原著

砂モデル実験による海岸地下水の非定常挙動

井内 国光・柿沼 忠男

摘 要

本研究は砂を詰めた実験水槽を用いて、上流部の淡水水頭を急変させた場合と海岸部で潮汐変動を与えた場合の両者について実験を行い、被圧帯水層内の目視境界面や濃度分布の非定常挙動について考察を行ったものである。まず、淡水位の急激な変化に伴う非定常挙動を調べた結果、塩水の侵入にかかる時間は後退にかかる時間よりも長く、また、侵入時には、帯水層底面付近の濃度分布は、 $c/c_s=0.5$ (ここに、 c , c_s は地下水及び海水の塩の濃度) より高濃度領域では水平方向の濃度勾配が小さく、逆に $c/c_s=0.5$ より低濃度領域では濃度勾配が大きいことがわかった。しかし、後退時にはこうした非対称性はほとんどみられない。次に、潮汐影響下での非定常挙動を調べた結果、種々の周期や振幅の潮汐に対して、海水位変動に比べて塩水楔の長さや高さには位相の遅れがみられ、長さのほうがより遅れが大きかった。また、塩水が最も侵入するのは海水位が下げ潮時の平均海面に達する時刻であり、この時刻に濃度の遷移領域が最も広がった分布となった。以上の知見は、数値解析による結果に一致するものである。

キーワード：塩水侵入、地下水、潮汐変動、砂モデル実験

はじめに

地下水は一年を通じて水温の変化が少なく、表流水に比べて一般的に水質が良いため貴重な水資源として古くから利用されてきた。しかしながら、地下水が大量に利用されている平野部は海に面していることが多く、そうした地域においては地下水中に海水が侵入する、いわゆる地下水の塩水化現象がみられ、水質を悪化させ地下水の利用に重大な支障を来す例がしばしば見られるようになった (村下, 1982; 池田, 1995; 和泉・清水, 1998)。ところでこの現象の発生の程度と規模およびその時間スケールは、それぞれの地域における地形、地質、帯水層の構造とその水理定数や降水量などの様々な自然条件や揚水などの人為的要因に規定される。したがって、こうした地域において、今後も地下水を価値ある水資源として利用していくためには、この塩水化現象についての詳細な知見が不可欠となるであろう。

こうしたことから、井内ほか (2000) においては実験水槽を用いて被圧帯水層の塩水侵入と淡水レンズの定常挙動を再現し、それらと淡塩水境界面モデルおよび分散モデルでの数値解析結果との比較検討を行った。本研究では引き続き、砂モデルの水槽を用いて実験を行い、被

圧帯水層における塩水侵入の非定常挙動について詳しく考察する。

海岸付近の帯水層内の塩濃度の変動要因として今回取り上げたものの内、1つは上流での地下水位の変動であり、これが階段関数的な変化を示す場合について実験を行った。もう1つの変動要因は潮汐であり、帯水層出口での海水位が正弦関数的に変化する場合について実験を行っている。なお、この潮汐変動の効果については、たとえば出井 (1981) は徳島県那賀川下流域において電気伝導度計により井戸内の塩分濃度分布の測定を行って、そこに見られる淡塩水境界面のぼやけた状態は、潮汐振動によって境界面で塩分の分散が生じた結果であることを指摘している。

今回の実験では上述の2つの変動要因に応答する濃度の空間的变化に着目しているため、伝導度プローブを線上に密に配置して実験精度を高めた。

砂モデル実験

実験装置

Fig. 1に用いた実験装置の全体図を示す。実験装置は水槽本体、給排水装置及び付属装置に大別できる。水槽

Fig. 1. Schematic diagram of sand tank experiment.

本体は厚さ10 mmの透明アクリル板を使用して作成し、その帯水層部の高さが500 mm、長さが900 mm、幅が40 mmの長方体であり、両側に高さ500 mm、長さ80 mm、幅40 mmの貯留部（ヘッドタンク）を設けた。帯水層部と貯留部の仕切りには直径3 mmの穴を間隔10 mmで横方向に4列、間隔20 mmで上下方向に25列開けた厚さ10 mmのアクリル板を使用し、水の出入りが自由に出来るようにした。

海側の貯留部には帯水層から濃度の薄い水が流れ出ているので、貯留部内の塩水の濃度を変える可能性があり、また、本研究のように潮汐変動などの非定常な現象を想定すると、濃度についての境界条件として時間的な変動を示す実験を行ってしまう懸念がある。そこで貯留部内の濃度変動を極力抑えるために、塩水給水装置（salt-water tank）からの貯留部への給水を大量に、しかも下部に行い、貯留部の上部から濃度の薄い水を排水することにした。なお、ガラス管式の比重計を浮かべて実験中の貯留部内の密度をモニターした結果では小数点以下3桁までは変動が見られなかった。

帯水層を構成する多孔質媒体として粒径1.56 mmの球形ガラスビーズを用い、その透水係数は 1.86 cm sec^{-1} である。水槽内には電気伝導率を測定するために0.5 mm径の白金線を2 mm間隔で埋め込んだ電導度プローブ（Fig. 2）を作成し、Fig. 3に示すような位置に固定した。濃度は測定した電気伝導率によって決定した。また、目視観測が可能のように塩水は食用色素赤色102号で着色した。なお、帯水層を被圧とするために、上部に厚さ90 mmの発泡スチロールを敷き、その上に厚さ10 mmのアクリル板で蓋をしているので正味の帯水層厚は400 mmであり、さらに水槽にガラスビーズを詰める

Fig. 2. Electric conductivity probe.

Fig. 3. Locations of electric conductivity probes in sand tank.

さいには貯留部に流れ出さないように、両端から18 mmの幅で粒径5 mm程度の礫を詰めているので、正味の帯水層長は864 mmである。塩水は塩田で作られた市販の自然海塩を水に溶かして作った。

実験方法

実験は被圧帯水層における塩水侵入の非定常挙動をシミュレートしたものであるが、その場合の非定常挙動は上流部の地下水位変動と潮汐に伴う海岸での海水位変動によるものを想定する。これらの水位変動は上流側および海側のヘッドタンクの水位として与えた。以下これらの水位をそれぞれ、淡水位および海水位と呼ぶ。

(a) 淡水水頭の急激な変化に伴う非定常挙動

この実験ではまず定常状態を作り、次に定常状態から海水位を一定にしたまま淡水ヘッドを急激に下降させる。塩水楔は帯水層内を内陸部へと侵入してゆき、徐々にその進行が遅くなりやがて定常状態に落ちつく。引き続き下げた淡水ヘッドを元の水位まで上昇させる。塩水楔は

帯水層内を後退してゆき、やがて定常状態になる。このそれぞれの間の各プローブでの濃度値や目視境界面の動向を測定した。実験で行った淡水位の変動は次の2種類である。

実験Ⅰ 海水位：439 mm，淡水位：455 mm から452 mm に下降させ、定常に達した後、再び元の455 mm に上昇させる。

(変動水位差3 mm，塩水密度1.022 g cm⁻³，淡水密度0.999 g cm⁻³)

実験Ⅱ 海水位：434 mm，淡水位：450 mm から444 mm に下降させ、定常に達した後、再び元の450 mm に上昇させる。

(変動水位差6 mm，塩水密度1.021 g cm⁻³，淡水密度0.999 g cm⁻³)

ただし、水位は帯水層底面からの高さである。

なお、濃度や目視による淡塩水境界面位置などの測定は最初の30分間は5分毎に、それ以後は10分毎に行った。

(b) 潮汐変動（塩水位の周期的変動）に伴う非定常挙動

この実験では海水位に正弦変動を与えるために Fig. 4 に示すような潮汐発生装置を作成し、Fig. 1の左側のジャッキをこれで置き換えた。

実験は最初、海水位を一定に保って定常状態を作り、その後、潮汐発生装置を作動させる。なお、以後の実験結果の説明や解析で示される時刻 t は作動開始時を0としたものである。3種類の実験を以下に示すような潮汐の振幅および周期で行った。

実験A：振幅5 mm，周期 $T=26$ min（塩水密度1.021 g cm⁻³，淡水密度0.999 g cm⁻³）

実験B：振幅10 mm，周期 $T=26$ min（塩水密度1.022 g cm⁻³，淡水密度0.999 g cm⁻³）

Fig. 4. Tide generator

実験C：振幅10 mm，周期 $T=44$ min（塩水密度1.020 g cm⁻³，淡水密度0.999 g cm⁻³）

測定は実験A，実験Bについては $T/4$ 間隔で，実験Cについては $T/8$ 間隔で行い，すべて4周期まで行った。ここに， T は潮汐の周期である。

(c) 相似則

この模型実験の条件を現地に当てはめると，どの様に対応するかを知るために以下に相似則を簡単に示す。

運動方程式であるダルシー則に関して力学的相似則を適用すると

$$\frac{q_{xp}}{q_{xm}} = \frac{K_p h_p / x_p}{K_m h_m / x_m} \quad (1)$$

ここに， q_x ：地下水の x 方向の浸透流速 K ：透水係数 h ：水理水頭差 x ：座標，添え字 p は現地， m は模型を表す。

幾何学的相似が保たれると，水理水頭の勾配 h/x は現地と模型では同一であるので現地と模型の浸透流速の比は透水係数の比と等しい。したがって模型での砂を現地と同一のものをを用いた場合には，模型で測定された浸透流速は現地の浸透流速を表している。

次に時間の相似則を求めるために長さの代表値として平均流程 l ，速度の代表値として浸透流速 q_x を採用する。これら両者の関係は $l = q_x t / n$ であるので $t = ln / q_x$ となる。ここに n は間隙率である。したがって時間に関する相似則は，媒質の間隙率が同一であれば，

$$\frac{t_p}{t_m} = \frac{l_p / q_{xp}}{l_m / q_{xm}} \quad (2)$$

模型で現地と同一の砂を用いた場合には上述の結論より， $q_{xp} = q_{xm}$ であるので時間の比はスケール比に等しい。したがって，帯水層厚400 mm の実験をたとえば帯水層厚10 m の現地に適用すると，そのスケール比は1/25となり，潮汐変動における周期26分は10.8時間に相当する。すなわち，この実験で用いた潮汐の周期26分は現地に対応するものである。

実験結果の考察

淡水水頭の急激な変化に伴う非定常挙動

(Ⅰ) 淡水位を下降させた場合（侵入時）

淡水位を急激に下降させたとき，次の定常状態までに

要した時間は実験Ⅰでは100 min、実験Ⅱでは120 minであった。Fig. 5に目視境界面の動きを示す。3 mmの水位変動を与えた実験Ⅰでは楔の高さは19.5 cmから26.2 cmに、楔の長さは25.0 cmから43.3 cmに増加し、6 mmの水位変動を与えた実験Ⅱでは楔の高さは18.3 cmから30.0 cmに、楔の長さは26.7 cmから68.5 cmに増加した。ここに、楔の高さは $x=0$ における目視境界面の帯水層底面からの距離であり、楔の長さは $z=0$ における目視境界面の帯水層出口からの距離である。楔の長さや高さの時間変化は、双方とも実験開始直後には急激な変化をみせ、その後緩やかとなるが、高さの方がより階段関数的な傾向を示す (Fig. 6, Fig. 7の上図)。

Fig. 8に実験Ⅰについて帯水層出口付近における上下方向の濃度分布を示す。 $t=0$ minにおける分布に比べて $t=5$ min, 10 minあるいは30 minでは濃度の遷移領域が広がった分布となるが、再び次の定常状態に達したと考えられる $t=100$ minではかなりシャープな境界面に近い分布形状となる。こうした濃度変化の特性はFig. 9に示した帯水層底面付近における水平方向の濃度分布図にもみられる。また、水平方向濃度分布の特徴と

Fig. 5. Movement of visually identified freshwater/salt-water interface in the case of wedge advancing for Exps. I and II.

して、 $t=0$ minや $t=100$ minでの定常状態では分布型が $c/c_s=0.5$ 付近を中心にほぼ対称な形であるが、非定

Fig. 6. Temporal changes in wedge length and wedge height for Exp. I.

Fig. 7. Temporal changes in wedge length and wedge height for Exp. II.

Fig. 8. Vertical concentration distributions near the outlet of aquifer in the case of advancing stage for Exp. I. Dotted line denotes visually identified interface and c/c_s is salt concentration ratio of groundwater to seawater.

Fig. 9. Horizontal concentration distributions near the bottom of aquifer in the case of advancing stage for Exp. I. Dotted line denotes visually identified interface and c/c_s is salt concentration ratio of groundwater to seawater.

常時には異なり、たとえば $t=30$ min や 70 min における分布型は $c/c_s=0.5$ より高濃度領域では水平方向の濃度勾配が小さく、逆に $c/c_s=0.5$ より低濃度領域では濃度勾配が大きい。ここに、 c 、 c_s は地下水および塩水槽での塩の濃度である。

(II) 淡水位を上昇させた場合（後退時）

淡水位を急激に上昇させたとき、次の定常状態までに要した時間は実験Ⅰでは 60 min、実験Ⅱでは 70 min であった (Fig. 6, Fig. 7 の下図)。この値は上述の淡水位を下降させた場合の約 60% にあたり、このことは塩水が後退する場合は侵入する場合よりも現象が速く進むことを意味し、柿沼ほか (1987) における数値計算結果とその傾向を一にする。Fig. 10 に目視境界面の動きを示す。Fig. 11 および Fig. 12 に実験Ⅰでの上下方向の濃度分布と水平方向の濃度分布を示す。非定常時に遷移領域が広

Fig. 10. Movement of visually identified interface in the case of retreating stage for Exps. I and II.

Fig. 11. Vertical concentration distributions near the outlet of aquifer in the case of retreating stage for Exp. I. Dotted line denotes visually identified interface.

がる傾向は淡水位を下降させた場合と同様にみられるが、その広がりには少ない。また、侵入時にみられた水平方向濃度分布の非対称性もほとんどみられない。

このように遷移領域の広がりが、淡水位を下降させた場合（侵入状態）の方が上昇させた場合（後退状態）よりも大きく現れることについては、この現象は本質的には対流であり、淡塩水境界面の周りに循環流が存在する。

Fig. 12. Horizontal concentration distributions near the bottom of aquifer in the case of retreating stage for Exp. I. Dotted line denotes visually identified interface.

特に塩水が侵入している時期には、塩水側の流速が比較的大きく、そこでの分散が起こりやすい。逆に、塩水が後退している時期にはその流速は比較的小さく、そこでの分散は起こりにくい。また淡水中に分散した塩分は海へと向かう淡水の流速が大きいので、海に流去しやすい、などの要因が考えられる。

潮汐変動に伴う非定常挙動

Fig. 13に実験A, B, Cの3周期目から4周期目の目視境界面の変動を示す。さらに、Fig. 14に実験A, B, Cにおける楔の足の長さとし高さ、および海水位の変化を示す。値は初期定常状態からの偏差で表したものである。初期定常状態での海水位および淡水位は実験Aでは439 mm, 451 mm, 実験Bでは437 mm, 451 mm, 実験C

Fig. 13. Movement of visually identified interface in response to the tide.

Fig. 14. Temporal changes in wedge length and height in response to the tide.

では439 mm, 451 mmであり、その場合の塩水楔の長さとし高さは実験Aでは418 mm, 255 mm, 実験Bでは362 mm, 240 mm, 実験Cでは379 mm, 233 mmである。

Fig. 14に示されるように、海水位の変動に伴い、楔の長さとし高さは正弦運動を示す。海水位変動に対して楔の長さとし高さには位相の遅れがみられ、長さのほうがより遅れが大きい。楔の高さは海岸のごく近くでの測定、また長さは海岸から内陸部までを対象とした測定であるので、現象が波動的に海岸から内陸部へ伝わってゆくと考えると、高さに比べ長さのほうがより遅れが大きいことは理解できる。さらに実験A, B, Cを比較すると、楔の長さとし高さの振幅は

海水位変動の振幅が大きいほど、また周期が長いほど大きくなる。

Fig. 15, 16, および17にそれぞれの実験での3周期目の上下方向濃度分布と水平方向濃度分布を示す。これらの図より、海水位が上げ潮時の平均海面に達する時刻 $t/T=3.0$ においては上下方向、水平方向とも濃度の遷移領域の広がりには少なく、シャープな分布を示すが、 $t/T=3.25$ や $t/T=3.5$ では遷移領域が広がった分布となり、とくに水平方向の広がりが最も大きいのは $t/T=3.5$ であり、この時刻は海水位が下げ潮時の平均海面に達する時刻であり、目視境界面が最も侵入する時刻にあたる。このような塩水の侵入と遷移領域の広がり特性は柿沼ほか（1987）およびInouchi et al.（1990）における数値計算結果と同一である。実験Aと実験Bを比べると、振幅の大きい実験Bの方が遷移領域の広がりが大きく、また実験Bと実験Cの比較より、周期の短い実験Bの方が遷移領域の広がりが大きい。振幅の大きい方が遷移領域の広がりが大きくなるということは容易に想像しうが、周期の短い方が遷移領域の広がりが大きいことについてはこのアナログ実験では2種類の周期しか扱っていないので、さらに検討を要する。そこで数値解析によって実験の補足を行った。

数値解析は井内ほか（2000）に示した有限要素法による分散モデルを用いた解析手法を非定常に拡張したものであり、帯水層出口の海との接点における境界条件としてはCauchy型を採用した。なお、上述のように著者らは以前にも数値解析によって潮汐変動による非定常挙動を考察しているが、その場合には当時の計算機の能力に制限があり、あまり多くの節点数が取れず、境界面に近いシャープな濃度分布を再現することが不可能であった。しかし、その後の計算機の進歩は目覚ましく、今回はかなり境界面に近い濃度分布も再現できた。

まず数値モデルの検証をするために実験結果の再現を試みた。実験における帯水層の形状、海水位、上流の地下水位、海水密度、潮汐の周期や振幅などを同一条件として与え、圧力や塩濃度の数値解を求めた。なお分散長だけは、それを求める原理的な要素実験を特別に行っていないので、いろいろな分散長の値を

Fig. 15. Vertical and horizontal concentration distributions near the outlet of aquifer and the bottom of aquifer, respectively, in response to the tide for Exp. A. Dotted line denotes visually identified interface.

Fig. 16. Vertical and horizontal concentration distributions near the outlet of aquifer and the bottom of aquifer, respectively, in response to the tide for Exp. B. Dotted line denotes visually identified interface.

Fig. 17. Vertical and horizontal concentration distributions near the outlet of aquifer and the bottom of aquifer, respectively, in response to the tide for Exp. C. Dotted line denotes visually identified interface.

与えてより実験結果に近い濃度分布となるものを採用した。

Fig. 18は実験Aを再現した場合の水平方向濃度分布について、実験結果と数値解とを比較したものであり、

Fig. 18. Comparisons of horizontal concentration distributions. ●: experiment; continuous lines: numerical analysis.

黒丸が実験結果を、実線は数値解を示している。なお、分散長は縦方向が0.24 cm、横方向が0.024 cmであった。かなりシャープな塩水から淡水への濃度の移行が数値解においても再現されており、また実験における $t/T=3.25$ や $t/T=3.5$ の遷移領域の相対的に広がった分布は数値解においても現れている。

続いて、潮汐の周期の違いによる各位相での侵入状況の相違を数値解によって調べた。Fig. 19は無次元の等濃度線 $c/c_s=0.1$ および $c/c_s=0.9$ の帯水層底面 ($z=0$) での位置 l/d (すなわち、それぞれの等濃度線と x 軸との交点) が潮汐の位相でどのように変化するかを示したものである。なお表示はより一般性を持たせるため無次元表示としており、ここで d は帯水層厚である。中図の(b)が実験Aに相当し、(a)は(b)に比べ周期が1/2倍の場合、逆に(c)は2倍の場合である。これら3つの図において塩水が最も侵入するのは実験と同様、どの図も海水位が下げ潮時の平均海面に達する時刻 $t/T=3.5$ であり、周期による違いは見られない。また $c/c_s=0.1$ と $c/c_s=0.9$ との差が比較的大きいのは周期の短い方 ((a)図) であり、さらに $t/T=3.5$ 付近で3図とも $c/c_s=0.1$ と $c/c_s=0.9$ との差が広がり、これは遷移領域が拡大することを示しており、実験を裏付ける結果となっている。

ところで、これまでの実験とそれを再現した数値解析は Fig. 19の l/d の値が1程度であることからわかるように、どちらかと言えば塩水侵入があまり内陸まで入っ

Fig. 19. Temporal changes in the positions of isoplethic lines $c/c_s=0.1$ and $c/c_s=0.9$ on the bottom of aquifer: (a) $TK/d=36.27$, (b) $TK/d=72.54$ and (c) $TK/d=145.08$, where T : tidal period; K : hydraulic conductivity; d : thickness of aquifer.

ていない場合である。しかし塩水化が問題となっている現地ではかなり内陸部まで侵入しているのが現実である。そこで上述の結果が、より塩水が侵入した場合にも成立するかを吟味するため、上流の地下水位は変えずに帯水層の長さを2倍、3倍とした場合の数値解析も行った。帯水層長を大きくすると水位勾配が小さくなり、塩水がより侵入する結果となって、各等濃度線は帯水層下部では、より侵入した位置で周期的な動きを示すが、その動きは小さくなり、例えば帯水層長を3倍にすると等濃度線 $c/c_s=0.1$ の帯水層底面での潮汐に伴う移動は1/2.5倍になる。しかしながら、塩水が最も侵入する時刻はやはり海水位が下げ潮時の平均海面に達する時刻であり、解析した範囲内では侵入の程度によって上述の結果が変わるようなことはなかった。

以上、被圧帯水層内の塩水侵入に関して、主に実験結果に基づいて目視境界面や濃度の非定常挙動について考察を行った。しかしながら、この実験では帯水層を構成しする多孔質媒体として使用したのは、1種類の同一粒径のガラスビーズのみであり、その透水性はかなり良く、濃度分布は境界面に近い状況のものであった。今後、種々の粒度分布や有効径、均等係数を有する砂などを用いた

追加実験や土粒子による吸着効果を考えた分析を行うことによって、非定常挙動の理解が深まるものと思われる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、実験装置の作成や資料の整理に協力して頂いた愛媛大学大学院工学研究科の元大学院生坂本 光氏に心から謝意を表する。

この研究は文部省科学研究費一般研究(C)04650464および財住友財団研究助成金による研究の一部であることを付記する。

文 献

- 池田喜代治 (1995): 富士山南麓地域における地下水の水文学的研究 — 地下水塩水化前後における水文と水質の挙動 —. ハイドロロジー, 25: 57-70.
- Inouchi K., Y. Kishi and T. Kakinuma (1990): The motion of coastal groundwater in response to the tide. Journal of Hydrology, 115: 165-191.
- 井内国光・坂本 光・柿沼忠男 (2000): 砂モデル実験による海岸及び島しょ地下水の定常挙動. 陸水学雑誌, 61: 1-10.
- 和泉恵之・清水邦昭 (1998): 地下水障害. 改訂地下水ハンドブック, 改訂地下水ハンドブック編集委員会 (編): 613-634. 建設産業調査会, 東京.
- 柿沼忠男・井内国光・銅金裕司 (1984): 被圧帯水層における淡塩水境界面の近似解法について. 陸水学雑誌, 45: 100-110.
- 柿沼忠男・岸 洋介・井内国光・都築克明 (1987): 分散を考慮した海岸地下水の挙動に関する研究 (IV) — 二次元非定常モデルによる数値解析 —. 陸水学雑誌, 48: 99-109.
- 出井 紘 (1981): 地下水塩水化域での潮汐振動に伴う塩分散について. 水温の研究, 25: 20-26.
- 村下敏夫 (1982): 本邦における地下水の塩水化. 地質調査所月報, 33: 497-530.

井内国光: 〒790-8577 松山市文京町3, 愛媛大学地域共同研究センター
柿沼忠男: 〒851-0193 長崎市網場町536, 長崎総合科学大学

(受付: 2000年6月26日; 受理: 2000年9月25日)

[Original article]

Unsteady-state behavior of coastal groundwater: a sand tank experiment

Kunimitsu INOUCHI¹⁾ and Tadao KAKINUMA²⁾

¹⁾ Center for Cooperative Research and Development, Ehime University, 3
Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan

²⁾ Nagasaki Institute of Applied Science, 536 Aba-machi, Nagasaki 851-0913, Japan

Abstract

Using a sand tank, the unsteady behavior of coastal groundwater was investigated in response to the sudden change in groundwater level at the upstream side and to the tide at the downstream side. The salt water wedge induced by the sudden change in groundwater level in the upstream region is faster when saltwater retreats than when it advances. In the advancing stage, the horizontal gradient of concentration near the bottom of the aquifer is smaller in the downstream region than in the upstream region, though such a phenomenon is not found in the retreating stage. The phase lags of wedge length oscillation, which follows the tide oscillation, are larger near the bottom than those of wedge height oscillation near the downstream end. The salt water wedge intrudes farthest inland at the mean sea level in the ebb tide stage, and the transition zone becomes widest at the same time. These experimental results agree with those of the numerical simulation.

Key words: seawater intrusion, groundwater, tide, sand tank experiment

E-mail (K. Inouchi): inouchi@dpc.ehime-u.ac.jp