

海岸地下水の研究 (第3報)

其の二 潮汐と地下水位 附別府温泉の感潮度

理學博士 野 滿 隆 治

I. 緒 言

海岸の地下水に關する二大重要問題の一たる海鹽の効果につきては、既に第1及び第2報文に於て研究した。今回は他の一面たる潮汐の地下水位に及ぼす影響に就き論究したい。

海岸の井戸では潮汐に伴つて其の水位を上下することは随分昔より注意せられ、米國では Harris⁽³⁾ が其の潮汐論中に感潮井の記載をなし、Geological Survey⁽⁴⁾ でも多數の感潮井を調べて居る。普通の不壓地下水層内に掘つた浅井戸での感潮は、海岸のすぐ近くのみに限られ海岸を去れば急減するし、海岸から 100~200 呎でも水位の變動は數インチに過ぎないが、被壓地下水層に達した深い掘抜井戸では、感潮度が大きく水位の變動數呎に達するものがあり、而も随分遠方まで(數哩も)明瞭に潮汐の影響を示すのがあるといふ。而して Veatch は感潮の機構を(1)地下水が海底に直接開口せる爲めのもの、(2)潮汐の負荷による地層の壓縮により空隙を減少して地下水の流動を妨げ上流に水の蓄積を生ずる爲のもの、(3)潮汐負荷により地層變形し絞り出しをなす爲のものとし、(2)は位相の差を生じ(3)は位相差を生ぜずとした。我國でも東京帝國大學内の深井は海岸から 3 km の處で 1~3 cm 振幅の感潮現象あることが既に明治 37 年本田光太郎博士⁽⁵⁾によつて研究せられ、又大牟田市水道源井は海岸から 1 軒にあつて大潮のとき振幅 50 cm (海潮の約 10 分の 1)位相の遅

-
- (1) Nomitsu, Toyohara & Kamimoto: On the Contact Surface of the Fresh and Salt-Water etc.; Mem. Coll. Sci. Kyoto, 4, 10 (1927), 279.
 - (2) 野滿隆治: 海岸地下水の研究, 其の一 海鹽の効果 第2報, 日本學術協會報告第10卷 (昭和10年), 628頁。
 - (3) Harris: Manual of Tides. Part V. Chap. X. Tides in Lakes and Wells (1900).
 - (4) A. C. Veatch: Fluctuation of the Water Level in Wells; U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 155 (1906), 69.
J. S. Brown: A Study of Coastal Ground Water; Ditto 537 (1925), 49.
 - (5) 本田光太郎: 震災豫防調査會歐文報告, 第18號(1904)。

れ平均2時間を以て感潮することが數年前君島八郎博士⁽⁶⁾によつて報告せられて居る。

然し感潮井の問題を數理的に取扱つたものは甚だ少く、筆者の知れる範圍では、僅かに須田・安藏兩博士の報文がある位である。須田博士等⁽⁷⁾は兵庫縣蘆屋附近の感潮井につき、大阪灣内の潮汐による負荷の爲め基盤たる強固な花崗岩臺上にある粗鬆軟弱な地層が壓せられて地下空隙を縮小するによるものと假定して計算した。堅固な臺上に柔弱な地層がのつて居る其の一端に重りをのせたからとて、重りより遙に離れた(數米もの)處に空隙を可なりの程度縮小せしむる程の壓力が働き得るとは私には信ぜられない。又安藏善之輔博士⁽⁸⁾は、九州帝國大學内にある距岸僅に100~300米の淺井が皆殆んど潮汐の影響を感じないのに、前記大牟田水道源井は海岸より1米も離れて居るに拘らず感潮現象を示すことに着眼し、先づ海岸不壓地下水面の感潮は河畔地下水面の河水位に伴ふ昇降に關する Forchheimer の式と同一法則に従ふべきことを示し、次に先端のみ開放せる被壓地下水層が二つ折れた直線狀をなす場合に其の先端近くに穿つた掘抜井の理論を作り、大牟田水道源井の昇降を説明せんとした。氏の結果によると、掘抜井戸は感潮度が遠方でも大きく且つ潮汐に對し位相差を生ずることになつて居る。

處で一方別府温泉の感潮現象に就き、著者等⁽⁹⁾は掘抜温泉21口の2日乃至1ヶ月に互る連續觀測を行ひ、温泉湧出量從つて温泉水頭が潮位に正比例して上下し、而も感潮度は海岸を距るにつれ激減するに拘らず位相差は殆んど皆無であり、感潮率は各分潮につき同一なることを見出した。更に瀨野錦藏學士⁽¹⁰⁾は、別府市内百數十口の温泉湧出量の數年に互る毎週一回觀測から感潮度を算出する方法を案出して、距岸距離による感潮度の分布狀況を一層明かにし、且つ最近⁽¹¹⁾は普通の冷水井全部で百數十の水位を調査し其の感潮度が掘抜温泉に比して極めて小さく殆んど認められない程度であることを示した。是等の諸事實、特に別府温泉の感潮度が海岸距離と共に急減するに拘らず位相差がないこと及び感潮率は一日潮でも半日潮でも同一なることは、安藏氏の理論だけでは解釋し得ないので、我々は

(6) 君島八郎：地下水(昭和8年改版)，241頁。

(7) 須田院次：海と空，5(1925)，223頁。

(8) 安藏善之輔：井水の水位に及ぼす潮汐の影響に就て，九大工學部彙報第9卷(昭和9年)，1頁。

(9) 野滿，瀨野，中目：別府温泉と潮汐，本誌第2卷(昭和11年)，1頁。京大理學部紀要A，12(1939)，403。

(10) 瀨野錦藏：別府温泉の感潮度分布，同上24頁。

(11) 瀨野錦藏：別府市街地に於ける冷水頭分布；本誌次號に掲載の管。

理論を今少し擴張せねばならない。又別府温泉の感潮は負荷による絞り出し作用でないことは明かである。何となれば同じ負荷となるべき氣壓の効果は湧出量に負の相關を示し高氣壓のとき湧出量を減じ低氣壓のとき湧出量を増すのである。而も其の量は湧出口を上下し従つて湧出口上に加ふる水柱の變化による湧出量變化と同程度なることを突き止めて居るのである。即ち氣壓の影響は全く湧出口上部のみから作用し、外圍地表面の負荷作用としては毫も効果を表はさない。然らばそれより離れた海底の負荷による絞り出し作用は一層微弱なものと考ふべきであらう。従つて別府温泉の感潮は温泉水路が海中に開放して居るが爲に外ならぬ。事實海底温泉も多數にあるのである。

II. 理 論

別府市街地は鶴見岳山麓斜面に堆積した沖積層で、透水層と不透水層とが交互に重疊し、⁽¹²⁾其の透水層には冷水又は温水充滿して、内陸遠端は山麓斜面に接し開放状態にあるものと思はれる。依て先づ左様な地下水の感潮問題に適する諸種の場合の理論を作ることにする。

1. 不壓地下水層内の浅井：— 此の場合は極めて簡単であり又安藏氏の所論もあることで茲に再論する必要もないが、只後の場合と對照する便宜上最も手輕な説明を與へて置く。第1圖に於て透水層の平均海面を切る點を原點とし、海岸に直角に内陸に向つて x 軸をとる。地下水面の平均位置よりの上昇量を ζ とし、平均水厚を H とする。

潮汐の作用による地下水流量を單位時間單位幅につき Q 、地層の透水率を α 、空隙率を n とすれば、Darcy 法則によつて

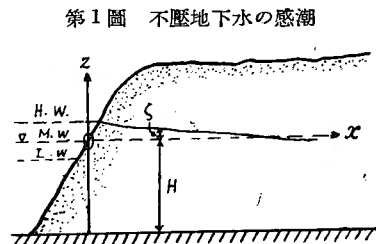
$$Q = -\alpha(H + \zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (1)$$

又連續式は時間を t にて表はせば明かに

$$n \frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (2)$$

實際上は H に比すれば甚だ小なるを例とするので、上記二式から

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = cH \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \quad \text{但し } c = \alpha/n \quad (3)$$



第1圖 不壓地下水の感潮

(12) 野満, 山下: 別府舊市内の地中温度分布と温泉脈, 地球物理第2巻(昭和13年), 233頁。

故に海岸 ($x=0$) の潮汐昇降を、

$$\zeta = \zeta_0 \cos \sigma t \quad (4)$$

とすれば、(4) を満足する (3) の解は

$$\zeta = \zeta_0 e^{-\alpha x} \cos(\sigma t - \alpha x), \quad \text{但し } \alpha = \sqrt{\sigma/2cH} \quad (5)$$

で、地下水位従つて井戸水面の昇降は遠方になるほど潮汐よりも位相が αx だけ遅れ、振幅は $e^{-\alpha x}$ の割合に微弱となる筈である。而して同一地點に於ける減率 $e^{-\alpha x}$ は、各分潮の Speed σ 従つて週期により異なるべく、半日潮の減率は一日潮のその $\sqrt{2}$ 乗に當り感潮度が甚だ悪いわけである。

2. 被壓地下水層に達する掘抜深井：一之には色々の場合を考へて置く必要がある。

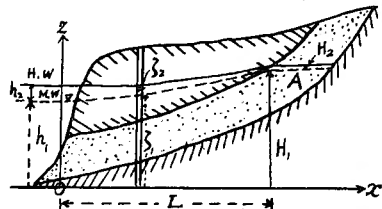
(i) 遠端開放不壓にして且つ途中は漏水なき被壓地下水層(安藏氏の場合に類似)。

第2圖に於て、一定の厚さ D なる被壓地下水層の遠端は開放不壓状態にあるとし、途中 x に於ける壓力水頭を z にて表はせば、

$$\text{運動方程式は } Q = -x D \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (6)$$

$$\text{連續方程式は } \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

或は $Q = \text{時間 } t \text{ のみの函數}$



今 ζ 及び Q を潮汐なき場合の定常値 ζ_1, Q_1 ,

潮汐によるもの ζ_2, Q_2 に分てば、定常値は海岸 $x=0$ にて $\zeta_1 = h_2$, 遠端 ($x=L$) にて $\zeta_1 = H_1$ とし

$$\zeta_1 = h_2 + \frac{H_1 - h_2}{L} x = h_2 + \frac{Q_1}{x D} x, \quad Q_1 = \text{定數} \quad (8)$$

次に、潮汐に因る部分は (6) より

$$-x D \frac{\partial \zeta_2}{\partial x} = Q_2 \quad (t \text{ のみの函數})$$

$$\therefore \zeta_2 = C - \frac{Q_2}{x D} x, \quad C = t \text{ のみに關する積分常數} \quad (9)$$

潮汐の半振幅を h_2 とすれば海岸條件より

$$|\zeta_2|_{x=0} = h_2 \cos \sigma t \quad \therefore C = h_2 \cos \sigma t \quad (10)$$

尙 Q_2 なる未知量を追出す爲めに、遠端に於ける昇降を

$$|\zeta_2|_{x=L} = H_2 \cos(\sigma t - \beta) \quad (11)$$

とし、半振幅 H_2 と位相差 β を求めんに、遠端の開放水面の幅を A とすれば連続条件より

$$n \cdot A \left| \frac{\partial \zeta_2}{\partial t} \right|_{x=L} = -Q_2 = -\frac{x D}{L} [h_2 \cos \sigma t - H_2 \cos(\sigma t - \beta)] \quad (12)$$

之に (11) を代入すれば

$$-A H_2 \sigma \sin(\sigma t - \beta) = \frac{c D}{L} [h_2 \cos \sigma t - H_2 \cos(\sigma t - \beta)], \text{ 但し } c = x/n.$$

$$\text{或は} \quad -A H_2 \sigma [\cos \beta \sin \sigma t - \sin \beta \cos \sigma t] =$$

$$\frac{c D}{L} [h_2 \cos \sigma t - H_2 (\cos \beta \cos \sigma t + \sin \beta \sin \sigma t)]$$

之は t の如何に關せず成立すべきにより、左右兩邊の $\sin \sigma t$ と $\cos \sigma t$ の項を別々に相等しと置き

$$-A \sigma \cos \beta = -\frac{c D}{L} \sin \beta, \quad A H_2 \sigma \sin \beta = \frac{c D}{L} [h_2 - H_2 \cos \beta]$$

$$\left. \begin{aligned} \text{故に} \quad \tan \beta &= \frac{A L \sigma}{c D} \\ H_2 &= \frac{h_2}{\sqrt{1 + (A \sigma L / c D)^2}} = h_2 \cos \beta \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

により、(11)式の β , H_2 を求め得る。

而して途中 x 點に於ける水頭 ζ_2 は (9) (10) (12) により

$$\begin{aligned} \zeta_2 &= h_2 \cos \sigma t - \frac{x}{L} [h_2 \cos \sigma t - H_2 \cos(\sigma t - \beta)] \\ &= \frac{L-x}{L} h_2 \cos \sigma t + \frac{x}{L} H_2 \cos(\sigma t - \beta) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{即ち} \quad \zeta_2 &= \sqrt{\left(h_2 \frac{L-x}{L}\right)^2 + \left(\frac{x}{L} H_2\right)^2 + 2 h_2 H_2 \frac{L-x}{L} \cdot \frac{x}{L} \cos \beta} \\ &\quad \times \cos(\sigma t - v) \\ \text{但し} \quad \tan v &= \frac{\frac{H_2}{L} x \sin \beta}{h_2 \frac{L-x}{L} + \frac{H_2}{L} x \cos \beta} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

で、 x の増加と共に振幅は減少し位相は遅れる。而してその度合は β 従つて σ に關係し、一日潮は半日潮よりも感潮度大で比較的遠方まで減衰せず伝はる。

(ii) 途中一面に湧泉漏水ある被壓地下水層

別府温泉地の如く、無数の掘抜温泉ありて地下の被壓水を途中で地上に流出せしめる場合(第3圖)には、餘程様子が違つて来る。かかる場合の湧出量は地下水壓頭に正比例することとは別府温泉研究によつて明にされてゐるから、⁽¹³⁾ 單位幅($\Delta x=1$) 毎の湧出漏水量を單位時間に q とすれば

第 3 圖

$$\text{運動方程式 } Q = -x D \frac{\partial \zeta}{\partial x}$$

$$\text{連續式 } \frac{\partial Q}{\partial x} = q = b \zeta \quad (15)$$

b = 比例常數

先づ潮汐なき定常状態の Q_1, ζ_1 を考へると、此の二式より

$$\frac{d^2 \zeta_1}{dx^2} = \frac{b}{x D} \zeta_1 \quad (16)$$

之を解けば、

$$\zeta_1 = h_1 e^{mx} - (h_1 e^{mL} - H_1) \frac{\sinh \beta x}{\sinh \beta L}, \quad m = \sqrt{\frac{b}{x D}} \quad (17)$$

但し h_1 は海岸 ($x=0$) の水頭, H_1 は遠端 ($x=L$) の水頭である。

次に潮汐による部分 Q_2, ζ_2 に就いては、基本式が additive なるに注意すれば

$$\frac{\partial^2 \zeta_2}{\partial x^2} = \frac{b}{x D} \zeta_2$$

これの解は明かに

$$\zeta_2 = A(t) e^{mx} + B(t) e^{-mx}, \quad \text{但し } m = \sqrt{\frac{b}{x D}}$$

之に境界條件

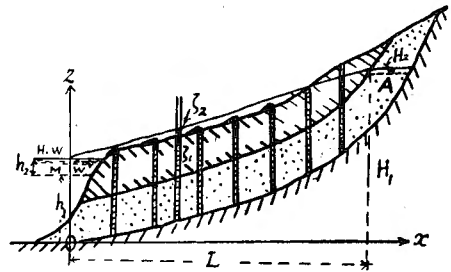
$$\text{海岸: } \zeta_2|_{x=0} = h_2 \cos \sigma t,$$

$$\text{遠端: } \zeta_2|_{x=L} = H_2 \cos (\sigma t - \beta)$$

を入れると

$$A + B = h_2 \cos \sigma t$$

$$A e^{mL} + B e^{-mL} = H_2 \cos (\sigma t - \beta)$$



(13) 野満, 瀬野, 山下: 別府温泉の湧出量と水頭との相關, 本誌第2巻(昭和13年), 260頁。

この二式より A, B を求め、最後の解として

$$\zeta_2 = h_2 e^{mx} \cos \sigma t - \frac{\sinh mx}{\sinh mL} \left\{ h_2 e^{mL} \cos \sigma t - H_2 \cos (\sigma t - \beta) \right\} \quad (18)$$

特に mL が相當に大きい場合には、 $h_2 e^{mL}$ に比して H_2 は無視し得るし、又 $\sinh mL \doteq \frac{1}{2} e^{mL}$ となるから

$$\zeta_2 \doteq h_2 e^{-mx} \cos \sigma t, \quad \text{但し } m = \sqrt{b/\kappa D} \quad (18')$$

で、振幅は e^{-mx} に比例して激減するも位相差は起らず、且つ m には潮汐の speed σ を含まぬから一日潮でも半日潮でも同一比率を以て減少し、感潮度は各分潮悉く同一でなくてはならない。

(iii) 途中湧泉漏水なく且つ遠端閉塞せる盲管状被壓地下水層

(a) 被壓地下水層が海とは連絡あるが、遠端は開放不壓の部分なく全部不透層にて閉塞せられた盲管となつて而も途中全く漏水なき場合には、水を不可壓とし不透水層が變形しないと考ふる限り、常識からしても潮汐による水壓變化はそのまま即座に遠方まで傳達せられ、振幅の減率も位相差もない筈である。數式上では (i) の場合の A を 0 と置けばよい。A=0 ならば (13) 式より $\beta=0$ で、 $H_2=h_2$ 、従つて (14) 式は v も 0 であるから

$$\zeta_2 = h_2 \cos \sigma t$$

となるのである。

(b) 海底とも不透層にて遮斷され全く連絡のない袋状の被壓地下水層では、之を掩ふ不透層が潮汐の水壓でなく負荷としての作用を受けて、水壓頭に感潮する場合もあることは屢々人の口にすることである。米國でも、紐育州の Oyster Bay あたりには此の種の感潮井があると Veatch⁽¹⁴⁾ はのべて居る。然し別府あたりでは此の種の影響は殆んどなく、あつたとしても極微なることは既に報告した所である。⁽¹⁵⁾

III. 別府への應用

以上の理論を念頭に置いて別府の冷泉並びに温泉の感潮現象を検討すれば、殆んど總ての性質が了解出来る。

1. 不壓冷水井：一瀬野學士は其の冷水頭分布調査に當り潮汐影響をも注意したが、距

(14) 既出(4)。

(15) 既出(9)。

岸僅かに四五十米のものでも殆んど之を認むることが出来なかつた。⁽¹⁶⁾今其の理を討ねんに、
同氏の實測によると、別府市内透水層の空隙率は平均 $n=40\%$ で透水率は最大なもの
も

$$x=0.065 \text{ cm/sec.}=0.00065 \text{ m/sec.}$$

従つて $c=0.0014 \text{ m/sec.}$

にすぎない。又我々の調査によれば、上部不壓含水帯の厚さは $H=10 \text{ m}$ 程度である。⁽¹⁸⁾

故に(5)式の α は半日潮に對し少くとも

$$\alpha=\sqrt{\sigma/2cH}=\sqrt{2\pi/(12\times 60^2\times 2\times 0.0014\times 10)}=0.073 \text{ (米}^{-1}\text{)}$$

従つて感潮率 $e^{-\alpha x}$ は次表の如く四五十米で百分の一程度となる。

距 離 x (米)	40	60	80	100
$e^{-\alpha x}$	0.054	0.012	0.008	0.0007

然るに別府灣の半潮差は $\zeta_0=1$ 米内外であるから、海岸より僅かに五六十米を離れても、
地下水位の動搖は1纏内外にすぎず、百米もの距離では1耗にも足らず、殆んど認められ
ないのは當然である。

2. 掘抜温泉：一之に反して別府市内約千口の温泉は多少とも感潮しないものは一つも
ない。我々の研究によると、各個温泉の海岸距離と其の湧出量の感潮度（湧出口單位面積
當り）は第4圖の如き關係を示し指數函數的に減少するに拘らず、位相差は殆んど認めら
れない。加之潮汐及び湧出量の變化を調和分析して、各分潮毎の感潮度を檢するに總て同
一なのである。此等の特性は安藏氏の考へた様な場合や吾々の被壓地下水(i)の様なもの
でなく、(ii)の(18')式に相當することを知るのである。而して別府市内は約千口に近い掘
抜温泉があつて、地下溫水を地上に晝夜湧出放流させて居る状態は、恰度前記(ii)の條件
に合致し穴だらけの水道鐵管に於ける水壓傳播に類するから、蓋し當然の特性を示して居
ると言はねばならぬ。

第4圖の曲線を h_2e^{-mx} と見て m を算出して見ると

$$m=0.0087 \text{ (米}^{-1}\text{)}$$

(16) 既出(11)。

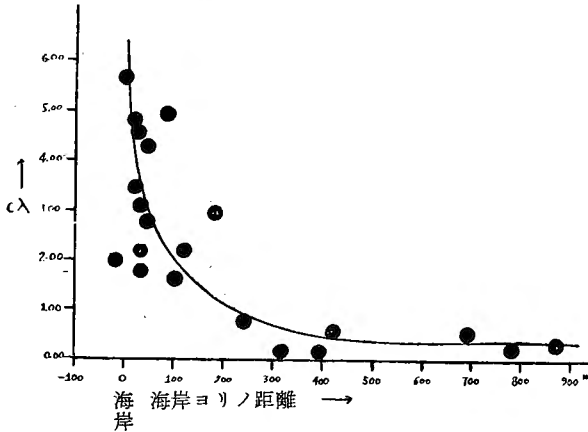
(17) 瀨野錦藏；別府市街地の溫泉水頭分布，本誌第2卷(昭和13年)，280頁。

(18) 既出(12)。

(19) 既出(9)。

で、半減距離は約 80 米程度となる。

第 4 圖



附記：一別府の様に全地域一面に無数の温泉を放流して居る海岸温泉の感潮現象は、上述の如く理論 2 の (ii) の場合に相當するのであるが、温泉口数の極めて少ない海岸被壓層狀温泉では、(i) の場合に該當するものもあると思はれる。左様な温泉の感潮現象は、振幅が海潮に比して著しく小なると同時に位相も遅れるであらう。大牟田水道源井は安藏氏の言ふが如く大體に於て此の種に屬するかと思はれる。

尙茲に注意したいのは、振幅も減じ位相も遅れる場合には、分潮毎に其の程度を異にし半日潮と一日潮とでは餘程の差があることである。一日潮は半日潮に比して割合振幅は減少せず、又位相の遅れも少い。従つて其の重なり工合によつては、兩者の合成作用の最高最低は見懸上海潮よりも位相が進んだかの如く見えることもあり得る。稀に海岸温泉の感潮現象が海潮よりも位相の進む例の報告に接するが、或はそんな原因でないかと私は想像する。それでないと今の私には到底解釋がつかない。別府温泉でも大抵は位相の差を示さないが、極めて稀に位相の進むらしいものも遅れるらしいものもある。而も遅れるものと進むものとが近い所に混在してゐるものもあるので、全體として位相差なしといふ外ないが、兎も角左様なものが混ざつてゐるのは、別府温泉も完全に (ii) の場合の條件を満たすのではなく、幾分 (i) の條件に屬する所もあると云ふのが至當であらう。それでも位相の進み

(20) 例へば前田競氏は淺虫温泉の一つに就いて位相の進みを報告してゐる、地震第 8 卷 (昭和 11 年) 1 頁。

は見懸け上のもので、一日潮と半日潮の重さなり工合としか考へられないことは前同様である。満潮がまだ別府灣に到達しない以前遠方の潮汐負荷によつて既に其の効果を呈したのではないかと一應考へて見たが、別府温泉の大多數に位相差なく、沉んや遅れるものと近接してゐることさへあるので到底受入れるわけに行かない。又他方面からも別府温泉の感潮は潮汐の負荷による絞り出し作用でないことが立證されて居るのである。⁽²¹⁾

序ながら須田博士の調べた芦屋附近の感潮も、其の地質(花崗岩地の理想的な砂質)から考へ、私には寧ろ地下水路が海中へ開口して居るための様に思はれてならない。

(21) 既出(9)。