## Swash zone 近傍における地下水の移流拡散過程の測定と解析

Measurement and Analysis of transport-diffusion process of underground water at the swash zone

北海道大学大学院工学研究院	正 員	猿渡亜由未(Ayumi SARUWATARI)
北海道大学大学院工学院	○学生員	長塚雄介 (Yusuke NAGATSUKA)

### 1. はじめに

沿岸域における陸海域間では、土壌を介した質量交換 が生じているが、特に汀線近傍においては波浪の効果に より地盤内を陸域から沖方向へと流れる地下水流が発生 しており、swash zone 近傍で海水が湧き出すという現象 が起こっている.このような地盤からの流出量は河川水 の3%程度であると見積もられている<sup>1)</sup>.しかし地下水 中の栄養塩濃度は河川水の数倍あるといわれており<sup>2)</sup>、 地下水からの栄養塩等の海水中への流入フラックスとし ては河川からの流入量に匹敵するといわれている<sup>3)</sup>.土 壌中には各種栄養塩以外にも酸素、炭素、バクテリアも 豊富に含まれることから、地盤が湧出する地下水はそれ らの物質の沿岸海域への重要な供給源のひとつとなって いる.

沿岸域における地下水の浸透速度を決定する最も大き なファクターは季節的に変動する陸域の地下水位と潮汐 等により決定される海水位との差であるが、特に汀線近 傍においては波浪による静水圧振動に起因するポンプ効 果が浸透速度に大きく関係している<sup>4)</sup>.これまでに潮汐 や季節変動など長期的な地下水変動に対する浸透速度の 変化については種々の研究がされてきたが、波浪等の短 周期の変動による変化についての研究はきわめて少なく +分に解明されていない<sup>5)</sup>. ビーチ勾配の急峻化や海岸 浸食を防ぐために地下水位を下げる目的で地中にこう透 水性の排水ドレインが埋設される場合があり、その関連 研究において種々の波浪条件や地盤の透水条件における 水理実験が行われてきたが<sup>6)</sup>,埋設の効果が波浪条件に より異なることが報告されているものの地下水流と波浪 条件、地形変化との詳細な関係については解明されてい ない.しかしながら波浪に対する地下水流の応答に関す る理解なく、時間的、空間的な波浪条件の違いに応じた 地下からの物質フラックスを適切に評価することは難し い

これまでに地下水の挙動や流出量はピエゾメーター等 を用いて得られる地下水位の変動や、地下水中に含まれ る物質をトレーサーとして見積もられる海水中への溶出 量などをもとに測定されてきた<sup>7)</sup>.地下水流は直接可視 化することが困難であり、かつ実験・観測手法が限定さ れているため、その平面的、空間的な特徴を測定するこ とが容易でないことが現象の解明を妨げる要因となって いる.

本研究では汀線近傍での地下水の流れを計測する方法 を提案し,種々の波浪条件とそれに伴う地形変化によっ て引き起こされる地下水の浸透,拡散といった挙動の違 いを解析することを目的としている.

#### 2. 実験装置

実験は全長 8.00 m,幅 0.25 m,勾配 1/20 の全面透明 アクリル製の二次元造波水槽内で行った(図-1).造波 板から 2.5m 岸側より深さ 10cm のサンドピットとなっ ており、中央粒径 0.21 mm の砂を敷き詰めた.また測 定地点における砂層厚さを十分確保する為に、砂層底面 の初期形状を 1/15 の一定勾配とした.本研究では表-1 に示すように波浪の条件を変更して計測を行った.また 砕波が発生しない波浪条件と、砕波の発生する周期の異 なる条件のものとの比較を行うことができるような波浪 条件で行った.本論文では case2,case5,case7 を焦点にし てこのセットアップにより以下の実験と、実験と同様の セットアップによる数値計算を行った.

(a)



(b)



**図-1** 実験装置の概念図

(a) 壁面近傍地下水流の測定 (b) 塩水を用いた移流拡散 実験のセットアップ

<b>表一1</b> 波浪条件						
case	周期 [s]	造波波高 [cm]	砕波形態			
1	_	0.0	静水状態			
2	10.0	0.2	非砕波			
3	5.0	1.2	非砕波			
4	2.5	5.0	卷波砕波			
5	2.0	5.0	卷波砕波			
6	1.4	5.0	卷波砕波			
7	1.25	5.0	巻波砕波			

#### 2.1 実験方法及び数値計算による手法の概要

## (1) 水槽側面近傍での間隙水の移動と地形変化の測定

あらかじめ水槽側面の砂層内に蛍光染料(ウラニン)を 注入して造波を開始し,壁面での染料の移動をデジタル カメラで撮影することにより壁面における間隙水を追跡 し,移動ベクトルを計測した(図-1(a)).またその撮影 画像から時間経過に伴う砂層底面の形状変化も同時に観 測した.ウラニン溶液は砂を染色することはなく,かつ 比重がほとんど変化しない程度の濃度の溶液を使用して おり,溶液は注射器で初期底面に沿う方向に10 cm 間隔, 鉛直方向に3 cm 間隔のグリッド状に注入している.撮 影画像の FOV は 82.7×61.8 cm, 解像度が 2882×2112 pixel(0.3mm/pixel),撮影時間間隔は10 min である.

#### (2) 塩水を用いた浸透性底面下における移流拡散実験

初期状態において地盤内のある部分にのみ混入された NaCl 水溶液の波浪下での地下水流による移流拡散過程 を, NaCl 濃度の時間変化を計測することにより調べる. 前節で述べた実験により明らかになる地下流れの上流地 点を 10 cm 幅に仕切り, 仕切り内のみを通常の砂の代わ りに 4.8%NaCl 水溶液(比重 1.02)で満たされた砂を充填 した.

その後仕切りを開放すると同時に造波を開始した.ま た充填位置を $\xi = 0$ とし、水平沖方向に $\xi$ 軸を定義する. ξ= 0 地点及びそこから沖方向に 10 cm 間隔で水路中央 部に3本の円筒を,底面下6 cm の位置に来るよう埋設 し、造波開始後 5-10 min 毎に、先端を延長してある注 射器を用いて円筒内の砂層から水を取水し、その水の塩 分濃度を屈折率計により計測した. 塩水は塩分濃度によ って屈折率を変化させ,本研究で使用する塩分濃度にお いて屈折率と塩分濃度は線形近似できることを確認して いる.円筒は注射器による取水地点を同じ条件で行うた めに埋設しており, 直径 1 cm のものを使用している. 円筒を底面に挿したことによる局所洗掘は確認されなか った. また取水する水量は, 砂層内間隙水に影響を及ぼ すことの極めて少ない水量である. このときの Swash Zone 内の3 地点で観測された時間ごとの塩分濃度変化 から,砂層内間隙流れを追従した.

## (3) ダルシー則に基づく底面間隙水の移動計算

実験と同じセットアップを用いて,計測時間毎の実際 の底面形状の変化と平均水位変動を初期条件,境界条件 として入れることで地下間隙水の移動をダルシー則に基 づいて計算した.計算の grid 幅は 0.004m×0.004m で行 った. Run-up 位置より岸側では平均水位位置が特定で きないため,平均 Run-up 位置の鉛直方向の値を岸側の 平均水位として代入することで計算し,また波浪により bar が形成されるケースに関しては,堆積した砂の頂点 を岸側の平均水位として計算した.

#### 3. 壁面近傍での間隙水移動と地形変化測定

各波浪条件における壁面での染料の移動と地形の変化 を図-2 に示す.染料,地形は 20 min 毎の位置をプロ ットしている.いずれのケースにおいても,swash zone の岸側の run-up 位置において砂層底面下への水の吸い 込みが生じ,そこを起点として沖方向に向かう地下水流 が生じた.この間隙水は run-down 位置近傍から湧き出 していることもわかる.また case5 や case7 を見ても明 らかなように,洗掘されている地点で湧き出しが起きる という一般的な波浪底面下の地下水流の特徴が確認でき た.



図-2 Swash zone における壁面近傍での染料の移動と 砂層形状の時間変化

黒: Omin 赤: 20min 緑: 40min 青矢印: run-up 位置

# 塩水を用いた移流拡散実験 4.1 移流拡散方程式

t=0において次式のように濃度 C が $-L/2 \le L/2$ の範囲に初期濃度 C<sub>0</sub>で分布していると考える.

$$C = \begin{cases} C_0, & |\xi| \le L/2\\ 0, & |\xi| > L/2 \end{cases}$$
(1)

上式を初期条件とする時の一次元拡散方程式の解は次式 により表される.

$$C = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{C_0}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left[-\frac{(\xi - x_0)^2}{4Dt}\right] dx_0$$
(2)

ここで D は拡散係数である. 上式は error function(erf) を用いることで次式のように整理される.

$$C = \frac{C_0}{2} \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{\xi + \frac{L}{2}}{\sqrt{4Dt}}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\xi - \frac{L}{2}}{\sqrt{4Dt}}\right) \right]$$
(3)  
$$\operatorname{erf}(\mathbf{x}) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$
(4)

さらに周囲の $\xi$ 方向の流れ場が一定流速 $u_a$  であらわ される時,濃度の移流拡散方程式は次式により表される.

$$C = \frac{C_0}{2} \left[ erf\left(\frac{\xi + \frac{L}{2} - u_a t}{\sqrt{4Dt}}\right) - erf\left(\frac{\xi - \frac{L}{2} - u_a t}{\sqrt{4Dt}}\right) \right]$$
(5)

本研究では汀線近傍の地下水流による NaCl 濃度の移流 拡散過程が上式により表されると仮定し,塩分濃度分布 の時間変化の測定結果に(5)式をフィッティングさせる ことにより拡散係数 D と移流速度 ua を決定すると共に, 波浪条件との関係について調べる.

#### 4.2 溶液の移流拡散過程の特徴

4.1 で説明したフィッティング曲線と,実測値をプロ ットしたものが図-3 となる. 縦軸は求めた濃度を初期 濃度で割った無次元量 C/C0 で表し,計算結果のうち 4 種の時間のものを抽出している. 図から沖方向へ流れる とともに拡散しているのがわかる,このときの拡散係数 は case2, 5,7 でそれぞれ D=0.1132,0.1474,0.0984 [cm<sup>2</sup>/min]となり,周期が短くなるにつれて増大してい ることがわかった.また非砕波条件である case2 ではほ とんど移流がみられず,その場で次第に拡散する傾向が みられた.



図-3 測定した塩分濃度と移流拡散方程式にフィッテ ィングさせた曲線

#### 5. ダルシー則を用いた数値計算

実際の砂層形状と平均水位を代入して計算した砂層内 圧力は図-4(a)のようになり、この水頭差からダルシー 則を用いて流速を求めた. 図は t=40 min のときの計算 結果である.赤線が平均水位,色のついた箇所が砂層底 面を表している.全体図(a)を見ると、平均水位の最も 低くなる地点に向かって湧き出しが発生していることが わかる.また平均 run-up 位置近傍において砂層内への 吸い込みが発生し、砂層内から沖方向へと流れていくー 般的な波浪底面下での地下水流の特徴を再現できた. (b)は 40 min 経過時の case2,case5,case7 における Swash Zone のみの速度分布を取り出した図である.砕波の伴 わない case2 では砂層の掘削があまりされず、湧き出し が他のケースより沖側となり、また浸透速度も低くなっ た.







全体図:case2, Swash Zone: case2,case5,case7

#### 6. 考察

壁面での 10min おきでの染料移動速度とダルシー則 で計算した速度分布を比較するため、染料の位置と同地 点での速度を水平、鉛直方向に分割して計算結果から抽 出した.各ケースでの移動速度の変化を図—5 に示す. 横軸がダルシー則による速度、縦軸が染料による速度と なっており、case2 では時間経過後も移動速度がほとん ど変化しなかったため、10min 後の結果のみとしたが、 case5,case7 においては、時間経過により速度に変化がみ られたため 10 min と 40 min のものを示した.プロット は黒、赤、緑、マゼンタの順に岸側の位置から 10cm ず つ沖側の染料の位置を示している.また今回は run-up 位置より岸側の染料に関しては岸方向への流れとなって いるため対象から外している.

全てのケースにおいて染料の移動速度が数値計算で求 めた速度より低くなる傾向があることが分かった.これ は砂層内では壁面近傍の間隙が一般的な砂層内より大き くなることが原因である可能性がある.また case2 では 鉛直方向速度はどちらもほとんど見られず,湧き出し地 点が他ケースより岸側にあることがわかる.case5 では 数値計算による結果が,Swash zone 内ではほぼ一定の速 度で流れており,染料の速度とは大きくずれた.また case7 においては時間変化による速度変化が大きく,地 形変化により砂層内間隙水の移動が変化したと考えられ る.また図-6 において各測定方法による移流速度をプ ロットした.この場合も同様に数値計算による結果が他 と比べ小さくなる傾向がみられた.



図-5 計算から得た速度と染料移動速度の水平・鉛直 方向における比較



#### 7. 結論

本研究では汀線近傍での地下水流れを測定,計算した. 数値計算では流れの方向を再現したが,速度は他の計測 方法と比べ小さくなった.これは砂層内の移動速度を確 定させるもののひとつである静水圧振動によるポンプ効 果による影響が大きいためだと考えられる.移流拡散実 験では,波浪下の汀線近傍に発生する地下戻り流れによ る塩分濃度の輸送現象を測定し,フィッティングさせる ことにより得られた移流速度,拡散係数は波浪条件によ り異なることが確認された.そのため,周期や砕波形態, 砂層形状などと移流速度や拡散係数との依存性について 知るためには,様々な条件下で更なる研究が必要である と考えられる.

## 参考文献

1)Moore, W. S.: The effect of submarine groundwater discharge on the ocean, *Annu. Rev. Mar. Sci.*, Vol. 2, pp. 59–88, 2010.

2) Johannes, R. E.: The ecological significance of the submarine discharge of groundwater, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 3, pp. 365–373, 1980.

3) Moore, W. S., Sarmiento, J. L. and Key, R. M.: Submarine groundwater discharge revealed by 228Ra distribution in the upper Atlantic Ocean, *Nature Geoscience*, Vol. 1, pp. 309–311, 2008.

4) Santos, I. R., Eyre, B. D. and Huettel, M.: The driving forces of porewater and groudwater flow in permeable coastal sediments: A review, *Estuarine, Coastal and Shelf Sci.*, Vol. 98, pp. 1–15, 2012.

5) de Sieyes, N. R., Yamahara, K. M., Paytan, A. and Boehm, A. B.: Submarine groudwater discharge to a high-energy surf zone at Stinson Beach, California, estimated using radium isotopes, *Estuaries and Coasts*,

Vol. 34, pp. 256–268, 2011.

6) Sato, M., Hata, S. and Fukushima, M.: An experimental study on beach transformation due to waves under the operation of coastal drain system, *Proc. Int'l Conference on Coastal Eng.*, Vol. 24, pp. 2571–2582, 1994.

7) Horn, D. P.: Beach groundwater dynamics,

Geomorphology,

Vol. 48, pp. 121-146, 2002