

潮間帯における地下水の水質及び圧力水頭の変動に関する測定方法の検定

林 政輝*・小野寺真一**・竹井 務***

*広島大学大学院生物圏科学研究科

**広島大学総合科学部

***広島大学大学院工学研究科

Verification of piezometric method for the observation of dissolved component and pressure head dynamics in a tidal flat groundwater

Masaki HAYASHI*, Shin-ichi ONODERA**, Tsutomu TAKEI***

**Graduate School of Biosphere Sciences, Hiroshima University*

***Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University*

****Graduate School of Engineering, Hiroshima University*

Abstract: We carried out the verification of the piezometric method to observe concerning groundwater flow and solute transport under the unsteady state in the tidal flat. Especially, we considered whether solute moves and reacts instantaneously as pressure head changes in the tidal flat. The results of verification are summarized as follows, (1) The electric conductivity (EC) of water collected from the piezometer changed with the tidal fluctuation, and the variation was similar to that by buried EC sensor. Moreover, the variation accuracy increased by pulling out water in the piezometer just before water sampling. (2) The piezometric head (water table in the pipe) changed with the tidal fluctuation. Especially, it decreased with delaying during falling period of the tide level. This showed that pressure remained under the ground. (3) Our study corresponded to previous studies concerning between the groundwater and solute flux by the piezometric and catchment mass balance methods. Based on these results, we would apply this method to groundwater flow and solute dynamics in the tidal flat.

Keywords: Groundwater quality, Pressure head, Time series variation, Piezometer

I. はじめに

近年、沿岸海洋環境において、海洋への直接的な地下水流出とそれともなう物質輸送の重要性が指摘されている (Burnett et al., 2001)。従来、これらに対して流域水収支及び物質収支法による見積り (Zektser and Loaiciga, 1993など)、トレーサー法による見積り (Moore, 1996など)、シーページ (地下水漏出) メータ法による見積り (谷口, 1992など)、数値モデルによる見積り (Spinelli et al., 2002など) が行なわれてきた。ただし地下水流動及び、それともなう溶質輸送を解明するためには、

地表面下において土粒子間の間隙水というマイクロスケールレベルとともに、連続した流体としての地下水というマクロスケールレベルでも評価することが必要である (July et al., 1990)。すなわち、従来の多くの研究のように、海底地下水湧出の測定に主眼を置くだけではなく、地下水流動やそれに含まれる溶質の動態を計測することが必要となっている。一方、Hill et al. (2000) は、河川近傍の地下水流出域において径13mmのパイプを多数設置し、流出域の物質変化を詳細に明らかにした。この方法は、従来径80mm程度のパイプを同様に地下に埋設し、地下水の水圧測定や採水に利用してきたピエゾメーター法を、より細かいパイプの利用に改良したものである (Freeze and Cherry, 1979)。

ピエゾメーター内に現れる水面高は、その管底の位置するポイントの圧力ポテンシャル (圧力水頭) を表し、多数のポイントでの計測から、地下の圧力水頭分布を明らかにすることができ、地下水流動を確認することができる。また、設置したピエゾメーターから水を採水することで、地下水の溶存成分の分布を明らかにすることもできる。さらに、ピエゾメーターにより地下水水質及び圧力水頭の時系列変化が正確に測定することが可能であれば、例えば潮間帯のように潮位変動によって非定常に地下水水質や水理ポテンシャルが変化している場所において、潮位変動に対応した詳細な地下水流動の変化を捉えることが可能になると言える。

しかし、これまで、ピエゾメーター内に存在する水が、その地点の地下水水質の時系列変化に対応しているか、さらに、管内に現れる水位がその地点の地下水ポテンシャル変化を反映しているかを確認した例は少なく、特に、密度の異なる流体の存在する潮間帯において、確認された例はない。浅い深度であれば、ピエゾメーターは比較的容易に設置できるため、多点における測定も可能であり、地下水研究において、非常に有用な可能性を秘めている。そのため、ピエゾメーターによる測定法の検定が必要である。

本論では、ピエゾメーター法による沿岸域の地下水流動及び物質輸送に関する測定について、特に時系列測定について、検定を行なうことを目的とする。

II. 実験地及び調査方法

本研究で使用するピエゾメーターには、内径13mm (外形17mm) の市販の塩化ビニール製パイプを用いている。地下水の水質及びポテンシャルの時系列変化を正確に捉えるには、管内の水の入れ替わり時間をなるべく短くする必要がある。そのため、パイプはなるべく細いものを用いることにした。また細い径のパイプは設置がより簡便であり、多地点に設置するのに適している。

II-1 地下水水質変化の検証

水質を評価する指標の一つに電気伝導度 (EC) が挙げられる。ECは多くの自記記録用の測器があり、長期間の計測も可能な指標である。海水のECは非常に高く、逆に陸域の淡水である地下水は低い。これらが混合した状態で存在している潮間帯地下水は、ECによって淡水-海水の混合率を示すことができる。そこで本研究では、ピエゾメーター内の水質の時系列変化を捉えるため、潮間帯においてEC計を用いて検証した。

観測は、広島県呉市川尻町の七浦海岸 (図1-b) の潮間帯において行なった。陸-海方向に2地点 (A-B)、各地点に4本のピエゾメーターを深度50cmに設置し、1時間半おきにピエゾメーター内の水を10cc採水し、採水した水をポータブルEC計 (DKK-TOA CORPORATION CM-21P) によってECを測定した。採水は内径2mm (外径4mm) のビニールチューブを管底まで挿入し、減圧吸引して行なった。

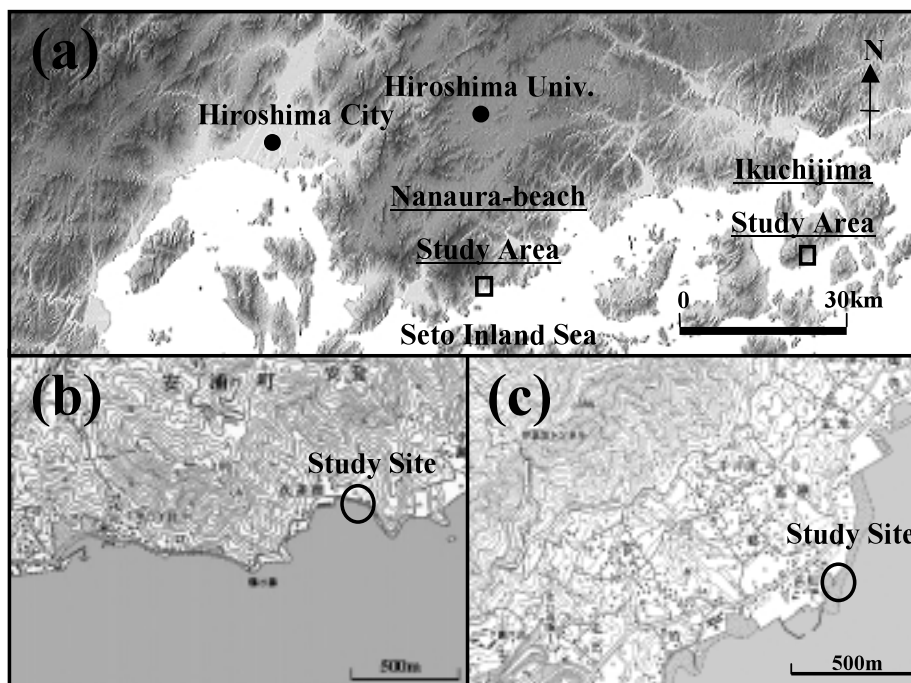


図1 実験地域

- (a) 実験地域概要
- (b) 七浦海岸実験地周辺図
- (c) 生口島実験地周辺図

ここで、ピエゾメーター内の水は置き換わりにくいため、1時間半間隔で採水を行なう場合であれば、管内の水は地下水成分が1時間半の間変化し混合した状態であり、地下水成分の時系列変化を正しく示していない可能性が考えられる。そこで、採水前に管内の水の抜き出しを行ない、抜き出した後、管内に回復してくる水の採水を行なう。1) 抜き出しを行なうタイミングを1時間前、2) 30分前、3) 抜き出しを行なわない場合で比較検討を行なった。さらに水面観測用のピエゾメーターを1本設置し、抜き出しを行なうタイミングによる管内の水位回復に変化が起きるか検討した。

ピエゾメーター内の水のEC測定と同時に、同じ地点の同深度にポータブルEC計（DKK・TOA CORPORATION CM-21P）を直接埋設し、10分間隔の自記録を行ない、ピエゾメーター内の水が地下水成分の時系列変化と対応しているか検討した。

観測は2005年9月15日14:30~16日14:00（以後、観測 i）、2005年9月27日11:30~17:30（以後、観測 ii）に行なった。

II-2 圧力水頭変化の検証

観測は、広島県豊田郡瀬戸田町（生口島）の南東に位置する海岸（図1-c）の潮間帯に、ピエゾメーターを深度100cmに設置し、およそ2時間おきに管内に現れる水面（圧力水頭）のマニュアル計測を行なった。管内水深の測定は、水面計のコードを管内に挿入し管頭から水面までの距離を測定し行なった。

観測は、2005年7月13日9:15~21:10（以後、観測iii）に行なった。

Ⅲ. 結果と考察

Ⅲ-1 地下水水質の時系列変化

観測期間中の潮位変化・ピエゾメーター内のEC測定値・直接埋設したEC計による測定値で、観測 i のものを図2に、観測 ii のものを図3に示す。

観測 i では、ピエゾメーターから採水した水と、直接埋設したEC計による測定値に20mS/cm程度の差がある。また、自記記録によるECの変化は潮位変動に対応しておらず、EC計によって、正確なECの測定ができていなかったと考えられる。これはEC計の設置の際、センサー部分に土粒子が多量に付着していたことが影響したと考えられる。ピエゾメーター内の水のECは陸側のA地点(図2-上)では潮位変化に対し逆相関を示し、海側のB地点(図2-下)では潮位変化に対し正の相関を示した。ピエゾメーター法は、地下の測定ポイントから地表面上までパイプを通すため、その地点が水面下となった場合には、水がパイプの側壁を伝い地下まで侵入する可能性をはらんでいるが、A地点の結果では潮位上昇によってECが下がっており、海水がパイプの側壁を伝って浸入していないことを示し

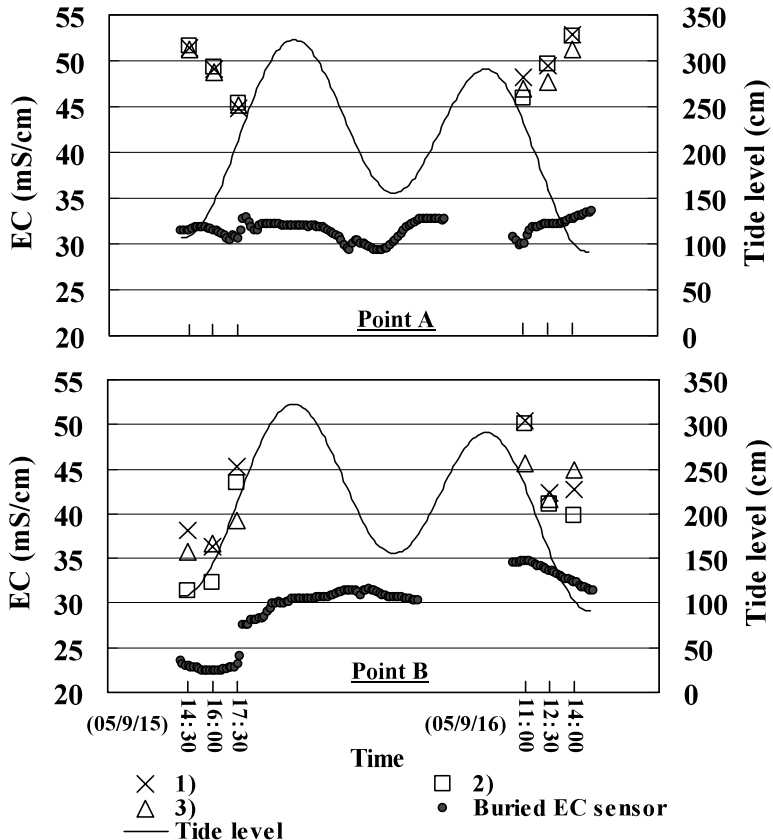


図2 観測 i における、ピエゾメーター内・埋設したEC計のEC変化、潮位変動

※管内水の抜き出しのタイミング

- 1) 採水1時間前
- 2) 採水30分前に
- 3) 抜き出しを行わない

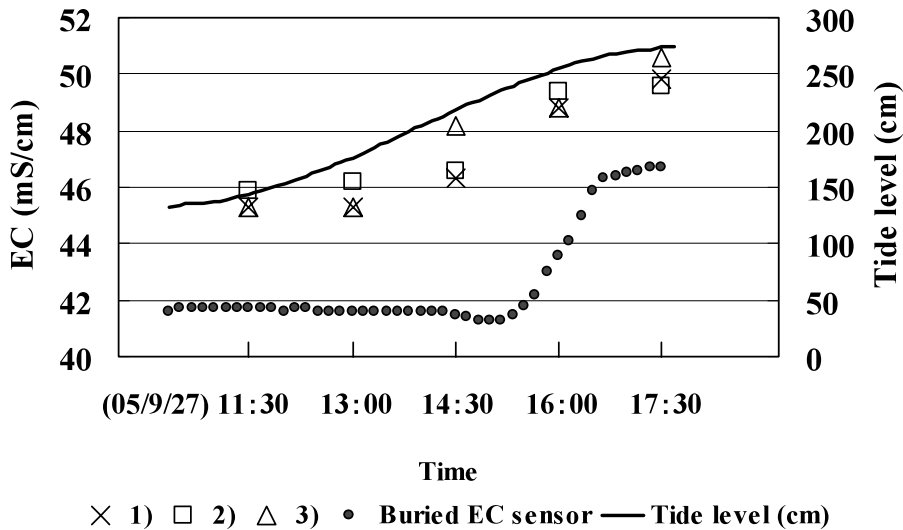


図3 観測iiにおける、ピエゾメーター内・埋設したEC計のEC変化、潮位変動
 ※管内水の抜き出しのタイミング
 1) 採水1時間前
 2) 採水30分前に
 3) 抜き出しを行わない

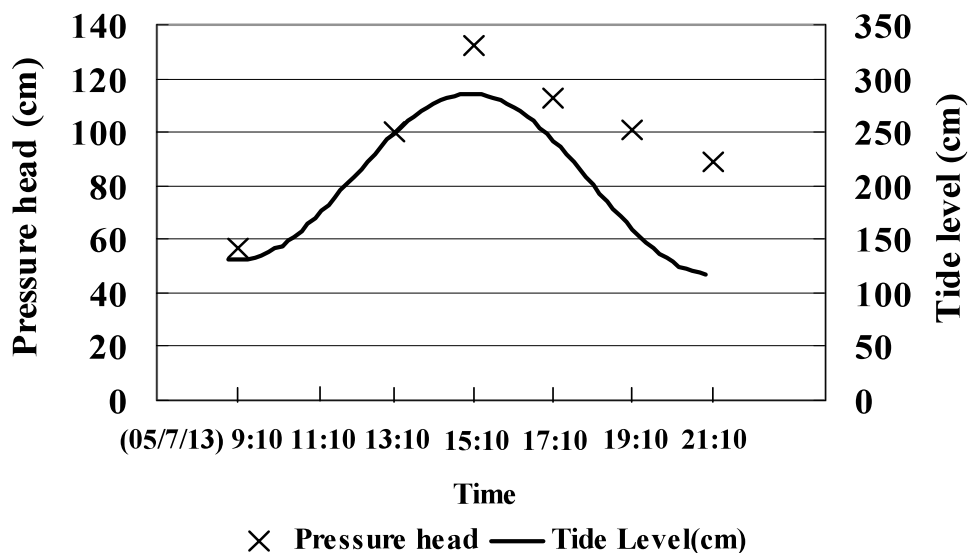
ている。

観測iiでは、観測iの結果を踏まえ、EC計のセンサー部分に細かいメッシュを巻き、土壌粒子を遮断し水のみ通過させる加工を施した。その結果、図3を見ると、EC計の測定方法は改善され、ピエゾメーターから採水した水のEC測定値と、直接埋設したEC計での測定値の差は小さくなった。また、埋設したEC計の測定値は、潮位変動に対応して変化するようになり、測定方法が改善されたことが分かる。およそ14:30以降、ピエゾメーターが海水面下に水没しており、地下への海水浸入によって、それ以降の各EC測定値は上昇している。相対的に、ピエゾメーター内の水が示すEC値は、直接埋設したEC計での測定値とほぼ同様の傾向を示すと考えられる。

さらに、採水前に行なった管内水の抜き出しのタイミング別に見ると、3) 抜き出しを行わない場合で、直接埋設したEC計の測定値とのばらつきが最も大きくなっている。1) 1時間前の場合では、ECが次第に上昇する様子が示されており、2) 30分前の場合では、直接埋設したEC計で示される、15:30以降にECが顕著に上昇することが示されている。観測iiにおける、異なる水の抜き出し条件の各々のピエゾメーターにおいて、管内の水位は、水位測定用パイプと等しかった。したがって、今回の観測では、より短い間隔で抜き出しを行なうことにより正確な時間変化を捉えることが可能であったと考えられる。この結果から、ピエゾメーターより採水した地下水試料は、その地点の地下水の時系列変化を反映しており、より正確な時系列変化を捉えるために、透水性や周囲の水理ポテンシャルによって変化する管内水位の回復時間を考慮し、採水前のなるべく近いタイミングで管内の水を吸い出すことが必要であることが示された。

III-2 圧力水頭の時系列変化

観測期間中の潮位変化とマニュアル計測によるピエゾメーター内の圧力水頭変化を図4に示す。ピ



× Pressure head — Tide Level(cm)

図4 観測iiiにおける、圧力水頭変化、潮位変動

エゾメーターの圧力水頭は、潮位変化に対応し変動しており、潮位上昇に伴って上昇し、潮位の下降に伴い下降することが確認できる。しかし、潮位上昇に伴う圧力水頭の変化はほぼ同様の傾向を示している一方で、下降に伴う圧力水頭の変化はやや遅れをとめない、緩やかな下降を示している。これは、潮位が低下した後も、地下では圧力が残存するためと考えられる。

ピエゾメーター内に現れる圧力水頭は、埋設地点の地下水ポテンシャルの時系列変化に対応し、変化していることが確認された。さらに、ピエゾメーター内の圧力水頭変化は、土壌の透水性や圧力ポテンシャルに影響される、管内の水の入れ替わり時間に関係していると考えられ、管内の水の入れ替わりにかかる時間がより短い環境で、正確な圧力水頭の時系列変化の測定が可能であると考えられる。

厳密には、海水と淡水には密度の差があるため、水頭の高さの値のみでは正確な圧力水頭の値を示しているとは言えない。しかし、海水の密度を平均的な値 1.025g/cm^3 、淡水の密度約 1g/cm^3 として計算した場合、淡水100%の水柱重量は、海水100%の水柱重量の約97.6%で差は殆どない。また、実際には、潮間帯地下に存在する水は淡水-海水が混合した状態で存在しており、竹井ら(2005)が行なった生口島試験地の調査では、潮間帯地下水では海水が90%以上混合した状態で存在していることを示している。すなわち、潮間帯におけるピエゾメーターでの観測では水質の変化による水柱の密度の変化は極めて小さく、密度が圧力水頭に与える影響は極めて小さいため、無視できると考えられる。

Ⅲ-3 地下水流出及び物質負荷計測への適用例

竹井ら(2005)は、潮間帯においてピエゾメーター法による観測を行ない、潮間帯での陸域起源の地下水流出量を求め、年間地下水流出量 $3.58 \times 10^3 \text{m}^3$ という結果を得た。この結果は、背後流域の降水量と蒸発散率及び河川流出率から、水収支によって求めた年間地下水流出量 $3.13 \times 10^3 \text{m}^3$ と高い整合性を示している。また林ら(2005)では、背後に果樹園が広く分布し、窒素肥料の散布によって地下水中に高濃度の溶存窒素を保持する、斜面に面した潮間帯において、ピエゾメーター法による観測を行ない、陸域から海へ流出する地下水中に含まれる溶存窒素量の算出を行なった。その結果を用いた

潮間帯での溶存窒素収支によって、陸域で負荷される窒素量に対し、海へ流出する溶存窒素量は18.5%まで減少していることが示され、潮間帯において自然浄化と考えられる溶存窒素の消失を確認した。

これらの研究で示されるように、ピエゾメーター法による多地点での観測結果は、流域といった大きなスケールでの地下水流出量の評価と整合する結果が得られ、地下水流出にともなう物質輸送の解明においても評価可能な方法と言える。今後は、他の直接測定法（シーページメータ）との比較などを行ない、より精度の高い測定法を確立してゆく必要がある。

IV. おわりに

本論では、ピエゾメーター法による地下水流動及び物質輸送に関する測定について検定することを目的とした。特に塩水-淡水の混合する潮間帯での使用を前提として、非定常な測定と対応できることを目指した。時系列測定による地下水水質及び圧力水頭変化の測定方法の検定を行った結果は以下のとおりである。

- 1) ピエゾメーター内の水の水質が、周囲の地下水水質の時系列変化に対応し変化していることを確認した。また、採水前に管内の水の抜き出しを行なうことにより、地下水水質の時系列変化をより正確に捉えることができることを示した。
- 2) ピエゾメーター内に現れる水面（圧力水頭）は、設置地点の地下水ポテンシャルを反映し変化していることが確認された。特に、潮位の減水期に対して、地下の圧力水頭の値が遅れて低下し、圧力が残留する様子が捉えられた。
- 3) ピエゾメーター法による地下水流動及び物質輸送量の見積りは、流域スケールでの水・物質収支法による実例と整合する傾向を示した。しかし、この方法による研究例はまだ少なく、観測の精度をより高めるため、他の手法との比較を行なっていくことが必要である。

引用文献

- Burnett, W.C., Taniguchi, M. and Oberdorfer, J. (2001): Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone, *J. Sea Res.* 46: 109-116
- Freeze R. A. and Cherry, J.A. (1979): *Groundwater*, John Wiley and Sons, 604.
- 林政輝, 小野寺真一, 竹井務, 斎藤光代, 峯孝樹 (2005) :沿岸地下水の海水混合域における窒素流出過程, ABSTRACTS 2005 Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, H081P-003
- Hill, A.R., Devito, K.J., Campagnolo, S. and Sanmugadas, K. (2000): Subsurface denitrification in a forest riparian zone: Interactions between hydrology and supplies of nitrate and organic carbon, *Biogeochemistry*, 51: 193-223
- July, W. A., Dyson, J. S. and Butters, G. L. (1990): A transfer function model of field scale solute transport under transient water flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 327-332
- Moore, W. S. (1996): Large groundwater inputs to coastal waters revealed by 226Ra enrichment, *Nature*, 380: 612-614
- Spinelli, G. A., Fisher, T., Wheat, C. G., Tryon, M., Tryon, D. M., Brown, K. M. and FlAegal, A. R. (2002): Groundwater seepage into norther San Francisco: Implications for dissolved metals budget, *Water Resour. Res.*, 38

- 竹井務, 小野寺真一, 林政輝 (2005): 瀬戸内海沿岸の潮間帯における海底地下水湧出, ABSTRACTS
2005 Japan Earth and Planetary Science Joint Meeting, H081P-002.
- 谷口真人 (1992): 自記地下水漏出量計の開発と琵琶湖湖底での適用, 日本水文科学会誌22: 53-77
- Zektser, I.S. and Loaiciga, H. A.(1993): Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past,
present and future. J. Hydrol., 144: 405-427