海岸地下水中への揚水による塩水侵入に関する模型実験（続）

川 端 博*

Model Studies of Salt Water Intrusion by Pumping Up

Hiroshi KAWABATA

Abstract

Substantial quantities of ground water have been and are being withdrawn from the ground-water reservoir of the areas at near the sea in Japan. The total amount of water withdrawn from wells is termed the gross pumpage. Before the gross pumpage begins, the chloride content of the water is normally about 10—20 ppm. As the pumping up of large quantities of ground water progresses, the interface between fresh and salt water and the zone of diffusion move farther and farther inland in response to the withdrawal of fresh ground water.

Effects of pumping ground water caused considerable concn locally : (1) Declining ground water levels in the vicinity of pumping wells, and (2) increasing chlorid content of the water pumped from some well near the sea.

Model experiments can play an important role in the forecast of the consequences and the recognition of the states of salt water intrusion of developing aquifers having complicate structure.

Photographs 1—16 show the states of coning up and down of the interface between fresh and salt water according to the positions of point sink (strainer), the quantities of pumpage and the flowing volumes of ground water through the media.

- (1) When the point sink is situated in the salt water before pumping up, the edge of salt water retreats to the sea.
- (2) In the case of poor supply of fresh water, a pumpage on the interface introduces the salt water intrusion to inland, but good supply of fresh water, same pumping up makes the edge retreat to the sea.
- (3) By pumping up of large quantities of the ground water the edge goes to inland or back to the sea in accordance with the position of point sink, and the interface reaches to the point sink. And the curve of interface under the point sink is convex toward the sea.

1. ま え が き

日本全国各地において公共用水源又は工業用水源としての地下水の枯渇が問題となっており、

* 京都教育大学

年月が経過している。そのような事態に対して種々の技術的、行政的な対策が講ぜられある程度地盤沈下等に関しては効果が上っているようであるが、地下水の保全という面に対してはまだまだの感がある。

海岸近くの地域において地下水の揚水により、その枯渇および塩水の侵入が問題となっていることは既に乏しい。塩水の侵入により工業用水、水道水としては使用不可となり、温泉地においては泉温の低下に連なり種々の法的な紛争のもとともなっている。その対策としては海岸近く汀線に平行に淡水の堀割をつくるとか、Recharge basin を設けるとか、又は Diffusion well が設置されるかしている。しかし以上のような設備をするにしてもそれに相応する各種の条件が必要となることはいうまでもなく、例えば一度揚水した地下水を地中に注入するにせよ汚染していない淡水か、又は濾過浄化が行われた淡水に限られ現実問題として不可能な場合が多い。New York の Long Island において 1000 以上の Recharge well 又は Injection well が設置されているが総揚水量 430mgd に対して、注入量は 46 mgd で、総揚水量に対して注入量は 11% 程度である。しかしこの対策により 1936 年に平均海面下 35feet の地下水面が 1965 年には ± 0 から + 5 feet に上昇している。

海岸地域において塩水侵入が進行中であると認められる、即ち内陸において多量の揚水が実施され、海岸附近の被圧、不圧を問わず塩水混入をきたし使用不能となった地下水域、稻田の塩害による荒廃地を 2～3 実測中であるが、思いもよらぬ経過をとることがあるので種々の条件の下に Model を想定して実験研究を実施したのである。室内実験を行なう場合問題となるのが相似性のことであるが一応定性的にも短時間でみられるという長所もあり、地下現実にみられない様態も直視し得られ、条件も大略自由に変化せしめ得るので便利である。その結果をそのまま錯雑した現地の地下状態に適用し得るとは考えてはいない。本号では前々号で報告したものの継続実験として模型実験を実施したものでまだ完成したものではない。注入実験は今回報告しないし、目下実験中である。

2. 実験装置および方法

実験装置は前報告の通りであるが写真を見れば判ると思う。使用した塩水の比重は都合により 1.050 のものを使用している。砂槽中の砂の粒経は 0.5mm～1mm のものである。塩水は砂粒を着色しない染料で着色してあるので淡水、塩分境界の Interface は Darcy's law を適用しえないと一応はみられる乱流区域を除いてその上下、前後進の変化の状態は明瞭にみられる。海岸への地下水の流出量(Q), 揚水量(q)はメスシリンダーとストップ・ウォッチにより計量された。この実験は室内実験であるので淡水に関しては Line source が内陸近くに存在するか、非常に豊富な地下水補給源が近くにある場合となる。

実験において地下水の海岸への全流出量は $2.5\text{cm}^3/\text{s}$, $5.0\text{cm}^3/\text{s}$, $7.5\text{cm}^3/\text{s}$, $10\text{cm}^3/\text{s}$, $15\text{cm}^3/\text{s}$, $20\text{cm}^3/\text{s}$ と大略の目標とした。揚水は今回の場合 point sink 一つのみとし、位置は水槽の右下の角を原点とし、即ち実地では海岸の流出点下の不透水層上を基点としている。従って point sink の位置を 5—10 と記せば、y (上方) = 5 cm, x (左方) = 10cm に point sink があることになる。point sink の位置は上方に 5 cm 毎に、横方向に 10cm 毎に約 35 点とっている。揚水量は $0\text{cm}^3/\text{s}$, $2.5\text{cm}^3/\text{s}$, $5\text{cm}^3/\text{s}$, $7.5\text{cm}^3/\text{s}$, $10\text{cm}^3/\text{s}$, $20\text{cm}^3/\text{s}$ に大体なるようにした。何れの量も実験中に大体の見当をつけておいて、定常状態となった時刻に精密な測定が行われた。水温は $10^\circ\sim 15^\circ\text{C}$ で温度差はこの場合考慮されていない。揚水方式はサイフォン式で、ピンコックにより調節が行われた。マノメーターが 10cm 毎に底部より立てられ水柱には淡水が入れられよくみえるように着色されている。

従って実験は数百通り行われたことになるが、省略された部分もある。

この実験は二次元的なものであるので、海岸線方向が不明であるということがあるかも知れないが大体の想像は難くないと考えられる。

3. 実験結果ならびに考察

実験は多種類実施されたが、そのうち代表的なものを示すことにする。淡水中の黒線は淡水中の流線の状態をみるために染料が注入されたものが砂粒中で拡散したものである。一般の流体実験のように境界の明瞭な線にはならないのが残念であるが砂層中の実験では止むを得ない。

Photo. 1 において $Q=7.5\text{cm}^3/\text{s}$, $q=0\text{cm}^3/\text{s}$, point sink の位置 5—20 である。淡水の流量が多いらしく Interface は割合立っているようである。 $Q=2\text{cm}^3/\text{s}$ 程度にすると塩水侵入 edge は左方 50cm ぐらいのところまでくる。淡水中の流線が右上方に斜行しているがこれは塩水侵入の影響がでているものと考えられ、その位置ポテンシャルエネルギーの補給は Interface と水粒子との水平方向運動エネルギーの消耗によりなされている。

Photo. 2 は流出量 $Q=7.5\text{cm}^3/\text{s}$, 揚水量 $q=2.5\text{cm}^3/\text{s}$, point sink 位置 5—10 の場合である。塩水侵入域は Photo. 1 と比較して 30cm より 15cm まで退行している。Interface それ自身も原点上を除き下降していることが認められる。point sink の位置と揚水量の変化によりこれ程の変化が塩水の侵入に関して考えられる。淡水中の流線の傾斜は非常にゆるやかになっている。

Photo. 3 においては Photo. 2 と比較して揚水量が 2 倍即ち $5\text{cm}^3/\text{s}$ となっただけである。Interface の形状はこの場合ほとんど変化せず、左方 15cm まででいていた塩水侵入 edge が消失している。淡水中の流線は Photo. 2 よりも下降し大体水平に近くなっている。写真の黒白よりみるに水槽 15cm 以下より流入している淡水が揚水されているようすである。流線が point sink に吸込まれていることはないからである。

次の Photo. 4 では揚水量 $q=7.5\text{cm}^3/\text{s}$ となっただけで Photo. 3 と他は同一である。この場合 Q が q と同一量となっている。Photo. 3 と比較して変化しているとみられるところでは、Interface が少し立ってきたことと、15cm の流線が point sink に吸込まれていることで

Photo. 1

Photo. 2

Photo. 3

Photo. 4

Photo. 5

ある。15mc 以下の淡水が完全に吸込まれていることを示している。この時流出量 Q は変化しそうなものであるが15cm 以上の砂層中での動水勾配の増大によるものかそれ程の変化は認められない。 $q = 0 \sim 3 \text{ cm}^3/\text{s}$ では15cm 以下の砂層の淡水の流動速度は非常にゆるやかである。

Photo. 5 においては $Q = 7.5 \text{ cm}^3/\text{s}$, $q = 2.5 \text{ cm}^3/\text{s}$, point sink の位置は5—30である。この場合塩水侵入 edge は左方30cm まで伸びてそれ以上左方には伸長しない。Interface は Photo. 1 と比較して上昇していることが判る。15cm のところの流線が横方向20~30cm のところで少しく下方に弯曲し、Interface 沿いに逆流しているようすがみうけられる。25cm の流線も40cm まで上昇し40~20cm で下方に弯曲しているのが見受けられる。

Photo. 6 においては $q = 5 \text{ cm}^3/\text{s}$ とした以外 Photo. 5 と他は同一である。この時15cm のところの流線は横25cm において完全に逆行し point sink に流入している。25cm における流線も下降する流速の成分があることを示している。塩水侵入の edge は30cm で直立したままである。

Photos. 7~11 で流出量 Q を $15 \text{ cm}^3/\text{s}$ とした場合前の Photos. 1~6 の流出量 $Q = 7.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合と比較して Interface が10cm 余後退していることが判る。この現象は一般的なことで上流で多量の揚水があって流出量が減少する場合侵入塩水の edge は伸長することを示している。写真において白く見える部分が後退した部分を示している。

Point sink の位置は5—30であるが揚水量 $0 \text{ cm}^3/\text{s}$ の時17cm 程度であった塩水侵入 edge が、揚水量が $q = 2.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ (Photo. 8), $5 \text{ cm}^3/\text{s}$ (Photo. 9), $7.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ (Photo. 10) になるにつれ僅か

Photo. 6

Photo. 7

ではあるが、左方に伸びていっていることが見られる。特に Photo. 10 において塩水侵入 edge が特異な形になっている。その上流線も特に揚水量 $q = 5 \text{ cm}^3/\text{s}$, $7.5 \text{ cm}^3/\text{s}$ において20~30cm 間に明瞭に下降曲線を描き、流速にこの間下方への流速成分のあることを示している。Photo. 10 において少しく逆流部分があるようである。

Photo. 11 では流出量 $Q = 15 \text{ cm}^3/\text{s}$, 揚水量 $5 \text{ cm}^3/\text{s}$, point sink の位置 5—20 とした場合である。20cm 以遠には塩水の侵入が認められない。Interface は 20cm で不連続となっている。また同一揚水量で point sink の位置が 5—30と比較して上昇している。

Photo. 8

Photo. 9

Photo. 10

Photo. 11

Photo. 12

Photo. 13

次に Photo. 12 では流出量 $Q=7.5\text{cm}^3/\text{s}$ で揚水量を極端に増大させ $q=22.5\text{cm}^3/\text{s}$ とした場合である。point sink 位置は15—30である。30cm より右における Interface は極端な上昇を示し、同様の揚水量である Photos. 7~10 と比較してその上昇ぶりが明瞭に判る。しかも 30cm より左方においての塩水の侵入は認められない。従って今まで 30cm より右方において地中への井戸貫入深度にもよるが少量の揚水で塩水の混入のなかった井戸も上流での過大な揚水のある場合塩水の混入する恐れが十分に生じることを示している。

左上方の Interface の尖端は point sink の位置を示している。しかも塩水の混入はまぬかれないことも示している。point sink 下の Interface は右の方に弯曲しているし、下端も30cm をこえていない。

Photo. 13 は Photo. 12 と同じく流出量 $Q=7.5\text{cm}^3/\text{s}$, 揚水量 $q=21.5\text{cm}^3/\text{s}$, point sink 位置 15—15を示している。

Photo. 14 は流出量 $Q=15\text{cm}^3/\text{s}$, 揚水量 $q=21\text{cm}^3/\text{s}$, point sink 位置は15—15である。

Photo. 14 と 15 の差異は point sink 下の Interface の形状の差異であり、塩水侵入の edge の先が Photo. 14 は左方 15cm 以上出ているが Photo. 15 は 15cm に止まっている。これは流出量の差異によるものである。point sink 下の Interface の曲率も Photo. 14の方が Photo. 15 に比較して大きい。このことは次の場合と合せて考察することとする。

そうすると地下水流のより上流において大量揚水を行った場合どうなるかということであるが、流出量 $Q=7.5\text{cm}^3/\text{s}$, で揚水量 $q=21\text{cm}^3/\text{s}$, point sink 15—45 とした場合を Photo. 15 に示す。Photo. 1 と比較して大きな差異が見られるであろう。揚水中の塩水混入は当然あり、塩水侵入区域は増大する。又 Interface の上昇も著るしい。point sink 下の Interface の曲率も大きくなっており、15cm 以下の地下水流の流速の増大を示している。このことは実際問題として地下水の上流での大量揚水を行なう工場等が設立された場合下流方向にある地下水使用場が大きな影響をこうむることを示している。

Photo. 14

Photo. 15

Photo. 16

Photo. 16 に point sink 15—30, 流出量 $Q=7.5 \text{ cm}^3/\text{s}$, 揚水量 $q=20 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合の流線を示す。25cm の流線が point sink 中に吸込まれていることが判る。35cm の流線も15—30cm 間で下方流速成分を有していることが知れる。

Point sink 下の Interface が立って海岸方向に弯曲するのはこの場合 point sink の位置が高さ15cmにあるとすると, それ以下の地下水流の速度が大きくなり, これが Interface にあたりその運動量が Interface に対する圧力となり, Interface を後退させ, 流線に沿って弯曲させるものとみられる。かくて両流体の圧力ポテンシャルの平衡位置に止るのである。

4. 結 論

1. 海岸近〜で淡塩水境界線 (Interface) 下で揚水を行うと, 塩水侵入 edge を後退させ得る。揚水中には最初塩水のみであるが淡水の割合は向上した場合にもよるが数%~10%になる。ただしこの時より上流で多大な揚水のない場合で相対的な問題となる。
2. 地下水流の上流での大量揚水は塩水の侵入域の増大をもたらすが, その揚水地点以上には及ばない。
3. 淡水 (地下水) の補給のよい場所では適当な揚水は塩水侵入 edge を後退させ得る。
4. 上流での揚水は揚水点下の Interface は海岸方向に弯曲する。

以上の実験報告は全実験の一部で Recharge basin, Diffusion well の報告は後日とする。

なお本実験にあたり協力した本学学生奥田, 岡田両君の労を多とするものである。

参 考 文 献

- 1) Henry, H. R. : Saltwater intrusion into freshwater aquifers, Journal of Geophysical Research, 64(11), 1959
- 2) Kashef, Abdel-Aziz L. : Model studies of salt water intrusion, Water Resources Bulletin, 6-6, 1970
- 3) Kawabata, H. : Study of the flow state of two layers' liquids through porous media, Bull. of Kyoto Gakugei Univ., B-16, 1960
- 4) Kawabata, H. : Free surface and interface of two liquids through porous media by pumping up, Jour. of Sci. of Hiroshima Univ., A-24-2, 1960
- 5) Kawabata, H. : The flowing states of undergroundwater near the sea strand, Bull. of Kyoto Gakugei Univ., B-17, 1961
- 6) Columbus, N. : Viscous model study sea water intrusion in water table aquifers, Water Resources Research, 1(2), 1965
- 7) Glover, R. E. : The pattern of fresh-water in a coastal aquifer, Jour. of Geophysical Research, 70-4, 1965
- 8) Glover, R. E. : A new method for predicting transient states of salinity intrusion into the Sacramento-San Joaquin Delta, Trans., American Geophysical Union, 36-4, 1955
- 9) Kohout, F. A. : A hypothesis concerning cyclic flow of salt water related to geothermal heating in the Floridan aquifer, Trans. of the New York Academy of Sci., II-28-2, 1965
- 10) 川端 博 : 揚水による塩水侵入についての模型実験, 日本地下水学会会誌, 15-1, 1973