寺泊野積海岸の河口砂浜域における淡水地下水流出量の推定

Estimation of Fresh Groundwater Discharge in the Estuarine Sandy Beach in the Teradomari-Nozumi Coast

東 良慶¹・田邊修平²・平石哲也³・関口秀雄⁴

Ryoukei AZUMA, Shuhei TANABE, Tetsuya HIRAISHI and Hideo SEKIGUCHI

This study aims to obtain better understanding of groundwater dynamics in coastal sandy-beach environment. The Teradomari-Nozumi Coast of the estuaries of Ohkouzu diversion channel was selected as field observation location. This sandy beach is formed by fluvial sediment supply through the above channel (maximum advance of shoreline is up to 600m). From these reasons, this coast is suitable as a study area for unconfined groundwater. The field observations and analysis of the beach groundwater for particular points along beach profile, revealed interesting characteristics include: strong correlation between groundwater fluctuations and rainfall events in a catchment area and so on. As a result, fresh groundwater supply in terms of steady flow theory is estimated to amount from 0.5 to 4.3 m³/day per meter of beach width.

1. 序論

砂浜海岸の浅海域における生態環境を考える上で、海岸地下水の動態を明らかにすることは重要である。通常、海岸地下水は不圧帯水層または被圧帯水層を通じて、陸域から海域に向かって流動し、低潮線付近に湧出する (Johannes, 1980, 図-1)。これらの流出速度は被圧や水面勾配などの非定常な物理的諸量に影響を受けるため、変動しているが、典型的な値としては1~10 m³/m/dayとされている (須田・早川, 2002)。この地下水中には主に硝酸塩としての窒素が1~5mgN/lの濃度で含有されている。海水中の窒素は、植物プランクトンやケイ藻といった多くの海洋生物にとって重要な栄養塩となっており、降水イベントに依存しない窒素の海域への持続的な供給という観点から、陸域からの淡水地下水の流出は重要である。

一方で、地下水面と砂浜地形の関係については古くか

ら研究されており、地下水面の低下は潮間帯における海水の浸透と砂の堆積を引き起こし、地下水面の上昇は侵食を促進することが指摘されている (Grant, 1948)。

このように、砂浜海岸域における地下水の動態に関する理解を深めることは、沿岸域の多様な生態系の形成、ならびに、砂浜地形の保全にも資するものと考えられる。本研究では海岸地下水動態の調査エリアとして、信濃川の洪水放流路である大河津分水 (新信濃川) 河口域に位置する寺泊野積海岸に着目した。大河津分水が開削されてから約100年間に形成された砂浜域において、不圧帯水層内の地下水位動態の連続観測を実施した。観測データの時系列解析を通じて、定常地下水面情報を抽出し、陸域から海域に向かう淡水地下水流出量の定量的な評価を行うことを目的とした。

2. 現地調査エリア；寺泊野積海岸の特徴

大河津分水 (新信濃川) 河口域である寺泊野積海岸は、新潟海岸の南西側に位置し、南北に延長が7.5kmの砂浜海岸である (図-2 (A))。当該海岸の後背山地・丘陵を構成する岩層は、北側の急峻な弥彦山塊の火成岩、東部から南部にかけての丘陵地は堆積岩層 (寺泊層 (砂泥互層)) からなる (図-2 (B))。火成岩類の侵食抵抗は大きく、堆積岩層も泥質岩を主とするため、これらの海岸への砂礫の供給は少ない。そのため、海岸の中央部に開削された大河津分水の流砂系土砂が海浜砂の供給源となっていることが考えられる (磯部, 1978)。

東ら (2013) は地形図情報にもとづき大河津分水開削以降 (1911年) の過去約100年間の汀線位置変化を評価した。その結果、分水の本格的な通水 (1931年) 以降の約30年間で急速に汀線が前進し (最大で600m)、1965年以降は汀線位置が比較的安定していることを指摘した。

図-1 砂浜海岸域における地下水環境の概要図

1 正会員	博(工)	京都大学助教	防災研究所
2		京都大学大学院院生	工学研究科
3 正会員	博(工)	京都大学教授	防災研究所
4 フェロー	工博	大阪市立大学客員教授	理学研究科

一方で、近年の分水からの土砂流出量（70～80万 m^3 /年；国土交通省，2008）に見合う汀線の前進は生じておらず、供給された土砂の動態については把握できていない。関口ら（2013）は土砂の涵養過程を読み解く試みとして、2011年新潟福島豪雨による洪水堆積物を放射性核種の化学分析にもとづき同定した。

上述のように、寺泊野積海岸は従来、岩石海岸であった海岸地形の上層に河川流砂系由来の砂層が厚く累重している。堆積層の形成過程および境界が明瞭な地形環境であり、砂浜域の地下水動態を調査する上で適している。

図-2 寺泊野積海岸および大河津分水(新信濃川)の位置図；(A)概略図，(B)詳細図(表層地質分類図)

よって、本研究では当該海岸において地下水動態の連続観測を実施した。次章以降ではその結果について述べる。

3. 砂浜不圧帯水層の地下水位連続観測

(1) 地下水観測アレイの設置

本研究では大河津分水の河口から1.8km北側の野積海岸砂浜域において（図-2（B）），汀線と概ね直交する測線に沿って地下水観測孔を設定した（図-3）。また、地下水位観測孔の設置（B01～B03；2011年10月設置，B04，B05；2012年10月設置）と併せて、ボーリングコアの連続採取による堆積相観察を5地点において実施した。その堆積相観察結果と水位センサの設置位置について図-4に示す。

最も内陸側のB01（汀線からの距離； $x = 496\text{m}$ ）は

図-3 地下水位観測アレイの設定位置(観測孔設置位置)と汀線位置の変遷(背景図：Google Earth)

図-4 地下水位観測アレイに沿った観測孔の設置断面図と砂浜堆積層構造(表面波探査にもとづくS波速度コンター図)

図-5 砂浜不圧帯水層中の地下水変動の時系列データ(降水量：寺泊測候所(気象庁))

1911年当時の汀線付近に位置している(図-3)。B01の堆積構成に注目すると、砂礫層(T.P.-0.37m~+2.33m)の上に砂層(T.P.+2.33mより上位層)が累重していることがわかる。このことから、大河津分水開削以前の岩石海岸の礫浜層の上に分水から供給された砂が堆積したことが推察される。B02~B05に関しては、分水開削以前は海底(水面下)に位置するため、泥岩層(在来海底面)の上に大河津分水由来の砂質堆積物が厚く累重していることがわかる。それぞれの地点の泥岩層の上端(在来海底面)を結ぶと約1/40の勾配で海側に傾斜した在来海底地形がうかがえる。これは、東ら(2013)が実施した物理探査(表面波探査)にもとづくS波速度構造と概ね整合する結果である(明色部⇒未固結堆積層の存在を示唆、暗色部⇒固結堆積層の存在を示唆)。

(2) 地下水位変動の連続観測結果

先行して設置した観測孔B01, B02に関しては、2011年12月1日から地下水位の連続観測(15分間隔)を開始し、後続で設置した観測孔B04, B05については、2012年12月5日から観測を開始した。この観測で得られた地下水位の時系列データを図-5(A)に示す。また、調査エリアに最も近い寺泊測候所(気象庁)で観測された日降雨量データについても併せて図-5(B)に示す。なお、B03においては、地形変化が活発であり、海浜空間の利用者の安全面を考慮し観測孔の埋設は実施していない(汀線からの距離： $x=30\text{m}$)。

同図から、最も内陸側のB01(汀線からの距離： $x=496\text{m}$)から最も海域に近いB05($x=130\text{m}$)にかけて、平均地下水位が系統的に減少していることがわかる。つまり、陸側から海側に向かって傾斜した地下水面が定常的に形成されていることが伺える。このことから、陸側から海側への定常的な地下水流出が推察される。

一方で、陸域での降雨イベントに着目すると、日降雨

図-6 砂浜不圧帯水層断面における定常地下水面

量が50mmを超えるような降雨イベントに対して、地下水位が応答し、急上昇していることがわかる(図-5(A))。これは、陸側の集水域に降った降雨が帯水層に浸透し、地下水位を上昇させたと考えられる。これらの結果も陸域から海域への地下水流出の存在を示唆するものである。

次章では、上記解析から得られた定常地下水面情報から、陸域から海域に向かう地下水流出量について定量的に評価する。

4. 淡水地下水湧出量の評価

(1) 定常地下水面

前章までの観測結果を平均的に捉えと、海側に傾斜した定常地下水面が存在することがわかった(図-6)。汀線付近の帯水層では塩水の侵入が考えられるため、同図に淡塩水境界の関係式(ガイベン・ヘルツベルグの近似式；式(1))を併示した。

$$z = h \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 z は平均潮位から淡塩水境界までの深さ、 h は平均潮位から地下水面までの高さ、 ρ_f 、 ρ_s は淡水および海

表-1 不圧帯水層(砂質堆積層)の粒度分析結果

地点 (汀線からの距離)	B01 ($x=496\text{m}$)	B02 ($x=357\text{m}$)	B03 ($x=30\text{m}$)
50%粒径 (D_{50} , mm)	0.44	0.46	0.44
20%粒径 (D_{20} , mm)	0.41	0.37	0.35

表-2 淡水地下水の流出量評価

諸量	単位	各観測孔 (B01~B05) での 情報から求めた推算値
透水係数	k (m/sec)	$3.0 \sim 5.0 \times 10^{-4}$
動水勾配 (水面勾配)	i (-)	$0.2 \sim 1.0 \times 10^{-2}$
地下水流速 (水平方向)	v (m/sec)	$0.6 \sim 5.0 \times 10^{-6}$
淡水地下水 流出量	Q ($\text{m}^3/\text{day}/\text{m}$)	$0.5 \sim 4.3$

水の密度である。

その結果、汀線からの距離 $x=20\text{m}$ で淡塩水境界が泥岩層(在来海底面)に達しているため、淡水流出に対する塩水侵入の影響がほとんどないと考えられる。

そこで、以下ではシンプルな定常地下水流動理論(佐藤・岩佐, 2002)を参考にして、定常一方向流(水平方向)の淡水流出量を推定する。

(2) 不圧帯水層(砂質堆積層)の透水係数

観測孔B01, B02, B03については、堆積相観察と併せて深度10cm毎に試料(砂)をサンプリングし、レーザー回折式粒度分析装置による粒度分析を行った。帯水層(平均水位以下)の分析結果について表-1にまとめて示す。これらの結果にもとづき、クレーガーによる透水係数の推定法(D_{20} から推定; 土質工学会, 1982)から帯水層($D_{20}=0.35 \sim 0.41\text{mm}$)の透水係数を推定すると、 $3.0 \sim 5.0 \times 10^{-4}\text{m/sec}$ となる。

(3) 淡水地下水の流出量評価

底面が水平に近い不圧帯水層中の流れを扱う場合、水平方向の流速が鉛直方向の流速に対して、十分に卓越している際には、その流れを準一様の水平方向流と仮定できる。この流れにダルシー則(式(2))を適用し、陸域から海域に向かう地下水流速を推算した。

$$v = k \cdot i \quad (2)$$

ここに、 v は地下水流速、 k は透水係数、 i は動水勾配である。これらの結果を表-2にまとめて示す。帯水層中を水平方向に移動する地下水流速は $0.6 \sim 5.0 \times 10^{-6}\text{m/sec}$ と推算できる。汀線付近の帯水層厚 d を10mと仮定すると、単位幅(1m)あたりの淡水流出量 Q は次式となる。

$$Q = v \cdot d \quad (3)$$

図-7 地下水流向流速測定; (A)計測システム, (B)画像解析過程(粒子追跡法)

これにより、淡水地下水の流出量 Q は $0.5 \sim 4.3 (\text{m}^3/\text{day}/\text{m})$ と推算される。砂浜海岸における淡水地下水流出の通常量は $1 \sim 10 \text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ である(須田・早川, 2002)。また、関口ら(2006)は兵庫県明石市東播海岸において同様の観測を実施し、上記海岸における淡水流出量は $1.6 \text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ と報告している。東ら(2011)は新潟県上越市大潟海岸について、 $14 \text{m}^3/\text{day}/\text{m}$ と報告している。これらの値と概ね一致していることがわかる。

5. 地下水流向・流速の直接観測

前章までに定常地下水面の情報から淡水地下水の流出量を推定した。本研究では地下水流向流速計(坂田電機株式会社製)を用いて、砂浜不圧帯水層中の地下水動態

の直接的な測定についても実施した。

この計測システムでは、観測ゾンデ（図-7（A））を地下水観測孔の任意の深度に設置し、測定セルを赤外線カメラで撮影、録画する。撮影画像に写った測定セルを移動する浮遊物をトレーサーとして、その軌道を追跡し（図-7（B））、流速を測定する。本研究で設置した観測孔の塩ビパイプには地中部にスリットを施し、外周にはストレーナーを装着しており、孔内を通過する浮遊物の流向、流速は、帯水層中の地下水動態を代表していると考えられる。

本測定の結果、汀線と直交する方向の流速は、観測孔B04では 3.0×10^{-5} m/sec、観測孔B05では 1.6×10^{-5} m/secであった。定常地下水面解析から求めた地下水の水平方向流速は $0.6 \sim 5.0 \times 10^{-6}$ m/secであるので、陸域から海域へと向かう流向は定性的に一致しているが、定量的な流速に関しては差異が生じた。流向流速の計測時（2013年10月31日）の水面勾配は $0.2 \sim 0.9 \times 10^{-2}$ であるので、定常地下水面とほとんど同じであることから、計測過程での誤差、あるいは、観測孔内の流れ場が周囲の帯水層内の流れと異なる等が考えられる。誤差の要因について今後検討が必要である。

6. 結論

本研究では、新潟県寺泊野積海岸の大河津分水（新信濃川）河口より1.8km北側の砂浜域を調査エリアとして、汀線と概ね直交する地下水位観測アレイを設定した。地下水位の観測孔を4地点に設置し、連続観測を2011年12月1日から開始した。2013年10月31日までの連続地下水変動の観測結果にもとづき、水面変動の時系列解析を通じて、定常地下水面情報を抽出し、海域への淡水地下水流出量の定量的な評価を行った。また、地下水流向流速計によって地下水動態の直接観測も行った。得られた主要な結論を以下に示す。

- 1) ボーリングコアの連続採取による堆積相観察および粒度分析の結果を総合的に勘案すると、分水開削以前の在来海底地盤面（泥岩層）の上部におおよそ一様な中粒砂（粒径0.4mm）が累重していることを確認した。
- 2) 砂浜域不圧帯水層における地下水の連続観測の結果、海岸地下水は陸域における降雨イベントに応答し、水位が上昇していることを確認した。また、定常的（平

均的）な地下水面を仮定すると、海側に傾斜した地下水面が形成されており、陸域から海域への淡水地下水流出の存在が示唆された。

- 3) 定常地下水面情報を用いて、ダルシー則にもとづき、地下水の水平方向流速を求めると、 $0.6 \sim 5.0 \times 10^{-6}$ m/secと算定された。これは砂浜1m幅当たり0.5～4.3トン/日の淡水流出量に相当する。地下水流向流速計による直接計測の結果は上記の定常地下水面解析の結果と比較すると、流速値に差異が生じた。しかし、両者の結果は陸域から海域に向かう地下水流の存在を示していることで一致した。
- 4) 砂浜幅を500mと仮定しても、1日当たり250～2200トンの淡水地下水が浅海域に湧出していることになり、沿岸域の汽水環境に寄与していることが推察される。

参 考 文 献

- 東 良慶・平石哲也・関口秀雄（2013）：河口海岸域における砂浜地形の形成過程を読み解く試み，土木学会論文集B1（水工学），Vol.69，No.4，pp.1477-1482。
- 東 良慶・平石哲也・中野壮一郎（2011）：上越地域海岸潟町砂丘域における地下水動態観測，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.67，No.2，pp.1066-1070。
- 磯部一洋（1978）：新潟県寺泊海岸における堆積過程について，地質調査所月報，第29巻，第12号，pp.773-792。
- 国土交通省（2008）：総合土砂管理の取り組みについて，第86回河川整備基本方針検討小委員会補足説明資料，p.3，https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouikinkai/kihonhoushin/080208/pdf/s1-1.pdf（参照 2014-05-14）。
- 佐藤邦明・岩佐義朗（2002）：地下水理学，丸善株式会社，390p。
- 須田有輔・早川康博（2002）：砂浜海岸の生態学，東海大学出版社，p.233。
- 関口秀雄・東 良慶・クリヨ サンボド（2007）：養浜砂浜海岸域における不圧地下水の動態観測とその意義，海岸工学論文集，第54巻，pp.721-725。
- 関口秀雄・山崎秀夫・中川亮太・石田真展・東 良慶・原口強・細山田得三（2013）：河口砂浜海岸の堆積環境変遷における洪水土砂流出の重要性，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.691-695。
- 土質工学会（1982）：土質工学ハンドブック，土質工学会，p.70。
- Grant, U. S. (1948) : Influence of the water table on beach aggradation and degradation, J. of Marine Research, Vol.7, pp.655-660。
- Johannes, R. E. (1980) : The ecological significance of the submarine discharge of groundwater, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol.3, pp.365-373。