

# 潮汐の影響を受ける被圧地下水の 水頭観測とその解析

古本 勝弘\*・武政 剛弘\*・薦田 広章\*  
一ノ瀬 和雄\*・藤川 佳彦\*\*

## Observation of Water Heads in an Elastic Artesian Aquifer under Tide and its Analysis

by

Katsuhiro FURUMOTO\*, Takehiro TAKEMASA\*, Hiroaki KOMODA\*,  
Kazuo ICHINOSE\* and Yoshihiko FUJIKAWA\*\*

In elastic artesian aquifer extending under the sea, the piezometric head oscillates due to tidal water acting as load. The oscillating head is conveyed to inland through the aquifer, so that the water level in an artesian well tapping the same aquifer fluctuates. The head fluctuation in the well reflects various conditions of the aquifer such as compressibility, permeability and so on. Therefore, adding analytical considerations to observed data on the heads, one could know those conditions of the aquifer.

This paper states the observations of water heads in the artesian wells near the shore in Saijo City, Ehime. Then, compared the observed data with analytical solutions for the supposed model, the permeability, the leakage factor, the length of the artesian aquifer and so forth are determined.

### 1. まえがき

水資源の確保がさかんにさげばれている今日、地下水の重要性は一段と増している。わが国の地下水は一般に良好な水質に恵まれ、有用な水資源として、各種の用途に使用されているが、その採取量が広域に亘って涵養量を上回ると、さまざまな地下水障害を生む。

ことに、都市部における水需要の飛躍的な伸びは、地下水の利用量の急激な増大をうながし、地下水の過剰揚水は地盤沈下、水源の汚濁、さらには海岸地帯で

の地下水の塩水化を引き起こす。これらのうち、塩水化や地盤沈下は、その復元が、極めて困難なことから深刻な社会問題に発展することが少なくない。

こうした被害を未然に防ぎ、かつ地下水を有効に利用するためには、地下水の賦存状態を的確に捕らえ、帯水層の各種物理定数等を正しく把握しておかねばならない。

本研究は、潮汐の影響を受けて振動する海岸地域被圧地下水の水頭を観測し、その結果から判断し得る物

昭和59年4月28日受理

\* 土木工学科

\*\*土木工学専攻

理的状況を、想定モデルの理論解を基に考察したものである。

観測は、愛媛県西条市の干拓地で行った。西条市は、石鎚山系を北に流下し、瀬戸内海に注ぐ加茂川及び室川(渦井川)によって形成された低平な扇状平野に拓けた都市であり、自噴する豊富な被圧地下水で有名である。また数多くの堀抜井戸が点在し、飲料水としても盛んに利用されており、興味ある地下水問題を提供することより、当地で、多くの調査や研究がなされている。

## 2. 観測

海あるいは河川の近傍にある井戸の水位は、潮汐の干満、河川水位の変動に応じて変動する。この変動は、内陸に向かって減少し、ある距離以上離れると影響を受けなくなる。

自由地下水層の水位が干満に応じて変動するのは、地下水が実際に動くからである。厚い被覆層によって地表水体と隔離された被圧帯水層の水圧変動は、帯水層に作用する荷重の変動によっても起こる。

西条市は、市街地のほぼ中央部を境として、内陸側は加茂川の流量変動により、自噴帯の拡大縮小が見られる落差型の被圧地下水帯であり、その北の瀬戸内海側は潮汐の影響を受けて自噴量を増減する荷重型の被圧地下水帯で、室川から地下水が供給されていると言われている。<sup>5)</sup>

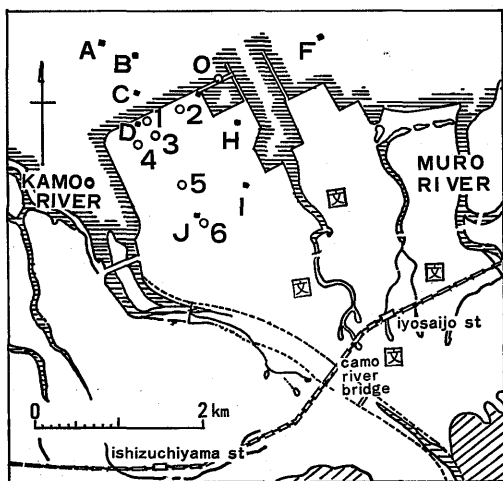


Fig. 1 Plan view of Saijo City and location of observed wells

観測は、Fig.1 に示す荷重型の被圧地下水帯である加茂川右岸の干拓地で行った。干拓地にはその造成当時、除塩とかんがいの目的で多数の堀抜井戸が設置されたが、かんがい設備が整備された現在は水田に設けられている殆どの井戸は、栓をさされて利用されていない。これらの井戸のうち、埋没して所在が不明になったものや、開栓不能になったものがかなりあるが、開栓すれば被圧水が自噴する井戸は数多く残されている。

干拓地内の水田は、標高  $-0.3 \sim -0.6$  m で殆んど水平であり、客土されていないので干拓堤防近傍の海底レベルと変わらない。Fig.1 の A~J 地点のボーリング柱状図を Fig.2 に示す<sup>4)</sup>。これによると、附近一帯の地層は厚い砂礫層の上に粘土層あるいはシルト層、その上に砂層が冠っており、地層の構成から典型的な被圧状態となっていることがわかる。

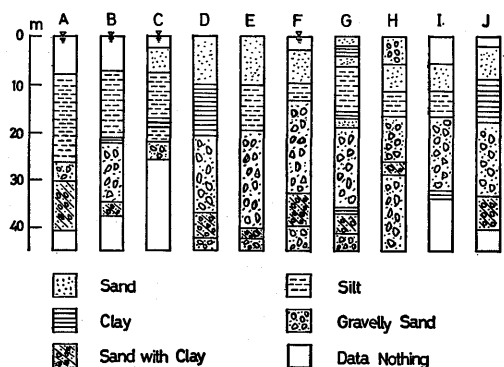


Fig. 2 Generalized graphic logs at Point A—Point J in Fig. 1

また、この砂礫層はその上面が海に向かってゆるく傾斜し、海面下かなりの距離まで存在している。深い位置までの資料に乏しいため、この砂礫層下面の深度や不透水層の有無はFig.2のみからは不明である。しかし、文献1)によれば、当該被圧層とは性質を異にする粘土混じり砂礫層が $-50$  m から  $-100$  m にかけて存在している。更にその下部には別の砂礫層が60 m 程度の厚さで存在して、いずれの層も豊富な被圧水を含んでいる。この地域には鉛直方向に三つの被圧層が存することになるが、観測の対象とした井戸はいずれも最上部の被圧層に設けられたものである。

このような地層の構成を考えると、最上部の被圧層には鉛直方向の流れの成分として、その上面から、よ

り上部の層への水の漏洩と下部の層からの水の流入があると思われる。

観測は、これらの自噴井戸のうちで、海側堤防線にほぼ垂直に並ぶ4本の井戸とこの井戸群の左右に各1本の計6本の井戸を選び、その水頭を時間的に記録する方法で実施した。このような井戸を選んだ理由は、被圧地下水の流れの方向を知ろうとするものであったが平均井戸水位には明瞭な勾配が認められず、流れの方向を決定するには至らなかった。

Fig. 1 中の No.1~No.6はその井戸の位置である。

また、潮位の観測は同図中の No. 0 の地点で行なった。

これらの井戸は直径2インチまたは4インチの鋼管を被圧層まで打ち込んだ簡単なもので(井戸の深さはすべて19m)、被圧水は干潮付近の短時間を除けば井戸頂部より常時湧出する。そのため、それぞれの井戸の頂部に硬質塩化ビニール管を取り付け、水があふれないようにし、その上に水位計を設置した。使用した水位計は、水面追尾方式の自作のもので動作感度は±1mm以下である。ただし、記録紙の読み取り精度、井戸相互の水位関係を知るための測量精度を考慮すると、得られた水位に含まれる誤差は±4mm程度である。

水頭観測は、昭和58年10月20日から23日にかけて実施した。潮位及び各井戸の時間変化をFig.3に示している。ここに示す潮位及び井戸水位は水準測量により、零点調整(標高とは無関係)がされている。

この図から、内陸の井戸ほど水位変化の振幅が小さいこと、また水位変化に時間的遅れが存在すること等を読み取ることができる。

これらの事柄を数量的に明確にするために、10月21日1時00分から22日1時40分までの約1太陰日間で、10分間隔に採取された潮位と各井戸水位を有限フーリエ正弦級数に展開し、各成分波の振幅と位相角を表1に示している。

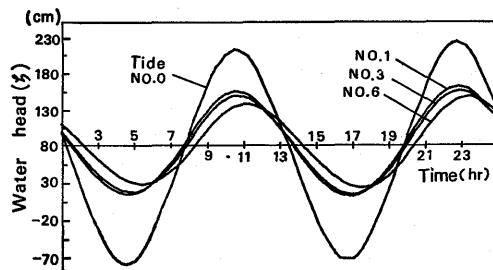


Fig. 3 Variation of water heads of artesian wells and tide in Oct. 21-22, 1983.

表に示したものよりも高周波の成分も存在するが、その寄与が非常に小さいために省略した。

同表には、各井戸の温度と電気伝導度をも加えている。但し、これらの値は観測を終了し水位計を取りはずした時(23日13時~15時)に湧出する水のものであり、1度限りの計測値である。

潮汐に日潮不等がほとんど無く、各成分波の振幅からわかるように半日項が卓越しその他の項の寄与は非常に小さい。このため、各井戸水位変化の半日項の性質を調べることによって被圧地下水の特性を捕えることができるであろう。表-1から言えることを列挙すると次のようである。堤防線からの距離により、卓越する半日周期をもつ変動成分の振巾の減衰、位相の増大がほぼ系統的に存在する。井戸水位の変動振幅は潮位振幅の50%以下である。

平均潮位は、各井戸の平均水位より13cm前後低い。また、各井戸の平均水位には顕著な勾配はないが、若干、内陸側に水位が低いことが認められる。

水質に関しては、内陸の井戸ほど水温が低い傾向にあり平均水位が低い井戸ほど伝導度は高い値を示しているようである。

Table 1 Harmonic analysis of observed data in Oct. 21-22, 1983

Well Number	Distance from the shore	Mean Level	Diurnal term		Semi-diurnal term		One third diurnal term		Semi-semi diurnal term		Water Temperature	Conductivity
			Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase		
Tide	0	70.1	3.2	-176.5	142.9	165.4	2.9	-166.0	2.0	-132.3		
NO.1	60	83.8	1.7	59.7	70.9	161.0	2.0	-164.0	3.5	-115.7	18.7	655
NO.2	100	84.4	1.9	53.1	70.2	160.4	2.1	-164.9	2.7	-124.2	18.5	587
NO.3	290	82.4	2.0	62.1	67.0	157.6	1.9	-163.6	3.4	-114.3	18.7	963
NO.4	296	82.6	1.9	59.7	66.2	156.9	2.0	-165.0	3.9	-108.9	19.0	828
NO.5	857	80.9	3.2	72.2	59.6	148.9	1.9	-164.7	3.1	-117.8	17.6	1145
NO.6	1440	83.1	3.2	68.6	56.9	142.8	1.8	-162.0	3.3	-119.0	16.1	420

### 3. 設定モデルと解析解

前述のように対象とする被圧層は、その上部に粘土又はシルト層、その下部に別の砂礫層を以って挟まれている。解析を簡単にするために層厚さは変わらないものとして、Fig.4 に示すような地下構造を想定した。

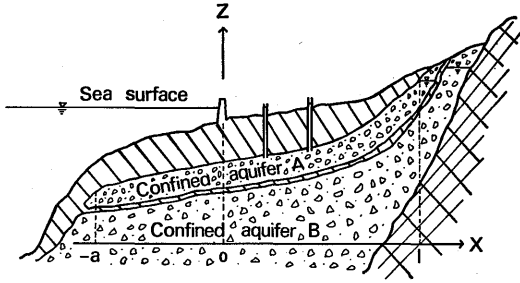


Fig. 4 Model of confined ground water

当該地域における被圧層の水平面に対する勾配は、ボーリング柱状図から、読み取ると1/380程度でありほぼ水平とみなして解析を進めてもよいであろう。被圧水の流動は堤防線に直交する方向の一次元運動と考える。堤防直下を原点に、 $x$ 軸を内陸に向かって水平方向にとる。被圧層は  $x=l$  の地点に流入端をもち、 $x=-a$  の地点まで海に延びているものとする。堤防より海側 ( $x<0$ ) の被圧層は、周期的に変動する潮汐荷重を受ける。

また、前節に述べているように、当該被圧層には、その上・下面で水の漏洩と流入が存在するものと思われる。この鉛直方向の浸透流出入は、被圧層内外の水頭差に起因するものである。簡単のために、被圧層外の水頭が変動なく一定とすると、単位面積当りの流出入量は、被圧層内の水頭に比例することになる。

被圧層上下面の流出入を合せて被圧水の漏洩があるとして、弾性透水路理論により、次の基礎式を得る<sup>2),3)</sup>。

海側の被圧層に加わる変動荷重を水頭で表わしたものを  $P$ 、被圧水頭の変動成分を領域別に、 $\zeta_1 (x<0)$ 、 $\zeta_2 (x \geq 0)$  として、

$$-a \geq x > 0$$

$$\frac{\partial \zeta_1}{\partial t} = K^2 \frac{\partial^2 \zeta_1}{\partial x^2} + \theta \frac{\partial P}{\partial t} - b \zeta_1 \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq l$$

$$\frac{\partial \zeta_2}{\partial t} = K^2 \frac{\partial^2 \zeta_2}{\partial x^2} - b \zeta_2 \quad (2)$$

ここに、

$$\theta = \alpha / (\alpha + \lambda \beta)$$

$$K^2 = T/S = k/\rho g (\alpha + \lambda \beta)$$

$$b = \left( \frac{k'}{D'} - \frac{k''}{D''} \right) / \rho g D (\alpha + \beta \lambda)$$

$$T = kD, \quad S = \rho g D (\alpha + \lambda \beta)$$

$\lambda$  ; 被圧帯水層の空隙率

$\alpha$  ; 被圧帯水層の垂直圧縮率

$\beta$  ; 水の圧縮率

$\rho$  ; 水の密度

$g$  ; 重力の加速度

$k, k', k''$  ; 被圧層, 上部半不透層, 下部半不透層の透水係数

$D, D', D''$  ; 被圧層, 上部半不透層, 下部半不透層の厚さ

$T, S$  ; 透水量係数, 貯留係数

(1), (2)式を連立させて解くための条件を次のように考える。被圧層の内陸端は不圧状態で変動はなく、海側端は閉塞し、被圧水の海への流出は無いとする。

また、 $x=0$ では、水頭および  $x$ 方向の流速が連続であり、荷重  $P$ は、潮汐の変動水頭そのものに等しい。式で表現すると次のようである。

$$P = P_0 \sin \omega t$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} \Big|_{x=-a} &= 0, & \zeta_2 \Big|_{x=l} &= 0 \\ \zeta_1 \Big|_{x=0} &= \zeta_2 \Big|_{x=0}, & \frac{\partial \zeta_1}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} \Big|_{x=0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

これらの条件の下での、(1), (2)式の解は次の通りである。

$$\zeta_1 = \theta P_0 \operatorname{Im} \left[ \frac{1 + (b/\sigma)i}{1 + (b/\sigma)^2} \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\coth Ma + \tanh Ml} \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\sinh M(l-x)}{\cosh Ml} \right\} e^{i\omega t} \right] \quad (4)$$

$$\zeta_2 = \theta P_0 \operatorname{Im} \left[ \frac{1 + (b/a)i}{1 + (b/a)^2} \cdot \frac{1}{\coth Ma + \tanh Ml} \right. \\ \left. \times \frac{\sinh M(l-x)}{\cosh Ml} \cdot e^{i\omega t} \right] \quad (5)$$

ここに、 $i$  ; 虚数単位,  $\operatorname{Im} [ ]$  ; 虚数部

$$M = m_1 + im_2 = \sqrt{\frac{\sigma}{2K^2}} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{b}{\sigma}\right)^2} + \left(\frac{b}{\sigma}\right) \right. \\ \left. + i \sqrt{1 + \left(\frac{b}{\sigma}\right)^2 - \left(\frac{b}{\sigma}\right)} \right\} \quad (6)$$

被圧層海側先端部が海に開口しており、他の条件は上記のものと同じとする場合には、(3)式の  $x = -a$  における条件を  $\zeta_1 = P_0 \sin \omega t$  と置き換えればよい。

この時の解は次の通りである。

$$\zeta_1 = P_0 I_m \left[ \left\{ \left( 1 - \frac{1 + (b/\sigma)i}{1 + (b/\sigma)^2} \theta \right) \frac{\sinh M(l-x)}{\sinh M(l+a)} - \frac{1 + (b/\sigma)i}{1 + (b/\sigma)^2} \theta \left( \frac{\cosh Ml \cdot \sinh M(x+a)}{\sinh M(l+a)} - 1 \right) \right\} \times e^{i\omega t} \right] \quad (7)$$

$$\zeta_2 = P_0 I_m \left[ \left\{ 1 - \frac{1 + (b/\sigma)i}{1 + (b/\sigma)^2} \theta (1 - \cosh Ma) \right\} \times \frac{\sinh M(l-x)}{\sinh M(l+a)} e^{i\omega t} \right] \quad (8)$$

観測が実施された井戸のように、海岸に近い領域における水頭変動の振幅と位相遅れが、 $x$  とともに変化する様子を(5), (8)式で調べてみよう。

被圧層の陸部の長さ  $l$  がかなり大きく、 $I_m[ML] \gg 1$  で、かつ  $I_m[Mx] \ll 1$  である場合、両式に含まれる  $x$  の関数は、次のように近似できる。

$$\begin{aligned} \sinh M(l-x) &= \frac{1}{2} \left\{ e^{Ml} \cdot e^{-Mx} - e^{-Ml} \cdot e^{Mx} \right\} \\ \approx \frac{1}{2} e^{Ml} \cdot e^{-Mx} &= \frac{1}{2} e^{Ml} \cdot e^{-m_1 x} \cdot e^{-i m_2 x} \end{aligned}$$

従って、被圧層海側先端の開口、閉塞に拘らず、減衰係数は  $m_1 = \sqrt{(\sqrt{\sigma^2 + b^2} + b)/2K^2}$  であるから、被圧水の漏洩の大きさを示すパラメータ  $b$  が大きい程、振動周期  $T = 2\pi/\sigma$  が小さいほど、また被圧層の透水係数が小さいほど変動振幅の減衰が大きい。但し、 $b < 0$  であれば、 $|b|$  が大きいほど減衰係数は小さくなる。

振幅の位相遅れは、 $x$  方向に  $m_2 x$  で直線的に増加する。 $m_2 = \sqrt{(\sqrt{\sigma^2 + b^2} - b)/2K^2}$  であるから、漏洩のパラメータ  $b$  が小さいほど、また被圧層の透水係数が小さいほど、振動周期が小さいほど  $m_2$  は大きく位相遅れが大きくなる。

#### 4. 解析解と観測との対比

観測の時期には潮汐に日潮不等が殆んど無く、潮位および各井戸水位の変動は半日周期をもつ波動が卓越している。このため半日項の波の特性を似て解との対比を行う。Table-1 に示した井戸水位の振幅を潮

位振幅で無次元化し、 $x$  に対して片対数紙上にプロットすると、Fig. 5 (a) のようにほぼ直線上に並ぶ。また、位相についても潮汐に対する遅れ角を  $x$  に対してプロットすると、Fig. 5 (b) のように直線上に並ぶ。いずれも  $x$  が小さい場合の理論解のもつ性質に一致している。Fig. 5 (a), Fig. 5 (b) の直線近似したその傾きが、(6)式の  $m_1, m_2$  に相当する。得られた値は夫々次のようである。

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= 0.215 \quad (km^{-1}) \\ m_2 &= 0.265 \quad (km^{-1}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

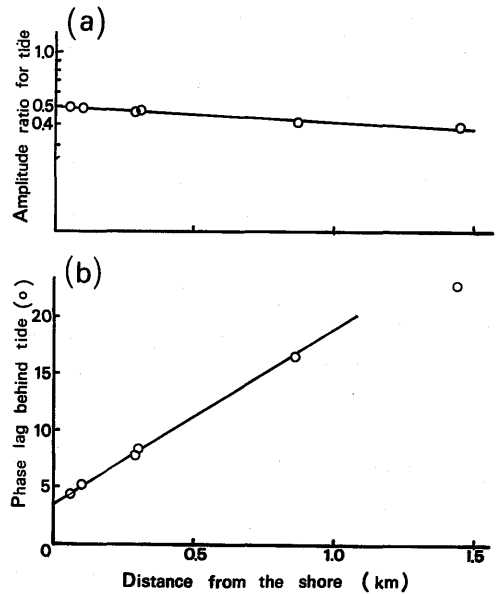


Fig. 5 Longitudinal profiles of amplitudes (a) and phase lags (b) on semi-diurnal term in Table-1

従って、観測された潮位および井戸水位の変動は次式で近似できる。

$$\left. \begin{aligned} P &= P_0 \sin \omega t \\ \zeta_2 &= P_0 H e^{-m_1 x} \sin (\omega t - m_2 x + \delta) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここに、 $P_0 = 1.429$  (m),  $\sigma = 2\pi/T = 2\pi/12.3$  (rad/hr) また、 $H, \delta$  は夫々堤防直下  $x = 0$  における潮汐に対する振幅の減衰比および、潮汐に対する位相であり、Fig. 5 (a), Fig. 5 (b) より外挿して次の値が得られている。

$$\left. \begin{aligned} H &= 0.497 \\ \delta &= -3.5^\circ \end{aligned} \right\} (11)$$

$m_1, m_2$  の値を(6)式に用いると、次の値を決定できる。

$$\left. \begin{aligned} b/\sigma &= -0.214 \\ \sqrt{\sigma/2K^2} &= 0.239 \text{ (km}^{-1}\text{)} \end{aligned} \right\} (12)$$

$b$  が負の値であることは、その定義式から、 $k'/D' < k''/D''$  を示しており、当該被圧層の上面からの漏洩より下面からの流入の方がより大きいことを示している。 $b$  の値を知ることができるが、 $b$  を定義する式の中には、多くの未知量があり、その夫々を決定することは、この観測のみからはできない。

(12-2) 式より、 $K^2$  を計算できるので、他の地方の似た深さの被圧層における資料<sup>5)</sup> を流用し、 $\rho g (\alpha + \lambda\beta) \cong 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$  を用いると、透水係数として

$$k = 3.1 \text{ (cm/sec)}$$

を得る。

被圧層の透水係数として、この値はかなり大きく、被圧層が礫を主体に構成されていることを示している。次に、被圧層の長さについて述べる。陸部における長さは、西条平野の山際に被圧水の涵養部があると考えられ、 $l = 5 \sim 6 \text{ km}$  と推定される。

(5)、(8)式に  $P_0, \theta, (b/\sigma), l$  を与えると、任意の  $x$  地点における水位変動の振幅並びに位相を被圧層の海側の長さ  $a$  をパラメーターに計算できる。

$\theta = 1.0, l = 6 \text{ km}$  と仮定し、 $(b/\sigma)$  に観測から得た値を用いて  $x = 0$  における振幅比と位相を計算した結果を Fig. 6 に示している。(11)式で示している観測から得た振幅比  $H$  と位相角  $\delta$  を用いて、Fig. 6 から  $a$  を逆算すると、(5)式の振幅比および位相から夫々、次の値を得る。

$$a = 3.25 \text{ (km)}, 3.45 \text{ (km)}$$

(8)式の結果には、 $H, \delta$  を満足する  $a$  は考えられる範囲には存在しない。このことは、被圧層の海側先端は開口していないことを示している。

これは、被圧層の平均水頭が海のそれより13cm程度高いにも拘らず、井戸相互の平均水頭に海方向に傾斜する勾配が認められないことも符合する。

更に、海側先端が閉塞しているため、当該被圧層にその下の層から流入する水は、その上面を経て自由地下水となるか、より内陸部に多数在る井戸で揚水されるものと思われる。これは、Table—1の平均水頭が内陸に低いことから理解できる。

ここで、Table—1に示している電気伝導度について少し触れておく。電気伝導度を高めている原因は塩

分であるが、この塩分が当該被圧層の堆積当時からのものであるか否かは不明である。しかし、この被圧層の水は長年月に亘って揚水、利用されて来ているので、被圧水の涵養が河川のみからであれば、塩分は低いであろう。

Table—1の伝導度の値をよく読むと、平均水頭が低い井戸ほど伝導度が高いことがよくわかる。このことは、この被圧層の下の層が高塩分を含み、被圧水頭の低い部分に下の層からのより多い浸透流入があるものと考えると理解できる。

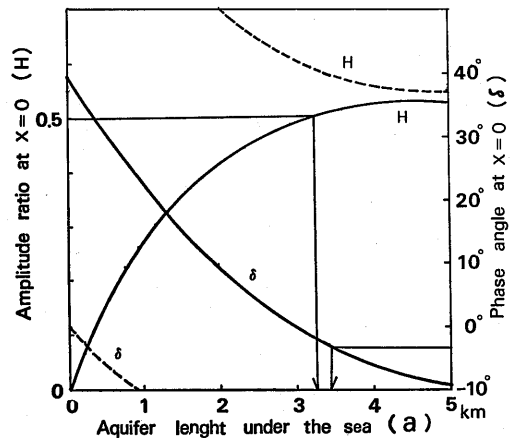


Fig. 6 Computed results of amplitude and phase lag at  $x=0$  versus parameter  $a$ , full line for eq. (5) and broken line for eq. (8)

## 5. 結 び

本報告は、西条市に於いて、昭和58年10月に実施した掘抜き井戸の水頭観測資料を、推定される地下構造モデルの理論解を参考に解析したものである。地下深い位置までのボーリング資料に乏しいために、設定した地下構造モデルの信頼性には疑問も残る。

また、観測の対象とした被圧層の層厚が一定であること、その層の上下層の水頭が一定であること、流れが海岸線に垂直の一次元であることなどを仮定して理論解を導いている。このような仮定は、少ない資料から解析を進める際には避けられないことであるが、総合的には、諸種の観測値をかなりうまく説明しているようである。観測資料の解析を手掛けた当初は、この被圧層に数多くの掘抜き井戸が設けられているので、

これが被圧水の地上への漏洩の役目を果たしているとの予想から、陸部のみに漏洩が存在するとして、基本解を求め考察していたが、観測値の説明はできなかった。観測を行った干拓地は、ほとんど水田地帯であり、被圧水を利用する民家が少ないことから、漏洩効果は小さいようである。この干拓地のさらに内陸に、西条市の中心部が広がっているため、被圧水の揚水も多く、その影響は大であろうと予想される。その影響が Fig. 5 (b)において、井戸 No. 6 のプロット点が、直線からかなりはずれることに現われているのであろう。従って、ここでの解析は、海岸部近傍のみに限定される。なお、数値計算には長崎大学情報処理センター FACOM M-180 II AD を使用した。

最後に、本調査、解析を遂行するに当って御指導戴いた共立大学松原茂教授、資料を提供していただいた

西条市役所企画事業課、土地改良事務所および資料整理、計算に協力していただいた里恒弘氏（現久保田建設 K.K.）、福元秀一郎氏（現東京建設コンサルタント）に対して、ここに記して感謝の意を表わします。

#### 参 考 文 献

- 1) 通商産業省；愛媛県道前地区地下水調査報告書（昭和44年）
- 2) De Wiest; Flow through Porous Media, Academic Press, 1969
- 3) 石原藤次郎・本間仁；応用水理学 中II
- 4) 通商産業省；愛媛県道前地区地下水利用適正化調査報告書（昭和44年）
- 5) 村下敏夫；地下水学要論，昭晃堂（昭和54年）

