある大阪層群粘土砂互層で構成される。東西の丘陵部に上昇地塊として露出する基盤の花崗岩は大阪層群下においても潜頭の上昇地塊があり、大阪層群特に深部の帯水層を規制していると考えられる。電気探査は実用的な探査深度には限界があり、このような深部の地質構造の探査に適していない。

そこで著者らは地下 500m 付近までを効率的に

できる CSAMT 法を適用した。CSAMT 法は電磁探査の一種であり、調査地点から 3~10km ほど離れた送信源から送信した数 Hz~数 KHz の電磁波を測点で間隔 20~30m の電極とコイルで観測することで地下の比抵抗構造を求める探査法である。この結果を用いて、基盤岩深度とその上位の地層区分が行える情報が得られ、揚水源の位置を決定した。

本文では、電磁探査から地下水盆下の複雑な地質構成を把握することによって地下水賦存の状態について考察した新設井戸選定調査の成功事例について報告する。

2. 淡路島中部の地形地質と調査概要

図-1 に淡路島の地形写真と対象範囲を図-1 に、対象範囲の地質と既設および試験井戸の位置を図-2 に示す。

対象地域は大阪湾に面する洲本市街より西方の内陸に至る範囲である。地形・地質および既設井戸資料から、対象地域の地下水盆は北域と南域の 2 つの領域に分けられる。それぞれの地域の地下水盆に認められる特徴を表-1 に示す。対象地域は地域内への降雨の大半は大阪湾へ流下し、深層に至る涵養は僅かと想定できる。したがって、深井戸に供給される深層地下水は対象地域西方の内陸部からの広域的な涵養や断層等からの裂カ水を想定する必要があると考えられる。

新設井戸の計画時には、表-1 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参考にすると良い。次に井戸の分布と

* おくの ひずる・(株) アスカソイルコーナ

** じょうもり あきら・(有) ネオサイエンス

*** こやま しゅうへい・大阪府立大学大学院・生命環境科学研究科

表-1 対象地域の地下水盆に認められる特徴

地下水盆の地域	南域	北域
地下水盆の面積(km ²)	87.92	14.13
地形	洪積台地	洪積台地
	沖積低地	—
山稜地域、基盤の地質	和泉層群の砂岩泥岩	花崗岩類
帯水層の地質	大阪層群の砂層主体	
	沖積層砂・砂礫	—
地質構造の分布	断層	断層・撓曲
井戸の用途	飲料・農工業	農業
主な深井戸数	18	15
井戸長(m)	46~162	59~167
揚水量(m ³ /day)	200~2,500	150~2,300
年平均降雨量(mm)	1,462	約 1,100
年平均蒸発散量 (mm)	約 700 ²⁾	

地形上の特徴をみると、図-2の北域では、東西に分布する花崗岩類の丘陵間に大阪層群、段丘堆積物などからなる台地に深井戸が地形平面上に N-S およびENE-WSW 方向にほぼ直線に分布しているようである。これらは主に大阪層群の帯水層より揚水される井戸であるが、地域西端部を南北に

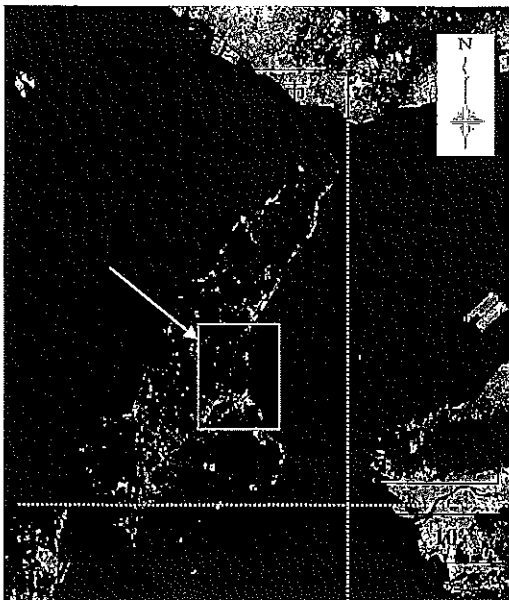


図-1 淡路島中部地域

延びる先山断層をはじめ、N-S 系および ENE-WSW 系の断層・撓曲構造に隣接していることが注目できる。一方、南域では断層付近に分布する深井戸はない。用途別に帯水層の地質が異なり、工業用・雑用水は沖積層、農業用・飲料用水は大阪層群、段丘堆積物から主に揚水されている。

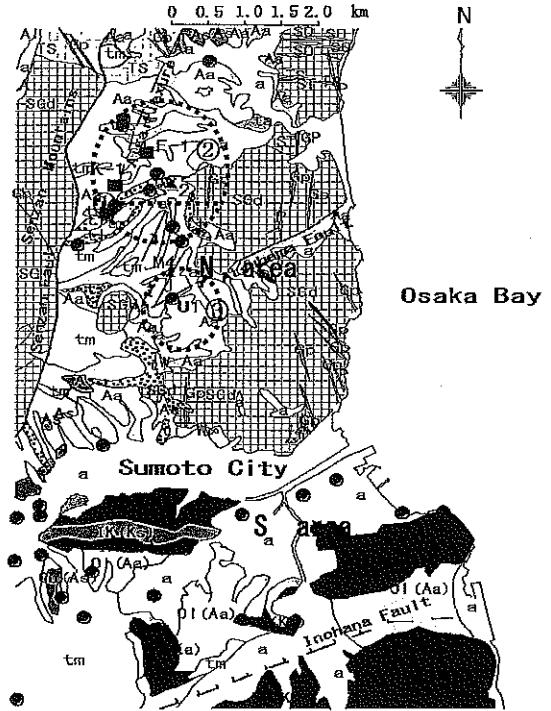


図-2 淡路島中部地域の地形地質⁴⁾に加筆と井戸位置

凡 例

- SGd・SG・Ts:白亜紀花崗岩類 SQ・Gp・P:貫入岩類
- IK(Ka)・IK(Ks):白亜紀和泉層群
- Ol・Aa・As・Ai:新第三紀大阪層群(粘土・砂)
- tm・tl:更新世段丘堆積物
- a:沖積層 / : Fault(断層) ㄥ: Flexure(撓曲)

- :新設井戸 F-1(2003年)および既設井戸 K-1(1966年)
- ▲:既設井戸 S-2(2001年)および新設井戸 M4(2003年)
- :既設井戸 29 箇所²⁾

- ①: A 地区 CSAMT 法探査位置
- ②、③: B、C 地区 CSAMT 法探査位置

図-3には淡路島の月別降雨量の平年値を示す。ここに年間総雨量⁵⁾は、淡路島全体が1,250mm、洲本市南部では1,462mmであり、北域では淡路島全体の降水量より少ないとされる約1,100mmを引用する⁶⁾。また図-3より5~7月と9月の多雨が涵養に寄与していることがわかる。地下水涵養量の概算については年間降雨量に基づいて後述するが、深井戸の揚水量と涵養量とが地域環境に悪影響が出ないように、この健全なサイクルが維持できる地下水管理を行うことが必要である。

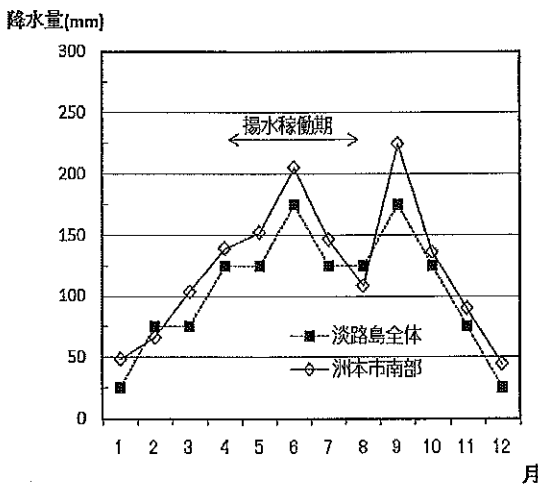


図-3 淡路島の月別降雨量の平年値

3. 地下水涵養量の試算

調査地北域で図-2②の範囲に示す涵養域は、花崗岩地帯の山地丘陵に囲まれた小盆地に水田を占める低地が主であり、この地形面を山麓下端と後述する探査により想定した基盤岩起伏の頂部境界より見積もると、隣接する井戸 F-1 および K-1 それぞれの涵養域は概ね以下のような面積で示される。

- ・ F-1 涵養域：約 933,000m²(=1,205m×775m)
- ・ K-1 涵養域：約 664,000m²(=960m×692m)
- 合計 1,597,000 m²

ここに、小河川、水路、道路などの面積を省いて、水田内での降雨流出量をほぼ 0 とみなす。以上より、灌漑期の減水深からの浸透量と

黒田(2007)⁷⁾の涵養量試算に基づいて、次のような考察を行った。

減水深は一般値が 20~25mm/day⁸⁾で示され、灌漑期(約 4 カ月間)における減水深の浸透量 20 mm/day が地下水涵養量となる仮定すると、 $0.02\text{m/day} \times 120\text{day} \times 1,579,000\text{m}^2 = 3,789,600\text{m}^3$ の水量が減水深からの地下水涵養量と考える。

また、年間の総雨量は先に示した 1,100mm として、蒸発散量は石井・梨本・下垣 (2002)による全国各地での報告⁹⁾を参照して、約 700mm を差し引いて地下水涵養量を試算する。

よって、 $(1.1-0.7)\text{m} \times 1,579,000\text{m}^2 = 631,600\text{m}^3$ が年間の降雨による地下水涵養量と考える。

これより、合わせて 4,421,200m³が年間の総地下水涵養量と考える。

一方、農業用水利用として深井戸を稼働させる期間を 4 カ月(30day×4=120day)とすると、年間の水収支バランスが成り立つときの許容揚水量としては $4,421,200\text{m}^3 \div 120\text{day} \approx 36,800\text{m}^3/\text{day}$ となる。

したがって、北域②の複数井戸での総揚水量が地下水涵養量を越えないよう、約 36,800 m³/day 以下となるように各井戸の適正な揚水量を検討しなければならないと考える。

4. CSAMT 探査結果

北域の農業用水不足の対策として新設する井戸の位置を選定するため、以下の A~C 地区で合計 30 測点の CSAMT 探査を行った。

なお、各測点において周波数 2.5~5,120Hz で測定した見掛け比抵抗を菱田、高杉ら(1998)¹⁰⁾に従い、異なる層数の水平多層構造解析結果を深度毎に統計処理して解析比抵抗曲線を求めた¹¹⁾。

A 地区：先山断層付近の西麓より既設井戸 K-1 付近を通る東西方向に 1.5km の測線 (全 12 測点)

B 地区：K-1 および新設井戸となった F-1 周辺(全 7 測点)

C 地区：B 地区より約 1.5km 南で新設井戸 M-4 周辺(全 11 測点)

A 地区は洲本花崗岩類 SG および SGd の分布する測線西端の先山丘陵と東端の丘陵の間に洪積台地があり、図-4(a)に示すように既設井戸 K-1、

S-1 および S-2 はこの洪積台地下の大阪層群帯水層から揚水している。これらの地質情報を CSAMT 法探査結果から得られる比抵抗断面と対比させて、図-4(b)に示す比抵抗分布を解釈した断面を作成した。この解釈断面から、地下水盆は測線両端の花崗岩類の上昇地塊に挟まれた沈降部に位置し、地下水盆下部は断層や破碎帯によって基盤岩は激しく起伏していると想定される。

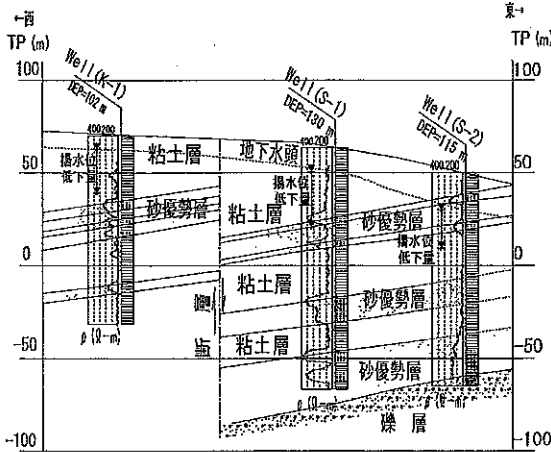


図-4(a) A地区井戸ボーリングによる地質断面図

そこで、各測点の解析比抵抗曲線の深部において比抵抗が上昇に転じる比抵抗変曲点を基盤岩上面とみなし、平面図の各測点位置に基盤岩上面の標高をプロットして等高線を描いた基盤岩上面等高線を図-5に示した。

B地区の既設井戸K-1、未使用井戸WdおよびF-1を結ぶNE-SW断面の比抵抗分布解釈図を図-6(a)に示す。この基盤岩上面等高線では既設井戸F-3やS-1も基盤岩凹部に位置しているので、当地区では基盤岩凸部に井戸を計画すべきでないと考えられる。また、K-1とF-1は基盤岩凸部で分断されて互いに揚水による干渉を受けにくいと考えられた。

図-6(b)に示すWNW-ESE断面では、既設井戸F-3の東南東約500mにNE-SW方向に延びる安乎撓曲の延長と考えられる比抵抗分布の不連続が認められ、当地区の井戸は断層や撓曲に関連する裂力に関係していることを示唆している。

C区の既設井戸U1では、図-7(a)、(b)より基盤岩基盤岩凹部で、ENE-WSW系厚浜断層延長上の撓

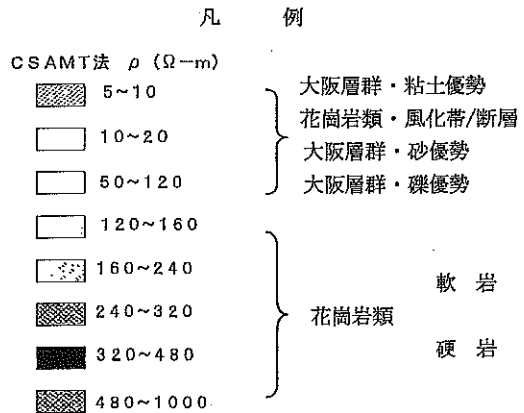
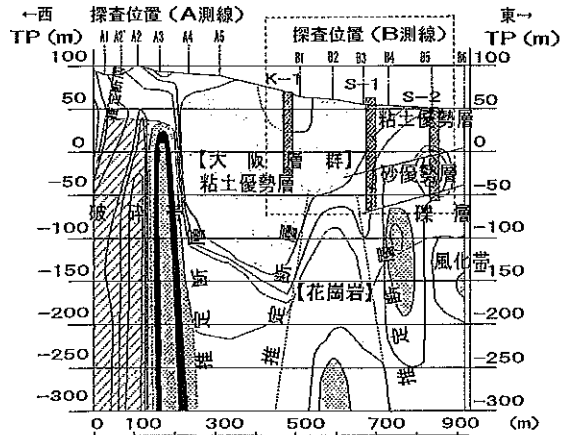


図-4(b) A地区電磁探査による比抵抗断面図

撓曲構造付近に位置するという上述した揚水原位置として相応しい条件を満たし、井戸長170mからの設計揚水量2,300m³/dayの豊富な揚水量が得られている。したがって、C地区は帯水層が厚く、新設井戸の選定には比較的有利な地域にあると考えた。当初、図-7(a)のM1~M5およびM5'の6測点でCSAMT法の探査を行った。その結果、U1の北東約500mの測点M5が基盤岩凹部と想定し、井戸長120mの新設井戸を掘削した。施工直後は計画揚水量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顕著となり、揚水量は170m³/dayまで下がった。そこで計画揚水量を満たす新たな井戸位置を選定するために探査範囲を南方に広げてN1~N4およびU1の5測点の追加調査を実施した。その結果ではU1から北に向かっては基盤岩が浅くなる傾向があり、十分な基盤岩深度のあ

S-1 および S-2 はこの洪積台地下の大阪層群帯水層から揚水している。これらの地質情報を CSAMT 法探査結果から得られる比抵抗断面と対比させて、図-4(b)に示す比抵抗分布を解釈した断面を作成した。この解釈断面から、地下水盆は測線両端の花崗岩類の上昇地塊に挟まれた沈降部に位置し、地下水盆下部は断層や破碎帯によって基盤岩は激しく起伏していると想定される。

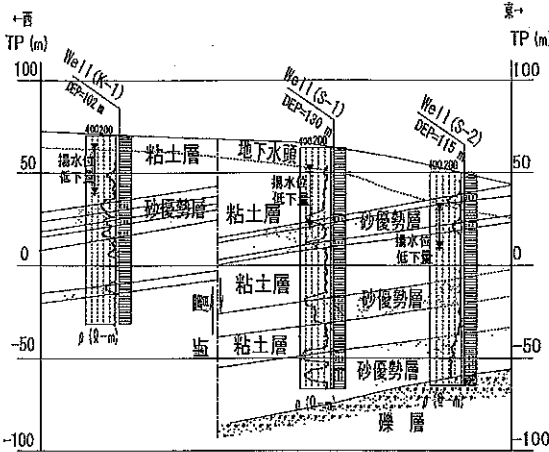


図-4(a) A地区井戸ボーリングによる地質断面図

そこで、各測点の解析比抵抗曲線の深部において比抵抗が上昇に転じる比抵抗変曲点を基盤岩上面とみなし、平面図の各測点位置に基盤岩上面の標高をプロットして等高線を描いた基盤岩上面等高線を図-5に示した。

B地区の既設井戸K-1、未使用井戸WdおよびF-1を結ぶNE-SW断面の比抵抗分布解釈図を図-6(a)に示す。この基盤岩上面等高線では既設井戸F-3やS-1も基盤岩凹部に位置しているので、当地区では基盤岩凸部に井戸を計画すべきでないと考えられる。また、K-1とF-1は基盤岩凸部で分断されて互いに揚水による干渉を受けにくいと考えられた。

図-6(b)に示すWNW-ESE断面では、既設井戸F-3の東南東約500mにNE-SW方向に延びる安平撓曲の延長と考えられる比抵抗分布の不連続が認められ、当地区の井戸は断層や撓曲に関連する裂力に関係していることを示唆している。

C区の既設井戸U1では、図-7(a)、(b)より基盤岩基盤岩凹部で、ENE-WSW系厚浜断層延長上の撓

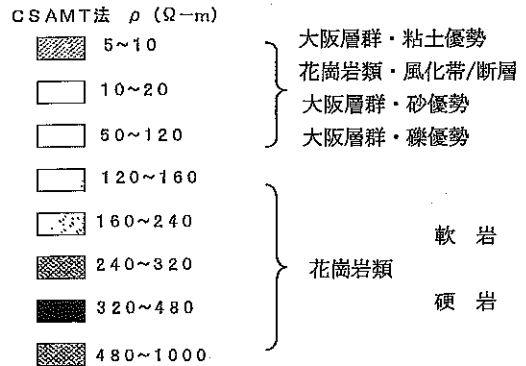
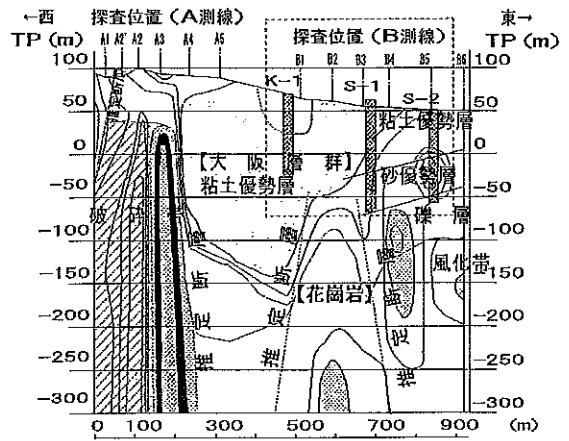
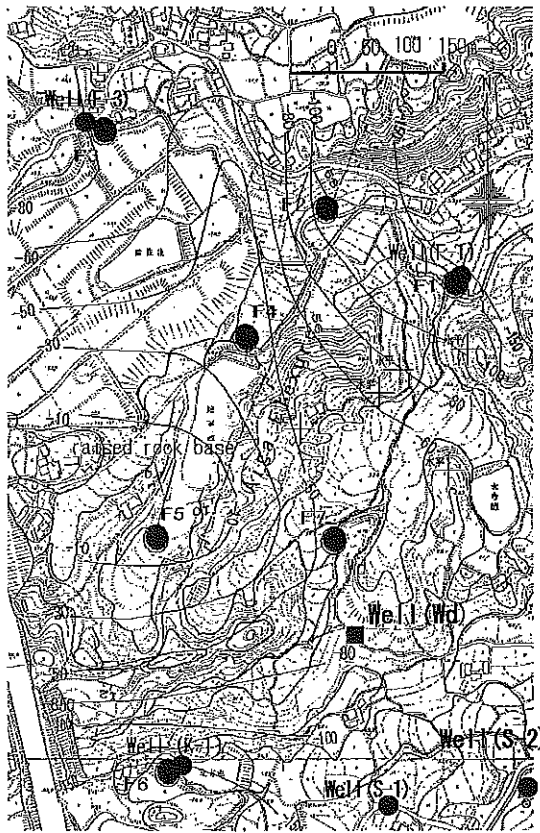


図-4(b) A地区電磁探査による比抵抗断面図

撓曲構造付近に位置するという上述した揚水原位置として相応しい条件を満たし、井戸長170mからの設計揚水量2,300m³/dayの豊富な揚水量が得られている。したがって、C地区は帯水層が厚く、新設井戸の選定には比較的に有利な地域にあると考えた。当初、図-7(a)のM1~M5およびM5'の6測点でCSAMT法の探査を行った。その結果、U1の北東約500mの測点M5が基盤岩凹部と想定し、井戸長120mの新設井戸を掘削した。施工直後は計画揚水量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顕著となり、揚水量は170m³/dayまで下がった。そこで計画揚水量を満たす新たな井戸位置を選定するために探査範囲を南方に広げてN1~N4およびU1の5測点の追加調査を実施した。その結果ではU1から北に向かっては基盤岩が浅くなる傾向があり、十分な基盤岩深度のあ



凡 例

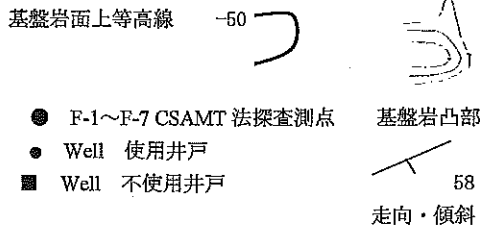


図-5 B地区の基盤岩上面等高線

るN1~ N4周辺ではU1と相互に井戸干渉を行う可能性があった。そこで複数の撓曲構造に挟まれ、図-7(b)に示すように深部の低比抵抗が基盤内の破碎帯を示唆するM4付近で井戸を施工したところ400m³/dayの計画揚水量を満たす成功井となった。

以上A~C地区においてCSAMT法の探查結果

を用いて新設した4本の井戸の諸元、地下水盆の形状、断層・破碎帯等の周辺の地質構造、計画揚水量を基準として選定評価などをまとめて表-2に示した。これより地下が花崗岩類などの基盤岩起伏の著しい地域の地下水盆では、揚水源としての地質条件は、①基盤岩凹部、②断層・撓曲構造に隣接する位置、③断層破碎帯に絞られる。

沖積低地が主体となる淡路島中部の南域の地下水盆は和泉層群の堆積岩類が基盤として、図-8に示すような地下構造と考えられる。当地域で実施した和泉層群の堆積岩類の比抵抗は、概ね200Ω-mで大阪層群の砂礫層との比抵抗と大きな差がなかった。本地区の基盤の形状を把握するためには、弾性波探査のような他の物性を用いる物理探査法との併用を検討しなければならない。

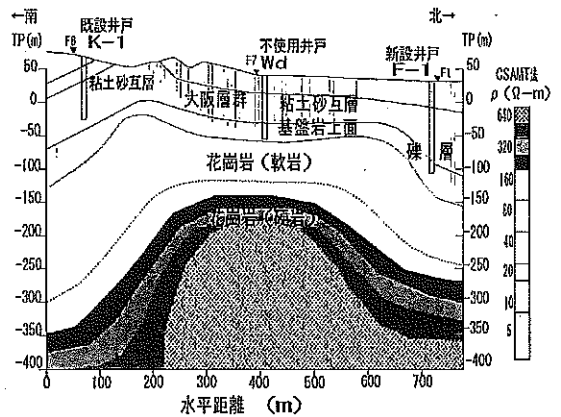


図-6(a) B地区 K-1~F-1の比抵抗断面図

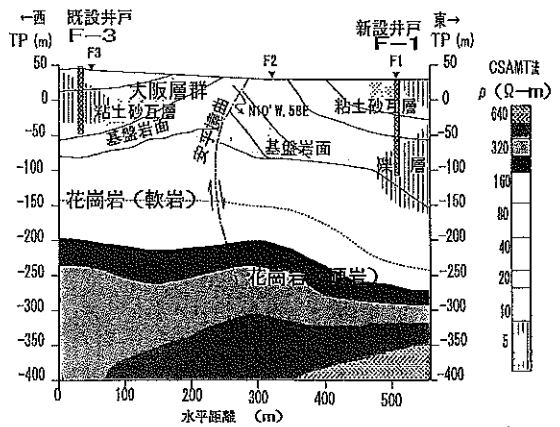


図-6(b) B地区 F-1~F-3の比抵抗断面図

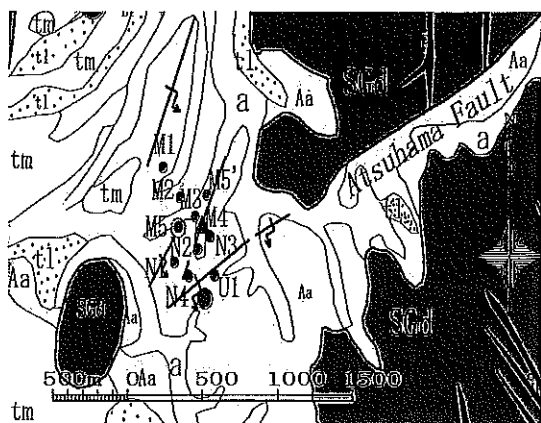


図-7(a) C地区の表層地質と測点
(図-2の凡例参照)

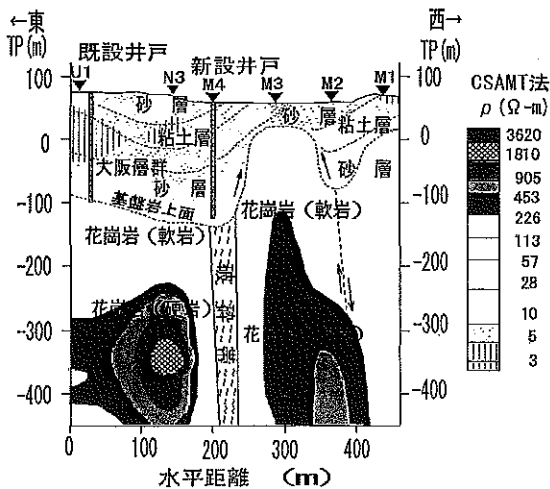


図-7(b) C地区 比抵抗断面図

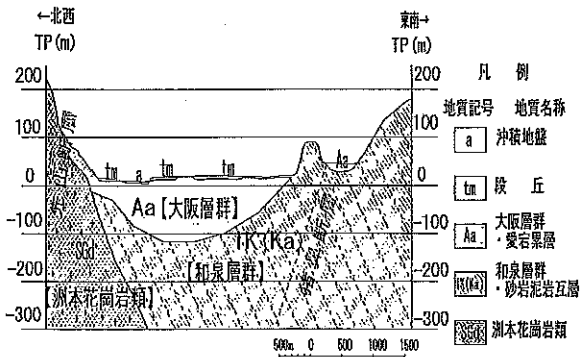


図-8 淡路島中部 S area 地質想定断面図

表-2 CSAMT 法を基に設置された井戸

井戸名称	F-1	S-2	M-4	M-5
施工年度	2003'	2001'	2003'	2003'
井戸長 L(m)	142	110	150	120
スクリーン長 h(m)	50	35	70	70
設計揚水量 Q(m ³ /day)	380	400	400	170
透水係数 k(cm/sec)	2.37 × 10 ⁻³	8.24 × 10 ⁻⁴	-	7.70 × 10 ⁻⁶
地下水盆地形状	凹部	凹部	破碎帯	凹部
断層等裂カ水の影 響	○	○	◎	×
井戸干渉の影響 (R;影響圏半径)	無 (R=325m)	K-1 地点 有 (R=175m)	U1 地点 とは別の 断層 (-)	無 (R=170)
井戸の選定評価	成功	成功	成功	失敗

5. 帯水層の水理特性

既存井戸台帳および新設井戸について、北域、南域それぞれの帯水層の層厚 d、透水係数 k と設計揚水量 Q との関係それぞれ図-9(a)および図-9(b)に示した。なお、帯水層の層厚は井戸のスクリーン長の合計とした。

図-9(a)より、帯水層厚 d と設計揚水量 Q の関係についてみると、洪積台地下の大坂層群より揚水される井戸では以下のような相関関係が得られ、南域の方が帯水層厚に対する揚水量の効率がやや勝る傾向にある。

- ・北域 Q=14.57d (最大揚水量 1,200m³/day)
- ・南域 Q=21.77d (最大揚水量 1,500 m³/day)

この傾向は北域の地下水盆地は比較した南域の洪積台地周辺の地下水盆地よりも表-1 から狭ことと調和的である。また、前述のように北域の井戸は断層や撓曲と関連する傾向が認められることから、これらの地質構造に伴う破碎帯からの局所的な涵養量が少ないことを示唆しているのかもしれない。

一方、南域の沖積低地の沖積層および深部の洪積層から揚水する井戸では、層厚が 30m 以下にも関わらず 1,000 m³/day を越える揚水量がある井戸

もあり、相関が認めにくかった。このような層厚に比べて揚水量の多い井戸では直接的な降雨や表流水からの涵養がある浅部の帯水層からも揚水していると考えられる。

図-9(b)によると洪積台地の帯水層の透水係数が主に細砂で構成される $10^{-4} \sim 10^{-3}$ の範囲で集中しているのに対し、沖積低地の井戸の透水係数は細砂から粗砂・砂礫の帯水層を示す $10^{-4} \sim 10^{-2}$ の範囲に広がっている。このことも沖積低地の井戸に層厚に比べて揚水量の多い井戸があることの一因と考えることができる。

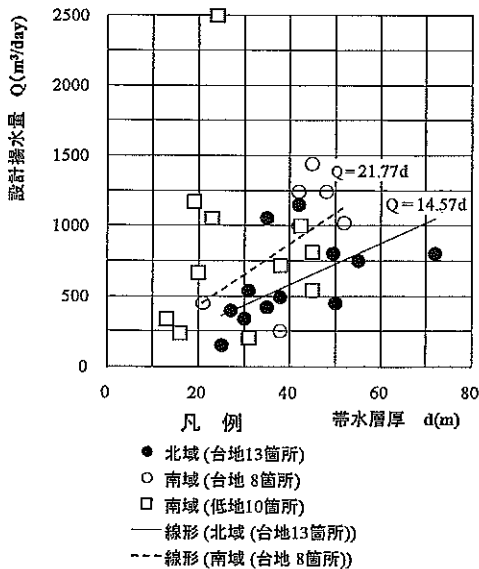


図-9(a) 帯水層厚dと揚水量Qとの関係

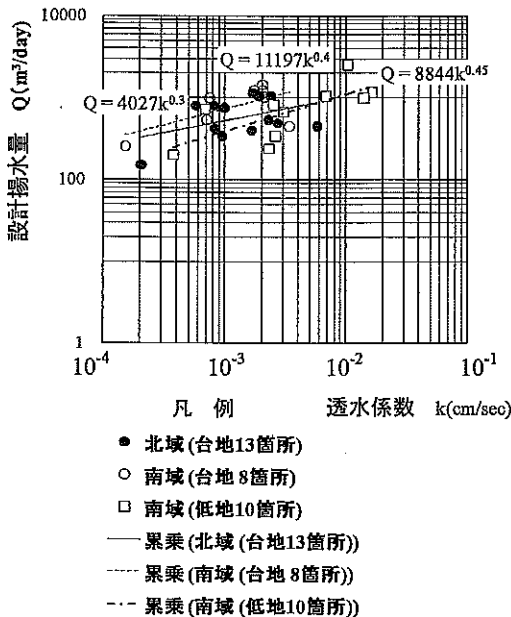


図-9(b) 透水係数kと揚水量Qとの関係

6. 揚水試験結果による設計揚水量の設定

北域のB地区で新設したF-1と37年前に施工されたK-1の2本の井戸について、揚水試験から設計揚水量を求める方法について検討した結果について述べる。

6.1 揚水試験を行った深井戸

検討を行った2本の井戸の構造と掘削時の電気検層結果を図-10(a),(b)に示す。

図-10(a)に示すF-1の電気検層では、帯水層となる粘土・砂互層や砂層の比抵抗 $50 \sim 110 \Omega \cdot m$ は不透水層となる粘土層の $10 \Omega \cdot m$ よりかなり高いので、比抵抗の違いから地質を区分することができた。図-10(b)に示すK-1の電気検層でも、帯水層となる砂層の比抵抗 $40 \sim 100 \Omega \cdot m$ は不透水層となる粘土優勢層の比抵抗は $20 \Omega \cdot m$ 前後である。また図-5に示したように、比抵抗変化点の平面的な深度分布から、北域における新設井戸の位置選定に用いる基盤岩の起伏を推定することができる。

両井戸のスクリーン位置を図-10(a)および図-10(b)に丸数字で示す。両井戸とも複数の帯水層に不透水層が挟まる複数スクリーンである。F-1は最深部の帯水層を貫いて下部の不透水層まで達する完全貫入井であるのに対し、K-1は帯水層の中途までしか達していない不完全貫入井である。不完全貫入井の場合、帯水層の層厚が決められないが、本域ではCSAMT法の比抵抗変化点を使うことにより最深部の層厚を推定できると考える。また、新設井戸では必要な揚水量を確保するためには最深部の帯水層までの井戸長が望ましく、比抵抗変化点の深度を目安とした完全貫入井となるように井戸長を決めることが可能である。

6. 2 段階揚水試験による設計揚水量の検討と井戸効率の算定

一般に連続揚水試験の測定値から設計揚水量を決める際には、水平な帯水層を前提とした井戸理論に基づいて井戸関数、貯留係数および透水量係数を求めて利用する。

ところが、北域では記述のように基盤の起伏が複雑である上、帯水層となる大阪層群も傾いているため、通常の方法を適用することは実用的でない。そこで、著者が提案した井戸損失式¹²⁾を用いて段階揚水試験から設計揚水量を求めることを試みた。

この井戸損失式は、層流であることを前提とし、(1)式のように $Q(\text{m}^3/\text{day})$ と全井戸損失量の指標となる水位低下量 $S_w(\text{m})$ の関係を表したものである。

$$S_w = B_e Q + C_e Q^2 \quad (1)$$

ここに、 B_e : 線形井戸損失係数(day/m^2)、 C_e : 非線形井戸損失係数(day^2/m^5)である。すなわち、線形項は $B_e = \ln(R/r_w)/2\pi\mu kh$ の式で、 R : 影響圏半径(m)、 r_w : 井戸半径(m)、 k : 透水量係数(m/day)、 h : 帯水層厚(m)、 μ : 透水量補正係数である。また、非線形項は $C_e = 0.2 \cdot B_e^2 / (\delta \cdot L)$ となる式で与えられ、 δ : スクリーン開口率、 L : スクリーン長(m)である。式(1)右辺の B_e は帯水層厚 h が自然地盤では一様でなく変化するため、定常説の透水量係数 kh には μ の補正が必要であると推察される。また、 C_e の式で右辺の 0.2 は、スクリーン開効率 20% を意味している。開口率 δ とスクリーン長 L は、井戸損失に及ぼす要因と考えられ、井戸損失は δ が大きいほど、 L が長いほど小さくなる。

なお、(1)式は R 一定で揚水量が漸増する過程において地下水面の動水勾配 i が次第に急となり、水位低下が生じると仮したものであり、(4)式に示す de Prony の式¹³⁾を引用した。

$$i = \left(\frac{A}{\omega}\right) (\alpha v + \beta v^2) \quad (2)$$

ここで、 i は水路または管底の傾斜角の正弦、 A は流れの断面積、 ω は潤辺長、 v は求める断面における平均流速、 α 、 β は定数である。(4)式より地層水の流れにおいて動水勾配 i は流速 v および v^2 の関数で表されることから、(3)式の第二項には v^2 に対応する Q^2 の関数を導入した。

なお、Thiem-Dupit の定常説は(4)式の第 1 項目の線形微分より求められたものである。

しかし、揚水量がある量を超えると乱流が発生して、この式は成立しなくなるので、乱流域の実測値が発生する直前で(1)式から得られる値が最大の設計揚水量、すなわち限界揚水量と考える。また、(1)式の水位低下量 S_w から初期水位を引いた値 ΔS_w と Q より比湧出量 $Q/\Delta S_w$ を求めて図-11 に示すと、実測値と(1)式に対応する非線形曲線の曲率より、限界揚水量 Q_c を求めることができる。

各井戸の Q_c は、非線形曲線の曲率を直線近似して、層流域側の直線①と乱流域側の直線②の交点として求めた。

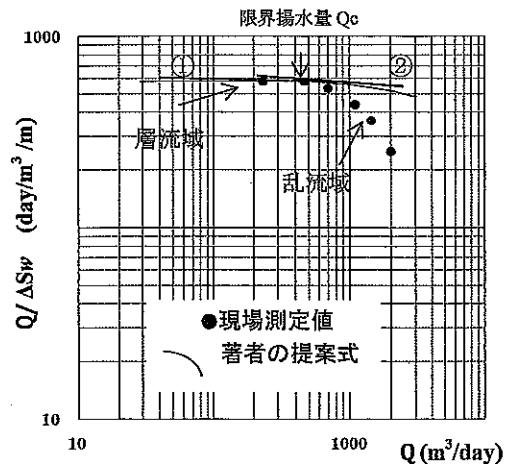


図-11 揚水試験事例と井戸損失式との関係 - 限界揚水量 Q_c の求め方 -

なお、図-11 の井戸損失を示す損失曲線は、透水量補正係数 μ によって曲線の上下移動は可能であるが、左右への移動はないため、乱流域の測定値のみでも限界揚水量 Q_c を求めることができる。つまり、当地域の揚水量は帯水層厚 h をスクリーン長の合計より求めても断層等からの裂カ水があるため、透水量係数 kh に μ を乗じて補正する必要があり、この損失曲線を上下に移動して層流域と乱流域の実測値を確認した。また影響圏半径 R は前述した基盤岩起伏頂点を境界として求めた。

表-3 の結果を Q と $Q/\Delta S_w$ の関係を表す両対数グラフにプロットし、井戸ごとにそれぞれ図-12、図-13 に示した。また、表-4 には井戸損失式の諸定数と設計揚水量を示した。

表-3 段階揚水試験結果一覧

井戸名	揚水量	揚水段階						
	水位低下量	1段階	2段階	3段階	4段階	5段階	6段階	7段階
F-1	Q(m ³ /day)	219	439	655	871	1,090	1,318	1,506
	ΔSw(m)	1.31	2.75	4.55	6.18	7.95	10.10	11.96
K-1	Q(m ³ /day)	219	432	651	804	864	—	—
	ΔSw(m)	1.70	3.70	7.41	12.21	14.30	—	—

表-4 井戸損失式の諸定数と設計揚水量

井戸名	透水係数 k (cm/sec)	帯水層厚 (=スクリーン長) L (m)	スクリーンの開口率 δ	透水量補正係数 μ	線形井戸損失係数 Be(day/m ²)	非線形井戸損失係数 Ce(day ² /m ⁵)	設計揚水量 Qc(m ³ /day)
F-1	2.37×10 ⁻³	55	0.25	2.15	5.80×10 ⁻³	5.39×10 ⁻⁷	380
K-1	1.71×10 ⁻³	49	0.04	4.00	5.20×10 ⁻³	3.22×10 ⁻⁶	353

ここで、各井戸における地下水盆での揚水量は、透水量補正係数 μ に支配される。つまり、不完全貫入井では井戸底より下に帯水層があるために μ は1より大きくなる。完全貫入井で μ が1より大きくなる場合には、帯水層へ外からの涵養があることを意味している。完全貫入井 F-1 の μ は2.15であり、安乎撓曲に近いのでこれらに関連する地下構造からの地下水供給があることを示唆している。不完全貫入井 K-1 の μ は4と大きく、F-1 同様に破砕帯から地下水供給がある可能性が高い。

実測値が井戸損失曲線と一致していない揚水量では乱流が生じて影響範囲外に広がり、他の井戸に干渉しかねない。そこで実測値が井戸損失曲線と一致する最大の揚水量を限界揚水量として設計揚水量とすればよい。ただし、地域によっては井戸ごとに設定した適正揚水量に安全率をかけるように規制している¹⁴⁾ので、規制に従って実施する設計揚水量を求めればよい。

既設井戸 K-1 で行った揚水試験から求めた限界揚水量 Qc は 353m³/day で、37年前の施工当時の設計揚水量 1,150m³/day と比べて減少している。図-13 上に破線で示した現在の井戸損失曲線を施工当時の設計揚水量に合うように縦軸方向に移動させることで、施工当時の井戸損失曲線を示すものとして実線で示した。破線の井戸損失曲線は実線の曲線に 0.8 を乗じて得られていることから、この係数を井戸効率 Ew として表すことにす

る。このように既設井戸の井戸効率を求めることで経年劣化状況を把握することが可能であると考える。

現時点において F-1 井戸の設計揚水量を 380 m³/day、K-1 井戸では 353 m³/day とすると、両域での総揚水量が 733 m³/day となる。この値では先に試算した両域の地下水涵養量約 36,800m³/day のわずか 2%にすぎず、また帯水層以外の外から裂カ水の供給量を考慮すると、これらの井戸では

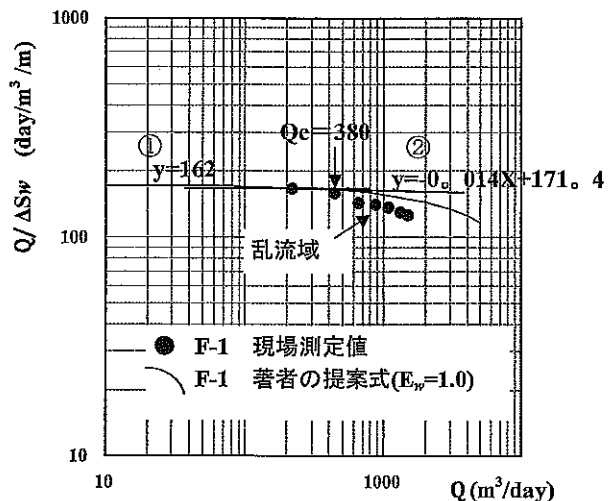


図-12 新設井戸 F-1 の段階揚水試験結果

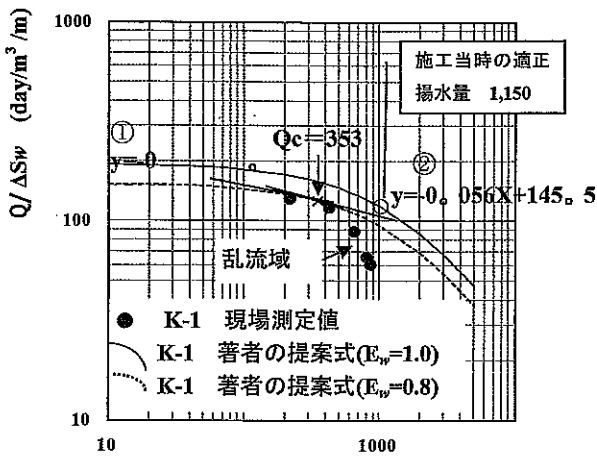


図-13 既設井戸 K-1 の段階揚水試験結果

十分許容範囲内の設計揚水量と考えることができる。

7. まとめ

本事例から得られた主な内容と知見を以下にまとめる。

(1)北域の揚水源は基盤岩凹部で断層・撓曲構造の近傍もしくは基盤内の破碎帯周辺に限定される。このような基盤の起伏や破碎帯の把握には、500m以上の探査深度を有するCSAMT法電磁探査が適している。

(2)南域は北域に比べて揚水量が確保しやすく、地形地質条件が有利と考えられる。ただし、基盤の堆積岩類の比抵抗が大阪層群の砂・礫の比抵抗と大きな差がないので、CSAMT法や高密度電気探査のような比抵抗を求める探査法に弾性波探査等の他の物性を利用する探査法の併用が望ましい。

(3)通常の井戸理論の適用が難しい北域において、提案した井戸損失式を使って設計揚水量を求めることができた。既設井戸において施工当時の井戸損失曲線と現在の井戸損失曲線を比較した井戸効率で経年劣化状況を把握することを提案した。

8. おわりに

新たな水源開発を行う際、既設井戸との相互干渉を避け、過剰揚水による水位低下や井戸性能の経

年劣化を防止し、地域の水環境を損なわない適正な揚水量の管理に十分な配慮が必要である。本報では、淡路島中部、特に北域において、豊富な揚水量が期待できる井戸の位置を選定し、施工された井戸の設計揚水量を求める手順を示した。今後は、北域の地下水供給源とも考えられる断層・撓曲のような線形要素も組み込んだ地域地下水モデルを構築し、井戸の運転状況などを利用した水収支による地下水シミュレーションを行うことで当地域の地下水モニタリングに活用したい。

謝 辞

本報告を作成するにあたり、貴重なご意見を賜りました元島根大学教授 黒田和男博士に心より厚く御礼申し上げます。

引用文献

- 1)経済企画庁総合開発局国土調査課(1964):全国地下水(深井戸)資料台帳,近畿編.
- 2)国土交通省(2003):全国地下水資料台帳.
- 3)志村馨著(1979):「該当する章の題目,電気探査法-近代的地下水調査の技術-」,昭晃堂発行, pp.141-179.
- 4)高橋 浩・寒川 旭・水野清秀・服部 仁(1992):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.
- 5)兵庫県(2008):洲本川水系河川整備計画(案),資料-4
- 6)伊藤休一・一ノ瀬友博(2007):淡路島中部における江戸時代後期から昭和期にかけての土地利用変化,日本都市計画学会,都市計画報告集, No.6, pp.5.
- 7)黒田和男(2007):地下水年表からみる関東平野北部の地下水現況(地盤沈下に関連して),地下水技術, Vol.49, No.10, pp.13-19.
- 8)山本荘毅責任編集:地下水学用語辞典,古今書院, pp.27.
- 9)石井孝・梨本真・下垣久(2002):森林からの蒸発散量を考慮した流出量算定手法の開発,電中研報告 U01050, pp.18.
- 10)菱田 元・高杉真司(1998):「第6章電気探査,CSAMT法」,物理探査学会,物理探査ハンドブック, pp.322-330, pp.334-349.
- 11)奥野日出・小山修平(2007):地下構造可視化技術を用いた深井戸計画成功例と失敗例,地盤の環境・計測に関するシンポジウム2007,地盤工学会関西支部, pp.82-87.
- 12)奥野日出・小山修平(2011):地域地下水管理に関する揚水モデルと井戸損失式の提案,地盤工学ジャーナル(論文), VOL.6, No.1, pp.27-37.
- 13)最上武雄著・赤井浩一著(1982):「土質力学」,技報堂出版, pp.199.
- 14)地下水地盤環境に関する研究協議会:地下水地盤環境に関するシンポジウム2008-地盤環境の保全-, pp.123.

