

温暖化による沿岸域の水環境変化のメカニズム に関する研究 日比 義彦 (名城大学)

Study of a Mechanism for changing Water Environment on a Shore of Sea by Global Warming Yoshihiko Hibi (Meijo University)

Abstract :

The purpose of this study is to investigate how fresh water is distributed in a porous medium and surface water on a shore of sea by using a water tank with the internal length 182cm, the depth 60cm, and the width 13.5cm. Two experiments were conducted in this study. In first experiment, glass beads were packed into the water tank up to a height of 40cm on the left side and up to the height of 20 cm on the right side of the water tank (Case1). Then in Case1 water level in fresh water tank installed on the left side of the water tank was 32.4 cm to 33.7 cm above the bottom of the water tank, and then the water level in the seawater tank installed the left side of the water tank was 30.4 cm to 30.5 cm above the bottom of the water tank. In secondary experiment the glass beads was packed up to 42.5cm on the left side and 20.0 cm like Case1 on the right side of the water tank (Case 2). Water level was 38.2 cm to 38.9 in the fresh water tank and 35.8 cm to 36.1 cm in the seawater tank in Case 2. Because a rate of discharge from the porous medium to the surface water filled with seawater in Case 1 was less than that in Case 2, the concentration of salt in the surface water did not decrease in Case 1. However the concentration of salt decreased, and then the fresh water was distinguished from seawater in surface water in Case 2. Moreover a boundary between the seawater and the fresh water in the porous medium was distinct in Case 1, however this boundary was indistinct since the fresh water infiltrated into the porous medium occupied with seawater in Case 2. Thus, when water level in seawater rises, the concentration of salt increases and the boundary between the seawater and fresh water move onshore.

1. はじめに

地球温暖化¹に伴う海面上昇が指摘されてからか久しい。海面が上昇すれば,海浜付近の地下水 の塩淡水境界は陸側に移動し,陸側で地下水の塩水化が進むことなる。また,海岸堤防の背面の湖 沼または汀線付近の海水などの表面水の塩分濃度も変化する。このことにより海浜付近の動植物に 影響を与える可能性がある。

海浜付近の地下水については、塩水楔を形成することが古くから知られている(例えば、神野ら²)。 また、海浜付近の海底では、淡水である地下水が湧水する海底地下水湧出現象が観測(例えば、徳 永ら³、石飛ら⁴)されている。さらに、このような海底では、海水が一旦海底に潜り再度海洋へ流 出する海水の再循環水(Robinson and Barry⁵⁾、石飛ら⁴)も観測されている。なお、海水の再循環水 については、潮汐が原因で生じることがBoufadel⁶⁾、Robinson and Barry⁵⁾とLi et al.⁷⁾などにより 指摘されている。

しかし、これまでの沿岸域での塩水化に関する研究では、海水を含めた表面水の塩分濃度の変化 を取り扱ってこなかった(例えば、神野ら²⁾、Robinson and Barry⁵⁾、Boufadel⁶⁾、高橋昌弘ら⁸⁾。し かし、海水の再循環水と海底地下水湧出現象は汀線付近の海水の塩分濃度を変化させる可能性があ る。当然、塩淡水境界の移動に伴い、汀線付近に分布する湖沼の水質は変化する。このように汀線 付近の湖沼および海水の塩分濃度の変化は、その周辺の生態系に影響すると考えられる。著者が知 る限りでは、これまでに、表面水の塩分濃度変化を考慮した実験と数値解析の事例は、日比ら⁹に より行われた、海岸堤防の背面側の湖沼への海水の浸入を遮断した場合の湖沼の水質変化を求める ための室内実験が挙げられる程度である。なお、この実験をきっかけに、Hibi and Tomigashi¹⁰は 表面水と地下水の流れと、化学物質の物質移動を同時に解析することができる数値解析手法を開発 した。そこで、今回の研究では、海面上昇に伴い汀線付近の地下水と表面水(海水)の塩分濃度がど のように変化するか水槽実験で求めた。なお、将来的に、本研究で求められた水槽実験のデータ は、上記のHibi and Tomigashi¹⁰が開発した数値解析の検証用データとして用いる。

2. 実験方法

土試料または水を入れる水槽の大きさは、図-1に示すように横幅182m、深さ60m、奥行幅 13.5cmとなり、水槽の両サイドにステンレス製の金網を隔てて淡水または塩水の貯留槽を設置し た。図-1の左側が淡水用貯留槽であり、右側が塩水用貯留槽となる。塩水または海水は貯留槽の 側面に設置されたホースニップルを通して、淡水はマリオットタンク、塩水はタンクから貯留槽に 供給された。淡水側の貯留槽の水位は、マリオットタンクにより設定され、塩水側の貯留槽の水位 はホースニップルから水を排出することにより設定された。今回の実験では、図-1に示す位置に 土壌水分計、間隙水圧計、テンシオメーター、塩濃度計とピエゾメーターを設置し、土試料の体積 含水率、間隙水圧とサクションを測定し、さらに、水の塩分濃度と水温を測定した。

水槽には、土試料の体積含水率を測定する土壌水分計を10か所設置した。土壌水分計としては、 見掛けの誘電率を測定して体積含水率を求めるDecagon 社製のEC-5(体積含水率測定範囲:0~間



図-1 実験装置の概要

隙率,分解能:0.001)と5TE(体積含水率測定範囲:0~0.5,分解能:0.0008)をそれぞれ5台ずつ 用いた。これらの土壌水分計の体積含水率は,Decagon社製のデータロガーEm5b(EC-5用)と Em50(5TE用)を用いて5分毎に測定された。今回の実験で用いたガラスビーズ0.2mm(密度2.5g/ cm³,粒度分布0.177~0.25mm)を用いて求めた以下のキャリブレーション式により測定した体積 含水率を補正した。

EC-5の場合

淡水
$$\theta_{w} = -0.8744 V_{w}^{2} + 1.2809 V_{w} - 0.0271$$
 (1a)
塩分濃度3% $\theta_{w} = 0.5363 V_{w} - 0.0146$ (1b)

5TEの場合

淡水
$$\theta_{\rm w} = 0.5263 V_{\rm w}^2 + 1.512 V_{\rm w} - 0.053$$
 (2)

ここで、V_{*}は土壌水分計で測定した値であり、θ_{*}は補正した体積含水率である。なお、塩分濃度 3%の塩水を5TEで測定すると測定可能な上限値をオーバーした。

Decagon 社製の5TEは体積含水率以外に電気伝導度を0~23dS/mの範囲で測定することができ るので、土試料中の水の塩分濃度を5TEで5分毎に測定した。塩分濃度は測定した電気伝導度に校 正係数(TE1:0.230, TE2:0.217, TE3:0.201, TE4:0.222, TE5:0.237)を乗じて求めた。校正係 数は、水槽内に3%の塩水を投入し、その後にガラスビーズを投入した時点で測定した電気伝導よ り求めた。表面水中の塩分濃度を測定するために塩分濃度計(株式会社ケネック 検出部MTK2-30-04型 指示計MK-403型,校正係数0.6696)を設置した。なお、水槽内の水温は5TEで5分毎 に測定した。 土試料中の間隙 水圧を測定するた めの間隙水圧計を5 か所と、土試料中 の不飽和領域のサ

表-1 各ケースの土試料と流体の物性値 淡水に対する 水温 淡水の密度 塩水の密度 ケース 間隙率 塩水の密度比 (°C) (g/cm^{2}) (g/cm^{2}) ケース1 17.0~19.1 0.410 0.999 1.022 1.023 ケース2 15.5~19.1 0.405 0.999 1.023 1.024

クションを測定するためにテンシオメーターを5か所設置した。実験中に不飽和領域になる可能性 ある位置にテンシオメーターを設置し、実験を通して飽和状態となる位置に間隙水圧計を設置し た。間隙水圧計に、東京測器研究所製の小型圧計PTD200KPB(測定範囲0~200kPa,分解能 0.01kPa)を用いた。また、テンシオメーターについては、東京測器研究所製の小型間隙水圧計 KPE200KPB(測定範囲0~200kPa,分解能0.01kPa)のセラミックフィルターをニッカト製セラ ミックフィルター(気孔率43%、空気侵入圧270kPa)に交換して用いた。間隙水圧とサクションは、 東京測器研究所製TDS302データロガーを用いて5分毎に測定された。また、土試料内の飽和領域 内の14か所にピエゾメーターを設置して目視で土試料中の全水頭を測定した。

今回の研究では、地下水の海底面からの流出が少なく汀線付近の海水が希釈されづらいケース と、淡水である地下水の海底面からの流出が多く、汀線付近の海水の塩分濃度が希釈されるケース の2ケースについて水槽実験を行った。なお、今後、前者をケース1、後者をケース2と称すること とする。今回の実験では、海底面からの地下水流出が多く、海水の塩分濃度が希釈されたケース2 を海面が上昇する前とし、地下水流出が少なくなり海水の塩分濃度が希釈しなくなったケース1を 海面が上昇した後と想定した。

ケース1の地形は、水槽の左側(淡水側)で水槽の底より40.0cm とし、水槽の右側(塩水側)で水 槽の底より20.0cmとした。また、淡水側の貯留槽の水位の設定目標は実験開始から23時間まで水 槽の底から31.5cm、23時間~62時間まで32.5cm、62時間以降33.5cmとし、塩水の貯留槽の水位 の設定目標は水槽の底から30.5cmとした。一方、ケース2の地形は水槽の左側(淡水側)で水槽の底 より42.5cm とし、水槽の右側(塩水側)で水槽の底より20.0cmとした。また、淡水側の貯留槽の水 位の設定目標は水槽の底から38.8cm、塩水の貯留槽の水位の設定目標は底から30.5cmとした。前 者と後者の地形勾配と水位を変更した理由は、前記のような塩分濃度の分布状況を再現しやすくす るためである。

地形を水槽内に作成する際には、最初に水槽内に塩水を注入し、間隙水圧計とテンシオメーター のフィルターとこれらに内蔵された圧力計の受圧面の間を流体で満たし、その後、自由落下により ガラスビーズ0.2mmを水槽内に詰めた。ケース1とケース2で水槽内に詰めたガラスビーズの試料 の間隙の差は表-1に示すように0.05と小さく、ケース1とケース2ともに同じような間隙率となっ た。また、ケース1とケース2で用いた塩水の密度の差は0.001であり、実験結果に大きく影響する 塩水の密度差ではない。また、実験は恒温室で行わなかったので、実験を実施した際の気温に影響 された、ケース2がケース1より実験中の水温差が大きかった。

各ケースの測定に際しては、塩水の移動を視覚的に捉えることができるように塩水をウラニン (フルオレセイナトリム)で染色し、水槽の透明なアクリル側の側面をビデオ撮影した。

3. 実験結果

(1)間隙率と体積含水率

土壌水分計で測定した体積含水率の深さ方向の分布を図-2に示す。図-2の縦軸は、水槽内の水 位を0とし、水位より浅い場合を-、深い場合を+とした。土壌水分計5TEで測定した体積含水率 は、ケース1の実験開始から72時間後の深さ7.25cmとケース2の深さ0.79cmを除いて、ケース1と ケース2ともに、水槽内に投入したガラスビーズの質量とその体積より求めた間隙とほぼ同じと なった。ケース2の深さ0.79cmについては地形の表面ぎりぎりであり、センサーが十分にガラス ビーズ内に埋まっていなかったことが原因である。また、ケース1の経過時間72時間の深さ7.25cm の体積含水率については、経過時間72時間でセンサーの不具合が生じたと推定さられる。

一方,土壌水分計EC-5で測定した体積含水率は、ケース1の経過時間72時間の深さ16.0cmと ケース2の経過時間69時間の深さ23cm を除いて0.35から0.37となり、深さ方向にほぼ一定な値を 示した。また、土壌水分計EC-5により測定した体積含水率と間隙率に若干の差が生じた。この 原因として、土壌水分計EC-5のキャリブレーション式が適切でなかったことが考えられる。し かし、土壌水分計EC-5の体積含水率の結果より、ガラスビーズは均一に水槽内に詰められ、間 隙は両ケースともに同じような値になったと判断できる。従って、両ケースでガラスビーズの詰め 方による物性値の違いは生じなかった。

塩水作成の際に水を攪拌することより塩水の中に空気が溶解し、実験中に、時間とともにガラス ビーズを詰めた試料内に空気の気泡が発生したことが、間隙率、土壌水分計EC-5と土壌水分計 5TEにより求めた体積含水率に差が生じた原因である可能性がある。しかし、詳細には、今後検討 する必要性がある。



図-2 体積含水率の深度分布

(2) 塩水の移動と塩分濃度

ビデオカメラで撮影したケース1とケース2の淡水の侵入過程を図-3に示す。 実験開始から28時間経過した時点のケース1では,淡水側の貯留槽の水位が水槽底より32.4cm,



塩水の水位が30.5cmとなり,淡水の貯留槽と塩水の貯留槽の水位差は1.9cmとなった。一方,ケー ス2では,淡水側の貯留僧の水位が水槽底より38.9cm,塩水側の貯留槽の水位が35.8cmとなり, 淡水の貯留槽と塩水の貯留槽の水位差は2.4cmとなった。この結果,図-3に示すように,両ケース ともに塩水で満たされた水槽内へ淡水が侵入し,実験開始より28時間経過した時点では塩水楔を 形成し,視覚的に塩水と淡水を明確に区分できた。ケース1で淡水の貯留槽と塩水の貯留槽の水位 差を3.2cm(淡水側の貯留槽の水位を33.7cm,塩水の水位を30.4cm)とした経過時間72時間でも, 経過時間28時間と同様に塩水と淡水を明確に区分できた。しかし,ケース2の経過時間69時間で は,塩淡水境界とガラスビーズを詰めた試料の表面が交差する付近で塩水と淡水の境界が不鮮明に なった。

土壌水分計5TEで測定したガラスビーズ内の塩分濃度は、塩淡水境界より離れた位置であれば、 両ケースともに淡水が0%となり、塩水が2.8%から3.0%

で塩水作成時に近い塩分濃度となった。ケース1については,経過時間72時間に塩淡水境境界の位置で塩分 濃度が1.4%となった。ケース2については,塩淡水境 界付近で0.1%となった。そこで,ケース2では,ガラ スビーズの表面付近の塩水の希釈の状況を把握するた めに,急遽,ガラスビーズ表面から塩分濃度計を水槽 左端から89cm,ガラスビーズを詰めた試料表面から 7.3cmの位置に追加した。その結果,ケース2では,経



図-4 ケース2 69hの塩淡水境界の拡大

過時間28時間ですでにガラスビーズを詰めた試料の上端から7.3cmの位置で塩分濃度が0.7%となった。しかし、この位置での塩分濃度は、経過時間69時間になってもかわらなかった。

ケース1の実験開始から28時間後の塩淡水境界は、水槽の左側より6cmから80cmに位置し、緩い勾配となった。一方、ケース2では、塩淡水境界が水槽の左側より60cmから80cmに位置し、 ケース2の塩淡水境界の勾配は、ケース1より急となった。前記したようにケース1で淡水の貯留 槽と塩水の貯留槽の水位差を3.2cmとした経過時間72時間では、塩淡水境界が水槽の左側より 80cmから95cmに位置し、経過時間72時間の塩淡水境界の勾配が急になった。一方、ケース2の経 過時間69時間の塩淡水境界の位置は60cmから90cmとなり、経過時間28時間の塩淡水境界の勾配 より若干緩くなった。ケース1の最終的な塩淡水境界の勾配は、ケース2の最終的な塩淡水の勾配 に比較して若干急となった。

また、ケース1では、実験開始から最終時間の72時間まで表面水の塩分濃度は目視的には変化は みられなかったが、ケース2の経過時間28時間で、表面水の水面から5cmの深さまで淡水が侵入し、 さらに経過時間69時間ではほぼ深さ11cmまで淡水となった。その影響で、淡水がガラスビーズを 詰めた試料の表面から試料内へと侵入し、図-3(f)に示すように塩淡水境界が明確とならなくなっ た。図-3(f)に示す塩淡水境界が不明瞭となった箇所の拡大写真を図-4に示す。図-4によると表面 水の塩淡水境界付近のガラスビーズを詰めた試料の表面より淡水が薄く侵入していることが分か る。従って、地下水の流れが速く、かつ、地下水の海底流出が多い場合には、海底付近の海水の塩 分濃度を薄める効果がある。しかし、海水面が上昇して地下水の流速が遅くなり、かつ、海底の地 下水流出量が少なくなると、海水は本来の塩分濃度となる。この塩淡水境界の変化にともない汀線 付近の生態系に影響を与える可能性がある。

(3) 圧力分布と全水頭

ピエゾメーターにより測定された,最終時間の全水頭の等高線と,その等高線を基に求めた流向 と相対的な流速を図-5に示す。図-5(a)によると,実験開始から72時間のケース1の全水頭は淡水 側(水槽の左端)から塩水側(右端方向)に低下し,それにともない,鉛直な水の流れは遅く,淡水側 から塩水側への水平な水の流れが卓越した。水槽左端から36cmまでの全水頭の勾配は他の箇所よ り急であり,塩水側に近づくほど全水頭の水平方向の勾配は緩やになった。さらに,塩水内では全 水頭の勾配がほとんど生じていない状態となった。このことより,水槽左側の淡水が水槽内に流入 する付近では水平方向の流速が早いが,次第に塩水に近づくほど遅くなり,塩水域内の流速は淡水 の水槽内への流入箇所付近に比べてかなり遅くなった。

ガラスビーズを詰めた試料の表面が淡水化したケース2では、図-5(b)に示すように淡水が流入す る付近(水槽の左側)で全水頭の勾配が若干急になり、淡水から塩水方向への水平な流れが卓越し た。しかし、塩淡水境界付近の淡水の流れは、塩淡水境界に沿って上向きの流れが生じた。一方、 塩水側では、塩淡水境界から塩水側にほぼ30cm離れた測点の全水頭が周辺の全水頭より3cmから 4cm程度低くなった。この測点の実験前の全水頭は周辺の測点の全水頭に比較して極端に小さい値 を示していなかった。また、ここでは示していないが、この測点の全水頭は、表面水の淡水化とガ ラスビーズを詰めた試料の表面の淡水化が進行するに伴い低下する傾向を示した。この測点を除い たほかの塩水域内の全水頭ではほぼ差がない状態であり、水の流れは遅く、一定な水の流向の傾向 はみられなかった。ケース2についても塩淡水境界からほぼ30cm塩水側に離れた測点の全水頭を除



図-5 全水頭の等高線と水の流向流速

くと塩水の流速はケース1と同様に遅く、淡水の流速が早くなった。

表面水内と、塩淡水境界付近で試料の表面から試料内へ淡水が侵入をしていないケース1では複 雑な流れにならなかったが、表面水内とガラスビーズを詰めた試料の表面へ淡水が侵入したケース 2では塩淡水境界付近で複雑な流れとなった。ケース2では、塩淡水境界からほぼ30cm塩水側に離 れた測点の全水頭が正しいとすれば、ガラスビーズを詰めた試料中に表面水中の淡水を塩水側に侵 入させる大きな流れが生じたことになる。しかし、この測点の全水頭のみが他の測点の全水頭より 極端に小さいことを加味すると確認のために追加実験が必要である。

図-6には、ケース1とケース2で得られた水圧またはサクションと体積含水率の関係を示す。図 -6によると、ケース1とケース2ともに水圧とサクションは体積含水率に関係なく一定となった。 このことより、今回の実験では、最大のサクションである-1.3kPaでもサクションの絶対値は空 気侵入圧を超えなかったことが分かった。従って、体積含水率を設置した最も高い位置(水槽の底 から35.5cm)でもガラスビーズを詰めた試料内は飽和状態であった。

4. まとめ

今回の実験では、海底からの地下水流出が少な い場合と多い場合の2ケースを想定した。2ケース ともに同じよう間隙率なり、かつ、土壌水分計の 結果より深さ方向に均一であることが分かった。 従って、両ケースともにガラスビーズを水槽内に 均一に同じ間隙率に詰めることができ、両ケース 間での実験結果の比較が可能であった。また、水 圧またはサクションと体積含水率の関係よりガラ スビーズの試料内はほぼ飽和状態であった。





海底面からの地下水流出が多い海浜では、その周辺の海水の塩分濃度が薄くなっている可能性があ る。ただし、ケース2の実験結果のように表面水が淡水と塩水に明確に分かれるのではなく、波と 干満の影響により淡水と海水は混合されると考えられる。ケース2のような状態から、海水面が上 昇して海底の地下水流出量が少なくなった場合には、ケース1の実験結果のように、塩分濃度が薄 くなった海水域はなくなり、当然、地下水内の塩淡水境界も陸側に移動し、汀線付近の地下水と表 面水の塩分濃度は変化する。その結果、この付近の生態系に影響を与える。

今後,表面水と地下水を扱うことができる数値解析手法(ASG法)の検証を今回の実験結果で行い,さらに,実際の縮尺で干満を考慮した解析を行う予定である。

参考文献

- IPCC, Technical Summary, Climate change 2001; Impacts, adaptation and Vulnerability, 2001.
- 2)神野健二, 籾井和朗, 藤野和憲, 中川啓, 細川土佐男, 江種伸之, 広城吉成, 地下水中の物質輸送数 値解析, 九州出版社, 73-99, 2001.
- 3)徳永朋祥,中田智浩,茂木勝郎,渡辺正晴,嶋田純,張勁,蒲生俊敬,谷口真人,浅井和見,三枝博光,沿岸海底から湧水する淡水性地下水の探査および陸域地下水との関連に関する検討-黒部川扇状地沖合での例-,地下水学会誌,45(2),pp.133-144,2003.
- 石飛智稔,谷口真人,嶋田純,沿岸海底湧出量測定による塩淡水境界変動と地下水流出の評価, 地下水学会誌,49(3), pp.191-204, 2007.
- Robinson C., L. Li and D.A. Barry, Effect of tidal forcing on a subterranean estuary, Advances in Water Resources, 30, 821-865, 2007.
- 6) Boufadel M.C., A mechanistic study of nonlinear solute transport in a groundwater surface water system under steady state and transient hydraulic conditions, Water Resource Research, 36(9), pp.2549-2565, 2000.
- 7) Li H., M.C. Boufadel and J.W. Weaver, Tide-induced seawater-groundwater circulation in

shallow beach aquifers, Journal of Hydrology, 352, pp.211-224, 2008.

- 高橋昌弘, 籾井和朗, 塩水の浸入・排除過程に及ぼす分散長の影響, 地下水学会誌, 58(1), pp.9-30, 2016.
- 9)日比義彦, 尾藤健, 細堀建司, 湖沼の塩分濃度に対する海水の影響を把握するための室内実験, 地 下水学会誌, 52(2), pp.169-181, 2010.
- 10) Hibi Y., A. Tomigashi and M. Hirose, Evaluation of a numerical simulation model for a system coupling atmospheric gas, surface water and unsaturated or saturated porous medium, Journal of Contaminant Hydrology, 185, pp.121-134, 2015.