段階揚水における揚水状況の転移を表わす図形について

— 1 —

酒 井 軍治郎

The Transition Form of Step-drawdown-test Curve

Gunjiro SAKAI

Abstract

The data curve of step-drawdown test on the logarithmic scale shows a characteristic form according to the aquifer concerned. The curve bends generally at a certain point and is divided into two segments of different gradient. The point is called by the term of transition point and the form of curve of transition form respectively. The transition form may be due to the hydrogeological characters of aquifer and its confining beds. The writer classified the type of form and considered the cause of transition and the meaning of form on a few assumptions.

1. 揚水状況の転移

井戸の段階揚水テストによって得た水位降下量 s_w と揚水量 Q の資料を用い、両対数方眼紙上に図—1のような相関曲線を描くと、多くの場合、殆んどすべての示点が直線上に乗り、しかもこの直線は、ある特定の座標点(s_{wt} および Q_t)において折れ曲がる。この折点を転移点、該当する揚水量を転移揚水量(一般には適正揚水量または限界揚水量という)^(注1)と名づける。図—1に明らかなように、 s_w と Q との相関は直線形となり、これらの直線は Q_t を境にしてその勾配を変えるが、この関係は、相関図の縦軸に s_w/Q をとっても変えることがなく、等しい Q_t に転移点を生ずる。このような転移点が何故発生するかについては、従来いくつかの説はあるが、十分に説明をつくしていないし、とくに転移の形式ということには全く触れていない。筆者はここに着目して、まず転移の形式を吟味し、転移発生の原因を検討することを本研究の目標とした。段階揚水テストではときに $s_w \sim Q$ 曲線上に2つ以上の転移点があられることもあるし、全くあられないこともある。しかし本研究では差向き転移点の数を問題外におくことにしている。転移点があられなければならないもちろん問題外になる。段階揚水テストは揚

図—1 $s_w \sim Q$ および $s_w/Q \sim Q$ 曲線

(昭和50年11月14日受理)

水量を次第に増やす方向で行なう場合と減らす方向で行なう場合とがあるが、両者を連続して行なうとしばしば $s_w \sim Q$ 曲線がヒステリシス曲線を描き出すことがある。これは収水層の弾性に基因する現象であるが、このことも本研究とは別の問題である。

$s_w \sim Q$ 曲線を描いて図式的にいわゆる適正揚水量を求める方法を提起した村下敏夫²⁾は、収水層の物理的性質が揚水によって変化するために転移が発生すると考えた。収水層の物理的性質、例えば透水度係数についてみると、長期に亘る揚水の継続によって変化することはあっても、一連の段階揚水テストにおいて、転移点の前後で変えることはない。村下はまた、揚水量が源水の補給量を上廻っている過剰揚水になると、揚水量の一部が収水層中の貯溜を消耗することになって転移が発生するともいっている。しかし実際には後に述べるように、揚水量がある量に達すると、別の地下水層からの漏水が起り、揚水状況がむしろ好転する場合にも転移が発生するのである。

蔵田延男³⁾は収水層に固有なレーノールズ・ナンバーを根拠に、揚水による井戸周辺における地下水の流動が層流の状態から乱流の状態に転化するために転移が発生すると考えた。しかし後に例示するように、揚水井から数mも隔った位置にある水位観測井においても、揚水井と等しい転移揚水量で揚水状況の転移が発生することがあるのである。

山本莊毅⁴⁾は上記の蔵田の考え方を批判し、井戸損失を表わす Rorabaugh の一般式を引用して転移図形の一端にも触れた。彼はとくに転移発生の原因については述べていないが、井戸損失のない水位観測井においても揚水状況の転移が見られることから考えれば、Rorabaugh の式を基調として転移に関する議論の展開はできない。それに、Rorabaugh の式からは図—1のような相関曲線の作図もできないのである。

図—2はある海岸平野で筆者が行なった段階揚水テストの結果を、 $s_w \sim Q$ 曲線および $s \sim Q$ 曲線として示したものである。とくに $s \sim Q$ 曲線というものを区別していったのは、図上の No.1 は揚水井であるが、No.2 および No.3 は揚水井からそれぞれ 3.1m および 6.5m 隔たった位置にある水位観測井だからである。同図で注目されるのは、水位観測井にも転移の状況が見られることと、転移揚水量が揚水井のそれと等しいことである。なお水位観測井に関する s と Q との相関直線は互いに平行しているが、井戸損失のある揚水井に関する s_w と Q とのそれは、井戸損失に相当する水頭だけ勾配が強くなっている。このことは、井戸損失は転移の発生には関係ないが、転移の状況に影響することを意味しているのである。

以上によってわかるように、転移の発生原因についてはまだ説明がついていない。そしてこれを解明するためには、転移状況の種々の型を分類し、実例に徴し

図—2 水位観測井における転移

(注1) 適正揚水量という語は、地域の水収支を検討した結果はじめて明らかにされる適正な揚水可能量であるかのように誤解され易いので、転移点に出る揚水量という意味で、転移揚水量と呼ぶことにした。限界揚水量という語は、実用上井戸損失を生じない揚水量の限界に対して Rorabaugh¹⁾が与えた呼称であって、たまたま転移揚水量が限界揚水量と一致する場合もあるが、一致しない方がむしろ多い。

てそれが収水層のどんな水文地質構造に関係するかを検討する必要がある。本研究はまだその結論に達してはなないが、後に次第に明らかになるように、転移の発生は概括的にいえば、揚水の源水の涵養または補給の機構、したがってまた収水層の水文地質構造と深い関係をもつもののように考えられる。

2. 転移状況を表わす基本式

転移状況の水理論的な検討を試みるために、便宜上次の Brinkhaus⁵⁾ の水理式を足掛りにして考える。

$$s = KQ^n \dots\dots\dots (1)$$

式中の s は、平衡状態で水量 Q を揚水している井戸からある距離に設けられた水位観測井における水位降下量である。 n はある定数で、Brinkhaus はとくにその説明をしていないが、筆者は差向き、“収水層の水文地質並びにその構造に関する一種の定数で、揚水の源水が涵養または補給される状況の変化に伴って変る”ものと考えことにする。 K は Brinkhaus によれば次の内容をもつ。

$$K = k \frac{1}{(2\pi m)^n r^{n-1}} \dots\dots\dots (2)$$

式中の k は収水層の透水性に関する定数、 m は収水層の層厚、 r は揚水井から水位観測井までの距離である。 n については既に述べた。図—2 からも明らかなように、 s が r によって変ることは確かであるが、後に述べるように、 r が (2) 式のような形で K に関係しているとは考えられない。ここでは揚水井における転移状況を中心に考えるので、 r の代りに井戸の半径 r_w が関係してくるが、 r_w は r に対してきわめて小さく、実用上はある定数的なものと思倣し得るので、 K を K_w に変え、Brinkhaus の考え方には関係なく、 K_w を“収水層の流通性に関する一種の定数で、 n の変化に伴って変る”ものと考えておく^{注2)}。したがって、揚水井における水位降下量を s_w で表わし、揚水による井戸損失および井戸周辺の地下水流動が層流から乱流に変わるために生ずる水頭損失を無視すれば、(1)式は次式のようになる。

$$s_w = K_w Q^n \dots\dots\dots (3)$$

この(3)式の対数形をつくと次式ができる。

$$\log s_w = \log K_w + n \log Q \dots\dots\dots (4)$$

この式は図—1 の $s_w \sim Q$ 曲線に相当するもので、相関直線の勾配は n である。揚水量が転移点を越えると、 n は n' に変わり、 K_w も K'_w に変るので、(4)式は次のようになる。

$$\log s_w = \log K'_w + n' \log Q \dots\dots\dots (5)$$

図—1 の $s_w/Q \sim Q$ 曲線に相当する形も、(3)式から導かれる次式によって表わされる。この場合の相関直線の勾配は、転移点の前後においてそれぞれ $(n-1)$ および $(n'-1)$ である。

$$\log \frac{s_w}{Q} = \log K_w + (n-1) \log Q \dots\dots\dots (6)$$

$$\log \frac{s_w}{Q} = \log K'_w + (n'-1) \log Q \dots\dots\dots (7)$$

(4)ないし(7)の4つの式から、同一図面上に $s_w \sim Q$ および $s_w/Q \sim Q$ の2つの相関曲線を描くと、転移点以下の揚水量については、勾配 n および $(n-1)$ の直線が $Q=1$ の位置で交わり、 $s_w = K_w$ とな

(注2) 筆者は井戸損失を求める図式解法を提案するに当り⁶⁾、 K_w を井戸損失にかかわる係数と類似な性格をもつ定数としたことがある。

る。また、転移点以上の揚水量については、勾配 n' および $(n'-1)$ の直線も $Q=1$ の位置で交わる。そしてその座標は $s_w/Q=K'_w$ (したがって $s_w=K'_w$) である。この関係は、後にわかるように、転移状況の図式解析上きわめて大切なことである。

$s_w \sim Q$ 曲線および $s_w/Q \sim Q$ 曲線はそれぞれ、勾配 n および n' または $(n-1)$ および $(n'-1)$ の2つの部分(以下 n 線分, $(n'-1)$ 線分などと呼ぶ)から成り立っており、各線分の勾配が小さいほど、揚水量が増加する割合には水位降下量の増加が少ないことになる。換言すれば、各線の勾配が小さいほど、井戸の湧出能力、しながってまた収水層の帯水性が優れていることを示すのである。ささに(3)式中の n を、収水層に対して揚水の源水が補給または涵養される状況の変化によって変る定数だとしたが、さらにそれが収水層の帯水性にも関係するものと考えなければならない。(3)式から明らかなように、等しい量の揚水に対し、 n が小さいほど水位降下量 s_w も小さくてすむのである。なお、多少の例外もあるが、現実には帯水性の優劣は透水度の大小に対比されるものであるから、 n が小さいほど、収水層の透水度が大きいことになる。この点で蔵田延男の意見が逆であるのは理解できない。後に彼の意見を引用するので、とくにこのことを述べておく。

最後になったが、 K に関する Brinkhaus の考え方を否定した理由を述べておく。 K_w についても(2)式のような関係が成り立つとすれば次の式ができる。

$$K_w = k \frac{1}{(2\pi m)^n r_w^{n-1}} \dots \dots \dots (8)$$

(1)ないし(3)の3式とこの式とから次式が導かれる。

$$s_w = s \left(\frac{r}{r_w} \right)^{n-1} \dots \dots \dots (9)$$

この(9)式は $(n-1) > 0$ でなければならないことを示しているが、実際には $(n-1) = 0$ または $(n-1) < 0$ の場合もあるので、(9)式は成り立たないことになる。このことは、Brinkhaus が提起したような形では、 r が K のうちに含まれているものではないということである。

3. 転移図形の分類

図一1のような転移状況を表わす図形は、勾配がそれぞれ n および n' 、または $(n-1)$ および $(n'-1)$ の2つの部分から成り立っているが、それらはそれぞれ $n > 1$, $n=1$ および $1 > n > 0$ の3つの場合と、 $n' > n$ および $n' < n$ の2つの場合との組み合わせによって種々の異なる形を生ずる。図一3はそれらの組み合わせを示したものである。

図一3中の n' , $n-1$ および $n'-1$ の行に“+”, “0” および “-” の符号のあるのは、次のような意味を表わしている。“+”の場合は、 Q が増加するにつれて s_w または s_w/Q が増加し, “0”の場合は、 Q が増加しても s_w または s_w/Q が一定値を保ち, また“-”の場合は、 Q が増加すると

n		n>1			n=1			1>n>0		
n'		+			+			+		
n-1		+			0			-		
n'-1	n'>n	+			+			+	0	-
	n'<n	+	0	-	-			-		

図一3 転移状況の分類

番号	型 勾配	A, $n > 1$				B, $n = 1$				C, $1 > n > 0$			
		n	n'	$n-1$	$n'-1$	n	n'	$n-1$	$n'-1$	n	n'	$n-1$	$n'-1$
I $n' > n$	1	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	-	+
	2									+	+	-	0
	3									+	+	-	-
II $n' < n$	1	+	+	+	+	+	+	0	-	+	+	-	-
	2	+	+	+	0								
	3	+	+	+	-								

図—4 転移型の分類

もに s_w または s_w/Q が減少することを表わすのである。ただ、 n および n' は常に“+”であるから、實際上 s_w については“0”および“-”の場合は存在しない。 $n=1$ というのは、線分の伸びが座標の横軸（この場合だけは縦軸といってもよい）に対し 45° の角度をもち、 $n > 1$ および $n < 1$ の場合はそれぞれ 45° よりも大きい小さい角度をもつことを意味する。しかし n' 、 $n-1$ および $n'-1$ の各線分の場合については、“+”符号をつけたものでも、いろいろな条件の制約によって、各線分の延長が横軸となす角度は、上記の3つの場合のうちのただ1つの場合に限られている。

図—3に示した線分の勾配から見た分類に従い、次に、作図が可能なのはどの組み合わせであるかを吟味してみよう。この作図には、既に述べたように、同じ揚水テストに関係する n および $n-1$ の両線分の延長の交点、および、 n' および $n'-1$ の両線分の延長の交点が、ともに $Q=1$ の横座標をもつということが利用されるのである。そしてそのためには、関係する n 、 n' 、 $n-1$ および $n'-1$ の4つの線分が同一図上に描かれなければならない。図—4はこの種の作図における組み合わせを示したもので、10種の型が区別されている。まず $n > 1$ 、 $n=1$ および $n < 1$ の場合をそれぞれ A、B および C 型とし、次に $n' > n$ および $n' < n$ の場合をそれぞれ I および II に大別した。さらに I および II を細別して、1ないし3の番号を与えたが、ただ1つしかない場合もあるので、例えば A—I、A—II—3 または C—I—2、C—II などのように表わすことにした。図—4の欄で、区切りの縦線を点線にしてあるところは、転移点の位置を表わす。なお作図の便宜上、 $n > 1$ の場合は $n=1.73$ （勾配 60° ）、 $n < 1$ の場合は $n=0.57$ （勾配 30° ）としてある。 $n=1$ の場合はいうまでもなく勾配 45° である。

図—5は各種の揚水の転移状況を示すモデル解析図である。この図は $s_w/Q < s_w$ の場合を考えているので、 $Q_i > 1$ となり、 n および $n-1$ の両線分が交わる点、 n' および $n'-1$ の両線分が交わる点は、ともに図の左側にある。また、 $s_w \sim Q$ 曲線は $s_w/Q \sim Q$ 曲線の上方に描かれてある。しかし、 Q の単位のととり方によって、 $s_w/Q > s_w$ の場合もあり、 $Q_i < 1$ となるので、線分の交わる点は図の右側にくるし、 $s_w \sim Q$ 曲線および $s_w/Q \sim Q$ 曲線の位置も上下が逆になる。

揚水の転移状況というものは、収水層の水文地質並びにその構造と深いかわりがあるものであるが、上に挙げた10種の型のうち、1、2を除く殆んどすべてが、実際の場合と符合するように思われる。以下実際の段階揚水テストの資料を解析し、揚水井の掘削地質を考慮しつつ、その意味を考えてみる。
(未完)

図一五 転移型のモデル図形

図-5 転移型のモデル図形 (続)