

## 深井戸の影響圏半径の求め方と流域特性

○奥野日出<sup>1</sup><sup>1</sup>アスカソイルコーナー

## 1. はじめに

本稿は、揚水井の影響圏半径  $R$  を定めて適正な設計揚水量を導く限界揚水量  $Q_c$  から揚水井への地下水供給が地形・地質、地質構造、湖水域境界などの条件に支配されていることについて述べる。

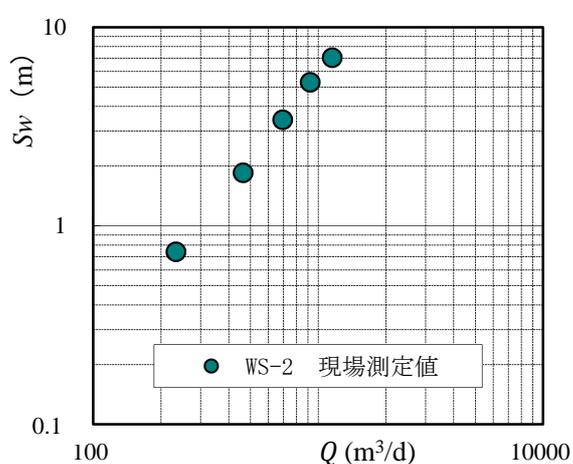
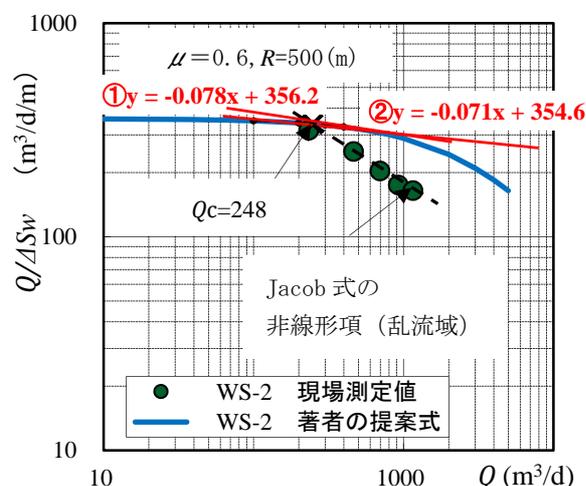
すなわち帯水層が均質・等方性かつ等厚で無限の広がりを持つ広域地下水流動を代表する Theis モデルのほかに揚水井からの帯水層の広がり、狭まりを示す透水量補正係数  $\mu$  に基づく帯水層モデルにより、揚水井の流域特性について述べる。

2. 影響圏半径  $R$  を求めるための限界揚水量  $Q_c$ 

揚水井からの影響圏半径  $R$  は、一般に多孔式揚水試験結果より観測孔の水位低下量  $s$  と対数距離  $\log(r)$  の関係より  $s=0$  軸との切片となる距離  $r$  から求められるが、ここでは揚水井の段階揚水試験値から非線形井戸損失式を求め、本式より限界揚水量  $Q_c$  に合致する  $R$  を定める<sup>1)</sup>。

一方、限界揚水量  $Q_c$  は、一般に段階揚水量  $Q$  と水位低下量  $s_w$  を両対数軸上にプロットして、層流域と乱流域を表わす2つの直線上の交点が  $Q_c$  とされるが、その交点が容易に求められる事例は、大半帯水層の涵養状態が良好で豊富な地下水賦存を有する広域地下水流動域にあると考えられる。

筆者が水源開発調査を始めた平成5年頃は、広域地下水流動域には既設井戸が散在し、しかも地下水規制で新規開発の候補地は選定できないため、既設井戸が殆どない小盆地や狭域地下水流動域に開発が求められた。その事例として図-1に滋賀県湖北平野の小河川沿いに作られた消雪用深井戸の段階揚水試験結果を示す。これはあたかも層流域の試験値のみが対数軸上にプロットされたように見られるが、図-2の段階揚水量  $Q$  と比湧出量  $Q/\Delta s_w$  の関係にしてみれば、2段階以降の試験値は全て乱流域にある。つまり、図-2の試験値は層流域ではX軸とほぼ平行にプロットされ、次第に低下していくのは乱流域にあるからである。ここに試験値が層流域から乱流域に至る遷移域での  $R$  を確定して、この非線形曲線の曲率（赤線の交点）で限界揚水量  $Q_c$  が求まる。

図-1 WS-2 段階揚水量  $Q$  と水位低下量  $s_w$  の関係図-2 WS-2 段階揚水量  $Q$  と比湧出量  $Q/\Delta s_w$  の関係

## 3. 帯水層モデルと非線形井戸損失式

次に帯水層モデルと非線形曲線の井戸損失式について述べる。

図-3に揚水井からの帯水層を3通りに分類したモデル図を示す。すなわち、 $\mu=1$ はスクリーンから帯水層厚が半無限に平行に続く Theis モデルで、 $\mu>1$ は帯水層厚が広がり、 $\mu<1$ では狭まる。これは降水、河川水が涵養される帯水層以外に断層からの地下水供給や湖水域があれば  $\mu>1$  となり、帯水層が途絶える狭域地下水流動域では  $\mu<1$  となる。

A method of the influential sphere radius by pumping groundwater in deep-well relation with the catchment area of the groundwater

1Hizuru Okuno(1Cot.Ltd.Asuka soil Corner)

**KEY WORDS:** deep-well , influential sphere radius, aquifer, limited pumping amount

ここに井戸損失式は、定常説より影響圏半径  $R$  を起点として揚水して行くと、揚水井の孔内水位は次第に低下していき、スクリーンに向かう水流は流速を高めてダルシー流から非ダルシー流へとなる。揚水試験結果においては層流域と乱流域が示されることになるが、一般に層流域から乱流に移行するときには、遷移域のあることがレイノルズ数より表され<sup>2)</sup>、非ダルシー流は、de Prony<sup>3)</sup>や Forchheimer<sup>4)</sup>ほかの多くの研究者により、式(1)に示される。

$$i=av+bv^2 \quad \dots \dots (1)$$

ここに、 $i$ ：動水勾配、 $v$ ：求める断面の平均流速、 $a, b$ ：非線形に係わる定数である。

式(1)より地層水の流れにおいて  $i$  は  $v$  及び  $v^2$  の関数で表されることから、これに対応する井戸損失式では層流域から遷移域までの流れを式(2)で与えられる。何故なら、乱流域では図-3において影響圏半径  $R' > R$  の領域となり、定常説が成立しないからである。

$$S_w=BeQ+CeQ^2 \quad \dots \dots (2)$$

ここに、線形項は  $Be=\ln(R/r_w)/2\pi\mu kh$  の式で、 $R$ ：影響圏半径(m)、 $r_w$ ：井戸半径(m)、 $k$ ：透水係数(m/day)、 $h$ ：帯水層厚(m)、 $\mu$ ：透水量補正係数である。また、非線形項は  $Ce=0.2 \cdot Be^2/(\delta \cdot L)$  となる式で与えられ、 $L$ ：スクリーン長(m)、 $\delta$ ：スクリーン開口率であり、0.2は開口率の基準値である。

繰り返して述べるが、限界揚水量  $Q_c$  は図-2に示した井戸損失式の曲線が揚水試験結果の層流域から遷移域付近を通る  $R$  と  $\mu$  を定めて求める。何故なら、 $R$  と  $\mu$  を変えれば、井戸損失式の曲線は両対数の Y 軸上を任意に上下するので、試験値に適合させる必要があるからである。

#### 4. 深井戸の流域特性

表-1には流域別に、 $\mu=1$ 、 $\mu>1$ 、 $\mu<1$ に分けられる揚水井とその施工付近の地形地質、地質構造、流域、水域境界などの特徴をまとめた。

表-1 流域別の深井戸諸元

深井戸の位置	流域と涵養の特徴	深井戸名称	帯水層の地質	透水量補正係数 $\mu$	井戸長 (m)	用途	限界揚水量 $Q_c$ (m <sup>3</sup> /d)	影響圏半径 $R$ (m)
滋賀県湖南平野 野洲川中流域	広域地下水流動 降水・河川水	W-A	洪積砂・礫質土層 (粘土層挟む)	1	100	飲料	700	500~1000
		W-B		1			600	
滋賀県湖北平野 大川下流	湖岸に隣接 降水・小河川水	WS-1	洪積礫質土層 (粘土層挟む)	1.6	76	農業 ・消雪	1,545	500
	狭域地下水流動 降水・小河川水	WS-2		0.6	55		248	
兵庫県淡路島中部 洪積台地	1km <sup>2</sup> の小盆地 降水・断層劣化	F-1	大阪層群最下部 砂・粘土互層/断層	2.15	142	農業	380	300
埼玉県ふじみ野市 武蔵野台地	狭域地下水流動 降水・小河川水	SK-1	武蔵野礫層	0.9	35	非常用	25	500

##### 4.1. 広域地下水流動域の深井戸（帯水層 $\mu=1$ ）

This モデルは欧米の広大な低地や台地に代表され、国内では関東平野や濃尾平野をはじめとする広域地下水流動域に相当すると考えられる。ここでは、滋賀県湖南平野の野洲川流域(延長約 65km、流域 387km<sup>2</sup>)で、複数の農工業・飲料用の深井戸の内、中流域の飲料用井戸について流域特性を検討した。

深井戸は野洲川本流右岸より北東に 500m ほど離れた水田低地に設けられ、地質構成は図-4に示される。図-4より、帯水層の大半は砂礫砂層からなり一部に粘土薄層が挟まる井底は W-A,W-B 共に帯水砂礫、砂層直下の第 2 粘土層にある。このように帯水層の均質性はないが、平均透水係数を用いて W-A の段階揚水試験結果を図-5に段階揚水量  $Q$  と比湧出量  $Q/\Delta S_w$  の関係にして示すと、帯水層が平行とみなしての井戸損失式が導かれる。ここに限界揚水量  $Q_c$  は図-5の井戸損失式の曲率より  $Q_c=700$ (m<sup>3</sup>/d)となり、また曲線の実線( $R=500$ m)と破線( $R=1000$ m)が示されるように、 $\mu=1$ なる影響圏半径 500~1000m においては  $Q_c$  に及ぼす差がほとんどないことが分かる。また W-B も同様な結果となった。

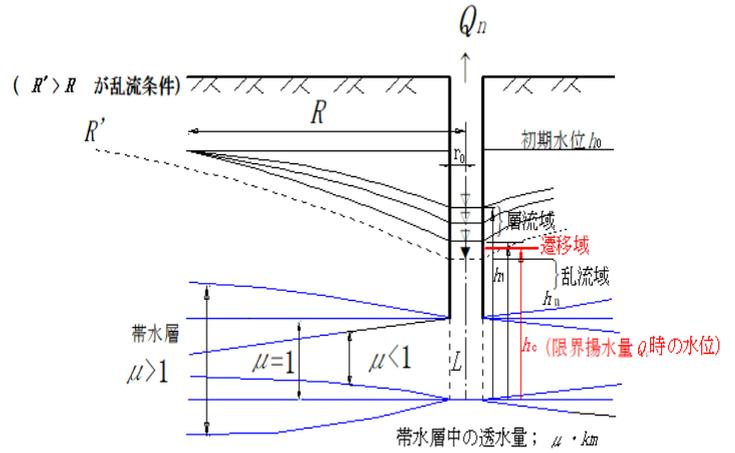


図-3 定常説の帯水層モデル<sup>1)</sup>

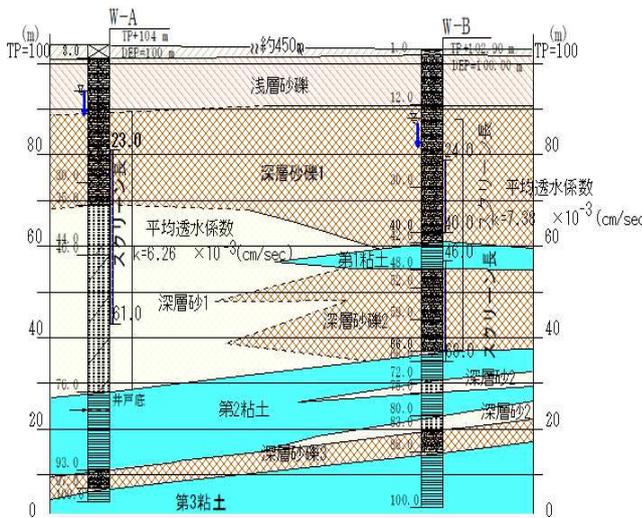


図-4 野洲川中流域の地質断面

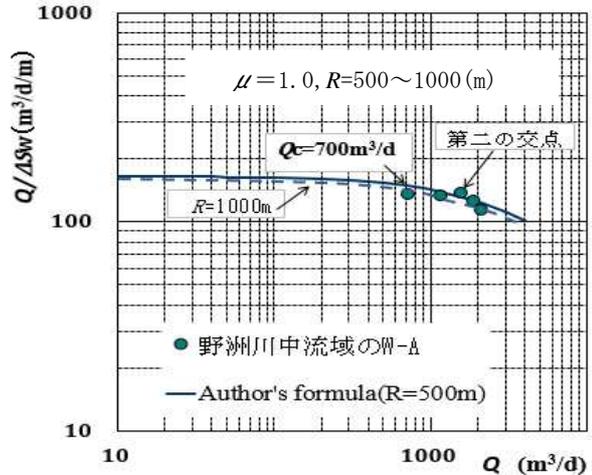
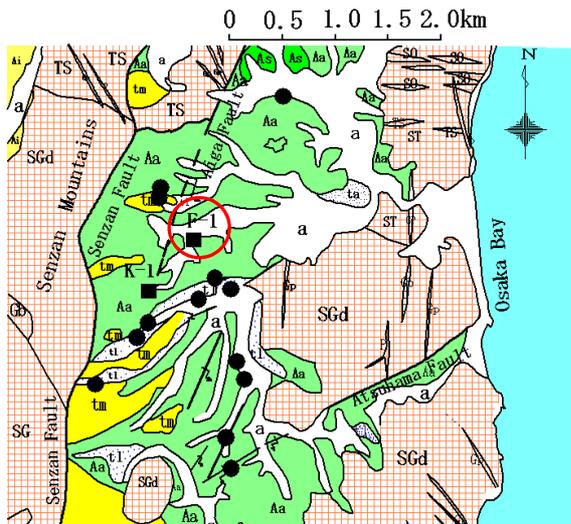


図-5 W-A 段階揚水量  $Q$  と比湧出量  $Q/\Delta S_w$  の関係

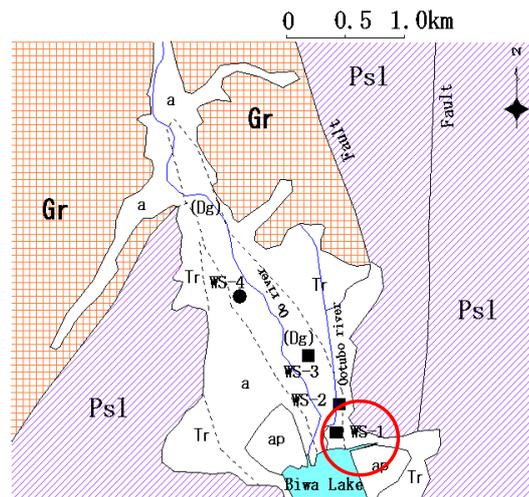
#### 4.2. 帯水層に地下水供給のある深井戸 (帯水層 $\mu > 1$ )

帯水層に降水、河川水の涵養以外に断層からの劣カ水や湖水域からの地下水供給があると考えられる深井戸事例 F-1 と WS-1 をそれぞれ図-6、図-7 にその位置を示す。



凡例 ■ 試験井戸(2003) ● 旧井戸  
 // Fault (断層) / Flexure(撓曲)

図-6 兵庫県淡路島中部洪積台地下の井戸分布<sup>3)</sup>



凡例 ■ 新設井戸(1999) ● 旧井戸(1975)  
 // Fault(断層)

図-7 滋賀県湖北平野下の井戸分布<sup>3)</sup>

淡路島中部では F-1, K-1 近傍で電磁探査を行い、比抵抗分布より基盤岩深度や砂粘土互層、断層位置を想定した。

図-6 の地質調査所研究報告 (1992) の図福からは、東西花崗岩 (SGd) の上昇地塊に挟まれた大阪層群最下部の洪積台地が地下水盆地で、深井戸 F-1 直近に安乎断層が北北東-南南西に分布することが分かる。

深井戸 WS-1 は湖岸より北方 300m 付近あり、主に中古生層山地 (Ps1) に囲まれた低地が地下水盆地である。この低地は先に述べた湖南平野の野洲川流域と比べて涵養面積が小さな狭域地下水流動域(延長約 2km, 流域 2km<sup>2</sup> 以下)で、ここでは予め調査ボーリングと垂直電気探査で帯水層の地質構成を把握した。

F-1 及び WS-1 の段階揚水試験値の直近を通る井戸損失曲線は共に  $\mu > 1$  を設定して、それぞれ図-8、図-9 に示す。ここに、 $\mu=1$  あるいは  $\mu < 1$  ならば、曲線は試験値から大きく離れる。

このように揚水井に断層からの劣カ水や湖水域からの地下水供給があれば、帯水層に広がりのあるモデルとして  $\mu > 1$  なる入力値で試験値に整合する井戸損失式の曲線が描ける。

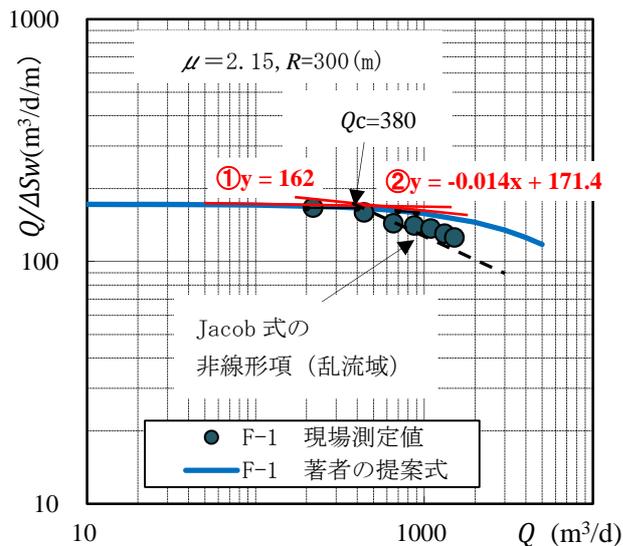


図-8 F-1 段階揚水量  $Q$  と比湧出量  $Q/\Delta S_w$  の関係<sup>3)</sup>

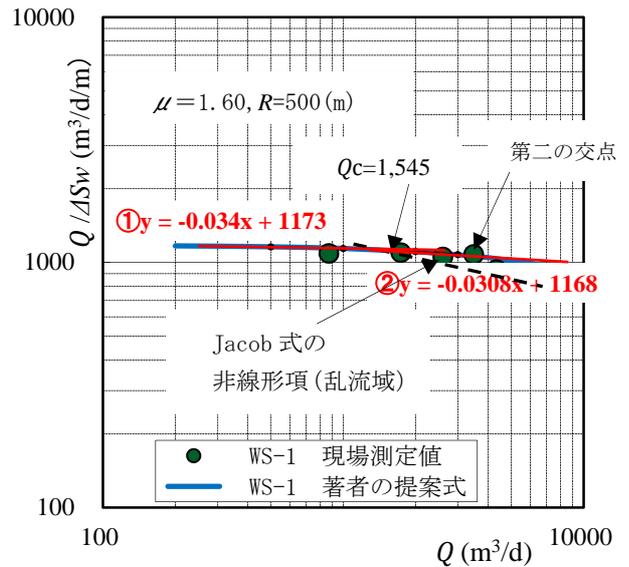


図-9 WS-1 段階揚水量  $Q$  と比湧出量  $Q/\Delta S_w$  の関係<sup>3)</sup>

#### 4.3. 狭域地下水流動域の深井戸（帯水層 $\mu < 1$ ）

広域地下水流動域と比べると涵養面積が乏しい小平野や台地においては、図-1, 2 に示した湖北平野大川中流域の消雪用井戸や、東京都周辺の学校、地区公園などに防災時の非常用井戸として設置されるようになった<sup>5)</sup>。東京都の事例として地下水規制から外れる主な地域<sup>6)</sup>は、図-10 の水位標高+0~+10mの東京都と多摩地域以外の武蔵野台地で近年非常用井戸の設置が進んでいる。台地には埋没礫層が分布するが地下水涵養の流域は局所的と思われる、 $\mu < 1$  の帯水層はせん滅する。ここでは取水量が少なく(概ね  $50\text{m}^3/\text{d}$  以下)、家庭用水中ポンプや手汲み式ポンプにより小規模ながら生活用水や緊急時の用水に備えている。このような防災時や親水に備える目的での井戸は全国の狭域地下水流動域で進められているが、揚水試験時には  $\mu$  と  $R$  の設定で過剰揚水を防ぐ限界揚水量  $Q_c$  を求めておく必要がある。

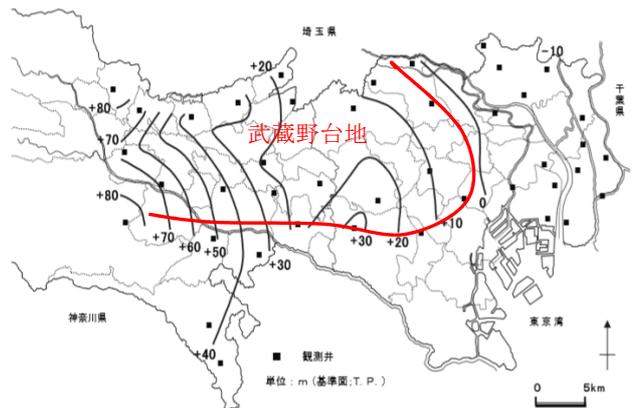


図-10 東京都平成 27 年末の地下水位等高線図に加筆

#### 5. おわりに

定常説による深井戸の揚水過程では、影響圏半径  $R$  を起点として孔内では次第に流速を高めて、地下水流は層流域から乱流域となり、ダルシー流から非ダルシー流になる。ここに揚水試験値に整合する井戸損失の曲線は、層流域から乱流域までの遷移域で表され、遷移域のはじまりで限界揚水量  $Q_c$  が求まる。 $Q_c$  に適合する  $R$  は流域特性により帯水層モデルの  $\mu$  により分類できる。

#### 参考文献

- 1) 奥野日出・黒田和男：定常説による揚水井の影響圏半径の一算定法，第 51 回地盤工学研究発表会岡山大会，No. 0517，E017，pp. 313-314，2016.
- 2) 上山 篤史：層流と乱流，<http://www.cradle.co.jp/tec/column06/019.html>
- 3) 奥野日出・小山修平：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. 27-37，2011.
- 4) 吉岡真由美・登坂博行：高透水性多孔質媒体中の非ダルシー流れに関する考察，地下水学会誌 第 52 巻第 3 号，pp. 275-284，2010.
- 5) 黒田和男・村山弘樹・奥野日出：都市防災非常用井戸の調査・施工事例，地下水地盤環境・防災計測に関するシンポジウム(論文)，P41~46，2015.
- 6) 東京都環境局：平成 27 年都内の地下水揚水の実態(地下水揚水量調査報告書)，pp16，2017.