

(発表題名) 大阪湾御前浜の生物生息環境に海底地下水湧出が及ぼす影響

(氏名) 安元 純

(所属・役職) 琉球大学農学部・助教

## 1. はじめに

最近の研究成果により、海域への地下水経路による栄養塩類等の供給が、河川経路の供給と並び、沿岸海域や閉鎖性水域における栄養塩類の循環や一次生産者に重要な役割を果たしているとの認識が一般的になっている。大阪湾沿岸域においても海底地下水湧出 (SGD: Submarine Groundwater Discharge) に伴う栄養塩類等が生物生息環境に及ぼす影響は未解明であり、十分な実態解明が急務である。昨年度までの研究により、大阪湾御前浜における海底地下水湧出が生物生息環境に及ぼす影響を、現地調査と数値解析を合わせ検証し、加えて、得られた結果を大阪湾全域にスケールアップ可能な広域地下水流動モデルを構築し、大阪湾全域における海底地下水湧出量を算出した。

本年度は、昨年度構築した広域地下水流動モデルを高精度化するとともに、近年注目を集めているトレーサー手法の一つである天然放射性同位体であるラドン  $^{222}\text{Rn}$  やラジウム  $^{226}\text{Ra}$  を用いた広域的な SGD の推定手法 (例えば, Cable (1996)) を用いて大阪湾への SGD の推定結果 (梅澤 (2010)) を、広域地下水流動モデルの検証に用いた。この方法は海岸線沿いの海水中の  $^{222}\text{Rn}$  濃度を測ることで平均的な SGD を見積もることができ、加えて、実際にどの沿岸域で SGD が多いかという実態を直接観測できるため、海域の生物生息環境に及ぼす影響に関しても評価しやすくなるという大きな利点がある。この二つの代表的な SGD の推定手法である  $^{222}\text{Rn}$  を用いた地下水流出量の推定法と、広域地下水流動モデルによる SGD の推定値との比較はこれまで行われておらず研究的な意義も大きく、より信頼性の高い大阪湾への地下水流出量の推定値が得られることが期待される。以上の成果を用いて、御前浜沿岸や大阪湾全域における海底地下水湧出が生物生息環境に及ぼす影響について考察する。

## 2. 研究概要

### 2.1 現地観測 (放射性同位体ラドン $^{222}\text{Rn}$ を指標とした海底地下水湧出調査)

大阪湾集水域の複数地点において、河川水と地下水の採水を行い、海底地下水湧出 (SGD) の指標として有効な  $^{222}\text{Rn}$  濃度の測定を行った。一方で、兵庫県神戸市深江から、大阪府岬町に至る海岸線に沿って、海水中に含まれる  $^{222}\text{Rn}$  濃度を  $^{222}\text{Rn}$  測定システム (RAD7: Durrige Co Inc.) によって計測・算出し、同時測定した水温・塩分と比較を行った。特徴的な  $^{222}\text{Rn}$  濃度が観測された2地点 (神戸市深江、岬市淡輪) では、1-2 潮汐間の定点連続観測を行い、潮汐変動に伴う地下水流出特性について調べた。

### 2.2 数値解析

数値解析には、アメリカ地質調査所 (USGS: U. S. Geological Survey) で開発された MODFLOW (MODular three-dimensional finite-difference ground-water FLOW model) を利用した。MODFLOW は、地下水の流動解析において、世界中で最も普及し、事実上標準化しているコードで、パッケージと呼ばれるさまざまなモジュールを組み合わせることができる構造になっている。

解析条件は、大阪平野の3次元水理地質構造を、1グリッド約250m毎に整理し、帯水層を11層に区分した。また、数値解析に必要な各帯水層の透水係数と比貯留係数を地下水涵養委員会(2001)を参考に設定した。解析期間は、大阪平野の地下水開発が進む前の1976年から2005年までとした。また、揚水量データは大阪府の各市町村により収集されたデータを利用した。

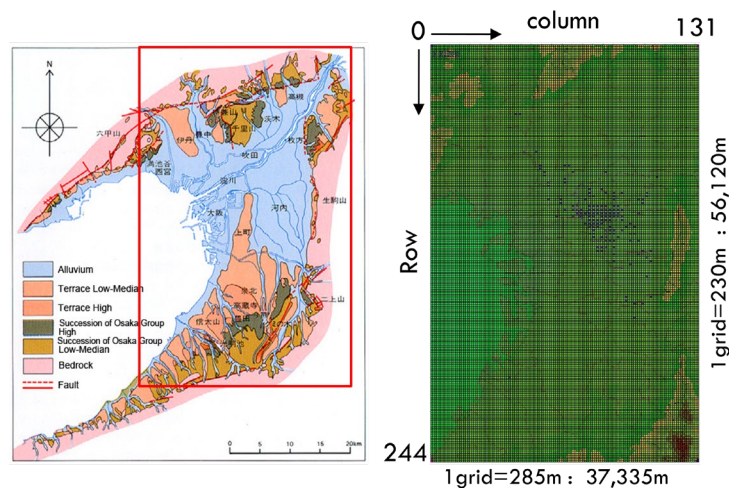


図1 解析対象範囲と解析グリッド

表1 大阪平野の地質構造と透水係数の関係

Stratigraphical division	Layer	Layer No.	Hydraulic Conductivity(cm/s)		Specific storage	Thickness	Group
			Kx, Ky	Kz	Ss (1/cm)		
Alluvium	Clay (Ma13)	No.1:	1.E-06	1.E-06	1.E-04	30-50m	G1
	Bottom	No.2:	2.E-07	2.E-07	1.E-03		
		No.3:	1.E-06	1.E-06	1.E-04		
Upper Diluvium	Tenman	No.4:	5.E-04	5.E-05	4.E-05	30-100m	G2
	Clay (Ma12)	No.5	2.E-07	2.E-07	5.E-04	50-100m	
	gravel	No.6	6.E-04	6.E-05	4.E-05		
	Clay (Ma9)	No.7	1.E-07	1.E-07	5.E-04		
Succession of Osaka Group	Ma8-Ma6	No.8	3.E-04	3.E-05	3.E-05	50-100m	G4
	Ma5-Ma3	No.9	2.E-04	2.E-05	3.E-05	50-100m	
	Ma2-Ma-1	No.10	2.E-04	2.E-05	2.E-05	50-100m	
		No.11	5.E-04	5.E-05	2.E-06	500-1000m	
Bedrock							

### 3. 結果及び考察

#### 3.1 広域地下水流動モデルによる海底地下水湧出域の推定

図2に広域地下水流動モデルより算出した第2帯水層から第1帯水層への鉛直流 $Q_z$  m/dayの分布を示す。大阪湾北部(淀川から芦屋の範囲)沿岸域においては、御前浜を含む西宮から芦屋の沿岸にかけて、

$Q_z$ は $-0.007$  m/day $\sim$  $-0.001$  m/dayと比較的高い値が分布している。これら沿岸域では、海水の静水圧に比べ地下水ポテンシャルが高くなっており、海底から地下水が湧出している可能性が考えられる。次に、西宮から淀川河口部をはさんで大和川に至るまでの沖積層沿岸域においては、 $Q_z$ の値はほぼ0 m/dayに等しく、海底からの地下水の湧出はほとんどないものと考えられる。大和川から泉佐野にかけての大沢湾中南部の沿岸域においては、 $Q_z$ の値が $-0.005$  m/day $\sim$  $-0.0007$  m/dayの範囲に分布しており、泉佐野沿岸域で約 $-0.005$  m/dayと最大値を示した。大阪湾全域をみると、SGDの湧出速度は約0.001 $\sim$ 0.003 m/dayの範囲に多く分布しており、日本の平均的な地下水涵養量に比較的近い値となった。なお、本モデルでは解析対象範囲外であるが、大阪湾北部の芦屋より西部の沿岸域や、大阪湾南部の泉佐野から淡輪にかけての沿岸域においても海底から地下水が湧出している可能性が考えられる。今後、解析対象領域を広げることで検証していきたい。

#### 3.2 沿岸水中の $^{222}\text{Rn}$ 濃度測定による海底地下水湧出域の推定

大阪湾集水域における地下水中の $^{222}\text{Rn}$ 濃度は、500 $\sim$ 3000 dpm/L (dpm: disintegration per minutes)であり(梅澤, 2010), 河川水中濃度の2.2 $\sim$ 226 dpm/Lと比較しても、100倍のオーダーで有意に高い値を持っているため、大阪湾沿岸域において、塩分と共に $^{222}\text{Rn}$ がSGDの指標として有効であることが梅澤(2010)により確認されている。

それによると、RAD7 AQUA を用いたラドン  $^{222}\text{Rn}$  曳航測定用いて海底地下水湧出 (SGD) を沿岸海水中の  $^{222}\text{Rn}$  濃度は (図 3 参照), 湾奥の淀川河口域付近 (人工護岸・埋立地) で  $0.5\sim 2.5$  dpm/L の低い値が観測された一方で, 南部の岸和田から阪南地域では, 最大で  $4.0$  dpm/L の値が観測され, 海底地下水湧出の寄与を示唆している. 塩分と  $^{222}\text{Rn}$  濃度を対比させてみると, 淀川や大和川などの一級河川が流入するエリアでは, 塩分が一気に低下するものの  $\text{Rn}$  濃度の上昇はあまり見られず, 一方で, 六甲山地近くの神戸地区や, 大阪南部の岸和田, 泉南周辺エリアではあ, 塩分の低下があまり見られないにも関わらず,  $\text{Rn}$  濃度が上昇する様子が見て取れており,  $\text{Rn}$  濃度の高い水塊の流入が示唆された.

### 3.3 現地観測 ( $^{222}\text{Rn}$ 濃度の測定) と数値解析 (広域地下水流動モデル) との比較

上述したように, 広域地下水流動モデルより推定される海底地下水湧出 (SGD) は, 大阪湾北部芦屋から西宮にかけての沿岸部と, 大阪湾南部の大和川から泉佐野にかけての沿岸域一体で起こっていると推定される. 一方, 沿岸水中の  $^{222}\text{Rn}$  濃度の分布も同様の傾向を示している. 両者の相違点は, 数値解析では SGD が大和川以南にかけて湧出していると推測されるのに対して, 沿岸水中の  $^{222}\text{Rn}$  濃度は, 大和川から泉佐野にかけての埋立地や人工護岸で覆われた沿岸域では小さな値を示しており, SGD も少ないと推定される. この原因としては, 埋立地や人工護岸等の沿岸構造物が海底から地下水が湧出するのを抑制している可能性が考えられる. 一方で, 岸和田沿岸では, 護岸で覆われた場所でも高い  $^{222}\text{Rn}$  濃度が確認されている. その理由としては, 岸和田から泉佐野にかけては粘土層を含まない大阪層群 (広域モデル上の第 11 層) が海底面に慮出しており, 他の沿岸域に比べ地下水が海底から湧出しやすい地質構造になっており, 地下水が護岸構造物を回避して湧出している可能性が考えられるが, 今後, さらに検証を深めたい.

### 3.4 大阪湾への海底地下水湧出 (SGD) 量の推定

広域地下水流動モデルより算出した第 2 帯水層から第 1 帯水層への鉛直流  $Q_z$  m/day のうち,

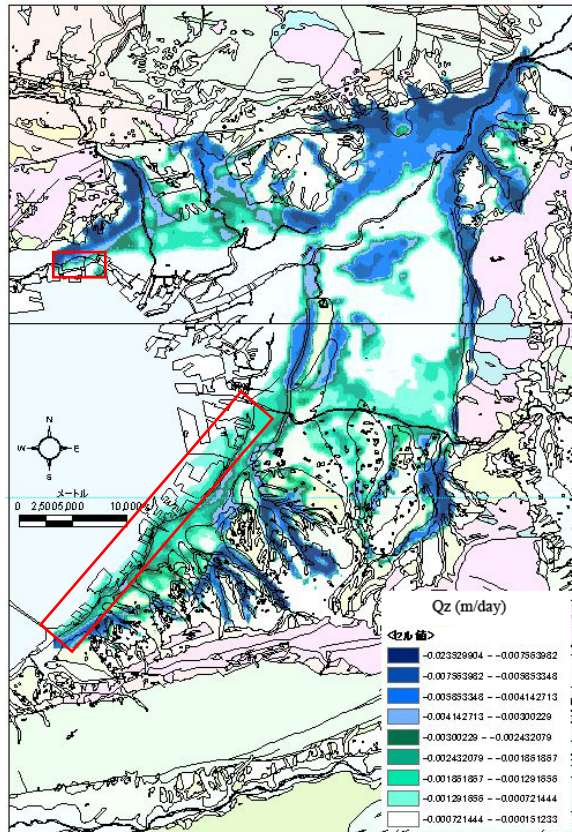


図 2 大阪湾における海底地下水湧出 (第 2 帯水層から第 1 帯水層への鉛直流  $Q_z$  m/day) 分布

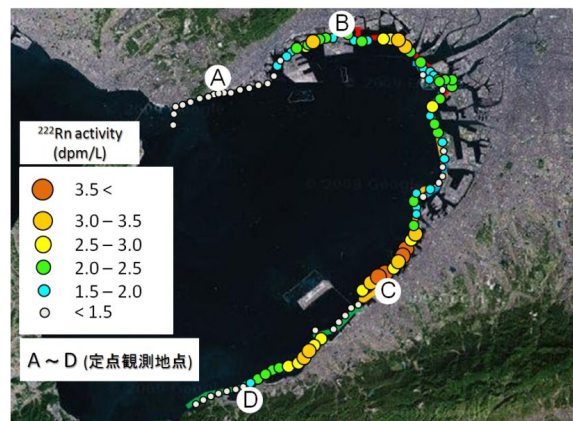


図 3 沿岸水中の  $^{222}\text{Rn}$  濃度

大阪湾全域の海底面からの地下水湧出量を合計した結果、解析期間 29 年（1976~2005 年）で、平均  $0.165 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$  と推定された。

一方で、 $^{222}\text{Rn}$  濃度の観測値を基に推定した全海底地下水湧出は、沿岸部での地下水湧出帯の幅を 100~200m であると仮定すると（採水のための航路が沿岸から 50m~300m 程度離れていたことを考慮すると、実測値の  $^{222}\text{Rn}$  値を説明する湧出帯として適切である）、 $0.08\sim 0.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$  の流入量が地下水を通じてのものであると見積もられている（梅澤，2010）。この量は、広域地下水流動モデルと  $^{222}\text{Rn}$  濃度を用いて推定した地下水湧出量と比較的よく対応しており、数値解析結果の妥当性を示すものとなった。

広域地下水流動モデルより推定された海底地下水湧出量と、淀川牧方流量観測所の 25 年間（1980 年~2005 年）の平均河川流量  $267.5 \text{ m}^3/\text{sec}$  ( $23.1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ ) と比較すると 0.7% に相当し、大和川の平均流量  $41.9 \text{ m}^3/\text{sec}$  ( $3.62 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$ ) と比較すると約 4.6% に相当し、大阪湾全域における海底地下水湧出のフラックスとしての寄与は、河川水フラックスの 1% にも満たない結果となった。

#### 4. おわりに

本研究では、大阪湾御前浜の生物生息環境に海底地下水湧出（SGD）が及ぼす影響を検証する目的で、本年度は御前浜における解析結果を大阪湾全域にスケールアップする目的で構築した 3 次元広域地下水流動モデルを高精度化すると共に、その結果を検証する目的で、海底地下水湧出の指標として有効な  $^{222}\text{Rn}$  の大阪湾沿岸水中の濃度を計測し、数値解析と現地観測とを併せ、大阪湾への全地下水流出量と海底地下水湧出の分布域を推定した。数値解析の結果、大阪湾への全地下水流出量は、解析期間 29 年（1976 年~2005 年）で、平均  $0.165 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$  と推定された。また、SGD の湧出速度は約  $0.001\sim 0.003 \text{ m}/\text{day}$  の範囲に多く分布しており、日本の平均的な地下水涵養量に比較的近い値となった。一方、沿岸水中の  $^{222}\text{Rn}$  濃度の計測により推定された海底地下水湧出量は  $0.08\sim 0.2 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{day}$  と推定されており、両者の値は比較的近く、SGD の湧出域にも整合性がみられ、数値解析結果の妥当性を示す結果となった。大阪湾全域でみると陸域からの地下水流出量は、河川流量に比べて 1% 未満と比較的小さな値となった。大阪湾北部と南部の沿岸域では、地下水ポテンシャルが海水の静水圧よりも高く、御前浜で確認されたように、海底から地下水が湧出していると考えられ、地下水が海域への経路となっていることは間違いと考えられる。

今後は、他の研究者によって実施されている地下水中の栄養塩濃度を集約するとともに、病原性微生物や有機化学物質、金属等の有毒な化学物質の濃度を計測することで、大阪湾の生物生息環境に海底地下水湧出が及ぼす影響についてさらに考察し、大阪湾圏域における地下水管理の在り方について検討していきたい。

#### 参考文献

梅澤有（2010）：放射性同位体元素を用いた地下水湧出量・栄養塩負荷量の定量と大阪湾内の滞留時間の評価，平成 21 年度大阪湾圏における海域環境の再生・創造に係る研究の助成事業成果発表会要旨集。

J. E. Cable, W. C. Burnett, J. P. Chanton, G. L. Weathly (1996): Estimating discharge into the northeastern Gulf of Mexico using radon-222, *Earth and Planetary Science Letters*, 144, 591-604. W.C.