

# 沿岸海域における海底湧出地下水の挙動に関する基礎的検討

## A Fundamental Study on the Behaviour of Submarine Groundwater Discharged into Coastal Sea

多部田 茂\*・田辺 直\*\*・河島 洋平\*\*\*・木下 嗣基\*\*\*\*

Shigeru TABETA, Nao TANABE, Yohei KAWASHIMA and Tsuguki KINOSHITA

**要旨:** 陸域から海域への物質供給経路は従来河川を中心に考えられていたが、海底から湧出する地下水経由のものも無視できない場合があることがわかってきた。湧出地下水の沿岸海域環境への影響を評価するためには、湧出水量やそれに含まれる物質の濃度すなわち海域への物質フラックスの把握と、その供給された物質がどのように沿岸域中を輸送され生態系に対する影響を与えているかを評価することが重要である。本研究では、数値シミュレーションと非定常ボックスモデルにより海域の海水交換量を算出することによって、海域の物質収支から地下水湧出量の推定を試みた。また、水理実験と非静水圧モデルによる数値シミュレーションによって、湧出水の初期の挙動特性を海域の水平流速と湧出流速の比を用いて整理した。

**キーワード:** 海底湧出地下水, ボックスモデル, 密度噴流, 数値シミュレーション

### 1. 緒言

陸域から海域への物質供給経路は従来河川を中心に考えられていたが、海底から湧出する地下水経由のものも無視できない場合があることがわかってきた<sup>1)</sup>。例えば黒部川扇状地沖や八代海は、海底地下水湧出量が多いことで知られており、沿岸海域環境への影響に注目した調査研究も行われている<sup>2)3)4)</sup>。

湧出地下水の沿岸海域環境への影響を評価するためには、湧出水量やそれに含まれる物質の濃度すなわち海域への物質フラックスの把握と、その供給された物質がどのように沿岸域中を輸送され生態系に対する影響を与えているかを評価することが重要である。地下水に含まれる各種物質の濃度の推定は、地下水湧出ポイントのサンプリングや地質学的調査により可能であるが、フラックスを推定するための地下水の湧出量の推定方法

に確立された手法はない。また、湧出後の地下水は周囲の海水との密度差や流れ場の影響を受けて複雑な挙動を示すことが予想される。

本研究では、対象海域の流動場の数値シミュレーションと非定常ボックスモデルにより海域の海水交換量を算出することによって、海域の物質収支から地下水湧出量の推定を試みた。また、湧出点近傍の現象を模擬した水理実験と非静水圧モデルによる数値シミュレーションによって、湧出水の初期の挙動について検討した。

### 2. 海域への地下水湧出量の推定

#### 2.1 推定手法

海底からの地下水の湧出は湧出地点の特定が困難であることや湧出形態が様々であることから、一般に海域への湧出量を把握するのは非常に難しい。ここでは、個々の湧出点における湧出量を積

\* 正会員 東京大学, \*\* 三井海洋開発, \*\*\* 埼玉県, \*\*\*\* 正会員 国立環境研究所

算するのではなく、対象海域全体の物質収支からトータルの地下水湧出量を見積もることを試みる。対象とする海域について、Fig.1のようなボックスモデルを考える。このとき、定常状態における水収支と塩分収支の式は以下ようになる。なお、河川水と海底湧出水の塩分はいずれも0と仮定している。

$$R + G + (P - E) = Q_0 \quad (1)$$

$$SQ_0 + (S - S_0)Q_1 = 0 \quad (2)$$

通常ボックスモデルでは、対象海域と外海間のフラックス  $Q_0, Q_1$  を未知数として、河川流量 ( $R$ )、降水量 ( $P$ )・蒸発量 ( $E$ )、対象海域の塩分 ( $S$ )、外海の塩分 ( $S_0$ ) の情報からこれらの量を求める。しかし本研究では、海底地下水湧出量  $G$  が不明であるので、未知数が過多となる。そこで海水交換量  $Q_1$  を数値シミュレーションによって求めることを考える。

$Q_1$  は大局的にみた海域の海水交換特性であり、外海との境界における流速や塩分などのローカルな情報からこれを求めることはできない。そこで次のように仮想的なトレーサーを対象とした非定常なボックスモデルを用いて算出する。河川流入がない場合の保存物質の対象海域内の平均濃度

$M$  の時間変化は、

$$V \frac{dM}{dt} = -(M - M_0)Q_1 \quad (3)$$

である。ここで  $M_0$  は外海の物質濃度である。そこで、数値シミュレーションによって  $M$  の時間変化を調べその結果から  $Q_1$  を求めることにする。すなわち、(3) 式を差分形式に書き直して整理すると

$$Q_1(t) = - \frac{V}{M(t) - M_0(t)} \frac{M(t + \Delta t) - M(t)}{\Delta t} \quad (4)$$

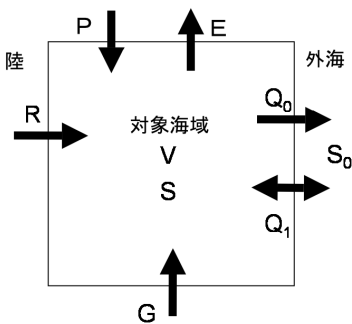
であるから、ある時間  $t$  における湾内の平均濃度  $M(t)$  と例えば1潮汐後の平均濃度  $M(t + \Delta t)$  から1潮汐間の  $Q_1$  を計算することができる。

## 2.2 八代海福浦の海底地下水湧出量の推定

八代海で最も湧水量が多い可能性のある地点のうちの一つである福浦を対象海域として、前節の手法による海域への地下水湧出量の推定を行った。ここでは湾への平均的な湧出量を求めることとし、平均的な海水交換は  $M_2$  潮汐によるものと仮定し、ボックスモデルに用いる塩分データも年平均値を用いた。

福浦の海水交換特性を調べるための数値シミュレーションには海水流動モデル<sup>5)6)</sup>を使用した。モデルは静水圧近似の鉛直21層のマルチレベル(Z座標)モデルである。計算格子をFig.2に示す。八代海全体(Rank1)の流動パターンから福浦周辺(Rank3)の詳細な流れ場までを連続的に再現するために、3段階のネスティングを行った。境界条件は東シナ海側2カ所(OB1, OB2)と有明海側1カ所(OB3)で潮汐および水温塩分を与えた。

シミュレーションの検証のために福浦湾口付近(Fig.2のA点)で約2週間の流速の連続観測を行い、観測期間に対応した再現計算を行った。湾内水と外海水の交換を考えるとその境界である湾口付近の流れは海水交換特性と強い関係があ



V: 対象海域の体積、S: 対象海域の塩分  
 $S_0$ : 外海の塩分、R: 河川流入量、  
 P: 降水量、E: 蒸発量、  
 $Q_0$ : 外海への海水流出量  
 $Q_1$ : 外海との海水交換量、  
 G: 海底湧出地下水流入量

Fig.1 海底湧出地下水を考慮したボックスモデルの概念図

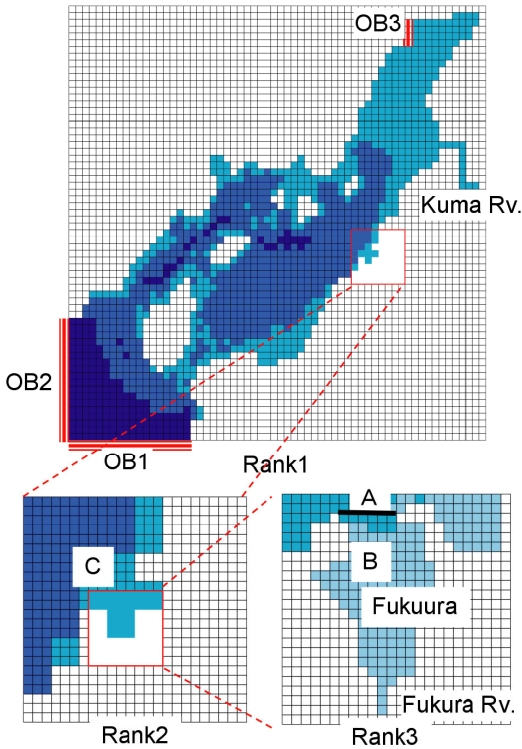


Fig.2 福浦の海水交換シミュレーションの計算格子。格子サイズは Rank1=1000m, Rank2=333m, Rank3=111mである。

ると考えられるが、Fig.3に示すように、シミュレーションによって湾口部付近の流れが概ね再現されている。

次に福浦の平均的な海水交換率を求めるために、初期状態で福浦湾内 (Fig.2 の Rank3 の太線以下の領域) の濃度を1, 湾外で濃度を0とするトレーサーを配置し、トレーサー濃度の時間変化をシミュレーションにより求め、前節の方法により海水交換率を求めた。このとき、開境界ではM2分潮を与えた。Fig.4より福浦のM2潮汐1周期間の海水交換率 $\gamma$  ( $= Q_1/V$ )は約0.12と推定される。

熊本県水産研究センターによる1992年から2003年の観測データから福浦湾内外 (それぞれ Fig.2 の B および C 付近) の平均塩分濃度差  $S_0-S$  を求めたところ、0.17であった。さらに、福浦に

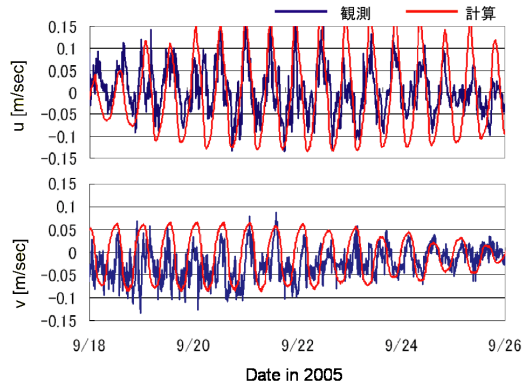


Fig.3 福浦湾口における流速の時系列。(上段)東西方向流速(下段)南北方向流速

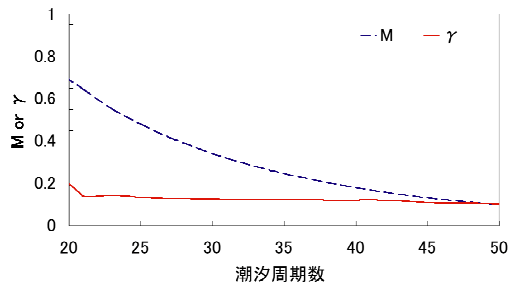


Fig.4 福浦の海水交換シミュレーションにおける湾内のトレーサー濃度 M と交換率  $\alpha$  の時間変化

注ぐ唯一の表層河川である福良川の流量  $6700\text{m}^3/\text{day}$  を用いて、(1)(2)式より湧水量  $G$  を求めると、約  $2600\text{m}^3/\text{day}$  となった。陸水の水収支による推定では、八代海全体の河川流出量と海底湧水量の比は約 9:1 であるが<sup>4)</sup>、今回の推定は福浦の地下水湧出量はそれを上回る比率であることを示唆している。

### 3. 湧出水の海域での挙動

#### 3.1 水理実験

湧出水の挙動に対する流量や湧出領域の大きさなどの影響を系統的に把握するために水槽実験を行った。実験装置には回流水槽 (観測部の長さ 1m, 幅 30cm, 高さ 30cm) を使用した。Fig.5に示すように、低密度の地下水湧出を模擬するために、水槽の底から温水を湧出させ、潮流などのバ

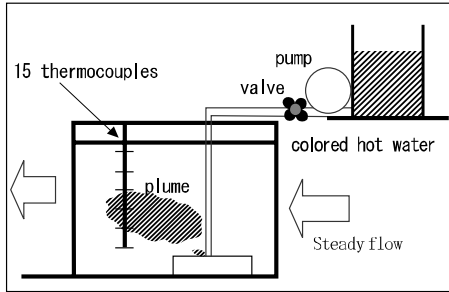


Fig.5 水理実験の実験装置概要

ックグラウンドの流れを回流水槽による定常流で模擬した。流量の調節はポンプの出力とバルブで行った。湧出断面にはセラミック多孔質体か濾紙を詰め、断面から一様に湧き出るようにし、湧出口内部に熱電対を挿入し、湧出水の温度を測定した。さらに湧水に水性インクを混ぜることによって湧出水の挙動を可視化するとともに、鉛直方向 15 個の熱電対による水温分布測定を湧出部から下流方向にかけて行った。

現象を支配する無次元パラメータとして内部フルード数  $Fr$  および無次元湧出速度(湧出流速と周囲流速の比)  $\beta$  を考慮した。 $Fr$  と  $\beta$  は

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} gL}}, \quad \beta = \frac{W}{U} \quad (5)$$

で表される。ここで  $U$  は場の水平流速、 $\rho$  は周囲の基準密度、 $\Delta\rho$  は基準密度と湧水密度の差、 $L$  は湧出断面の直径、 $W$  は湧出流速である。

実験は湧出断面直径( $L$ )について 1.5cm, 4.0cm, 11.3cm の 3 ケース、湧出流量は 50, 100, 200, 500ml/min の 4 ケースの組み合わせで計 12 ケース行った。水平流速  $U$  は 0.03m/s の一様流とした。このとき、内部フルード数( $Fr$ )は 0.20~0.99、無次元湧出流速( $\beta$ )は 0.003~1.5 であった。

周囲より低密度の流体が特定の領域から連続的に供給される現象である密度噴流の経路については、既往の研究により解析的な検討が行われて

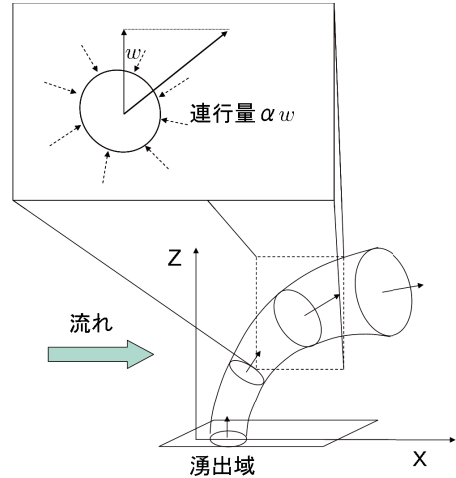


Fig.6 密度噴流の解析モデルと連行の仮定

いる。Fig.6 のように  $x$  軸の正方向に向かう流速  $U$  の一様流中に吹き出している鉛直流速  $w$  の密度噴流の経路は  $\frac{dz}{dx} = \frac{w}{U}$  で与えられる。今、鉛直流速  $w$  に比例する連行  $\alpha w$  ( $\alpha$ : 比例係数) が生じていると仮定すると、質量及び運動量の保存から、経路の軌跡は次式で表すことができる<sup>7)8)</sup>。

$$\frac{z}{l} = \alpha \left( \frac{x}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (6)$$

ただし

$$\alpha' = \frac{3^{1/3}}{2\alpha^{2/3}}, \quad l = \beta \cdot Fr^{-2}$$

$\alpha$  が大きくなるとプリュームと周囲の海水の密度差が小さくなるので、勾配  $\alpha'$  は小さくなる。この解析解に則して実験結果を整理した。

Fig.7 に 3 ケースの実験における湧出水の浮上経路を示す。実験結果はほぼ解析解に従っていることがわかる。しかしながら経路の勾配  $\alpha'$  は既往の研究では概ね 1.2 程度の値であるが、今回の実験ではそれよりも小さい値となり、またケースごとにばらつく結果となった。Fig.8 は浮上経路の勾配  $\alpha'$  を流速比  $\beta$  で整理したグラフである。 $\beta$  が減少するにつれて  $\alpha'$  も減少する傾向がわかる。

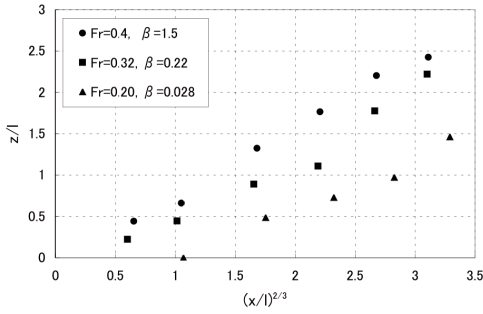


Fig.7 実験による湧出水の浮上経路

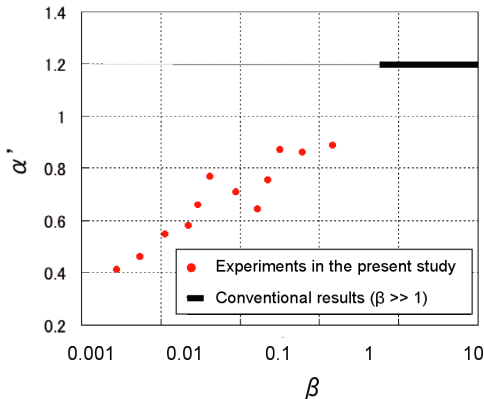


Fig.8 流速比  $\beta$  と経路の勾配  $\alpha'$  の関係

### 3.2 数値計算

潮流や海流の存在下での海底湧出地下水の湧出直後の挙動をシミュレーションするために、一様な水平流中に底面から低密度水が湧出する現象の数値計算を行った。数値計算には、デカルト座標系での Boussinesq 近似を用いた Navier-Stokes 方程式と連続の式、熱・塩分の輸送方程式、状態方程式による三次元非定常非圧縮流れのモデルを用いた。変数配置はスタッガード、圧力解法には HSMAC 法、乱流モデルには  $k-\epsilon$  モデルを使用した。

計算領域は長さ 2m×幅 0.4m×高さ 0.3m で、格子間隔は、長さ方向が湧出点付近で最も細かく 1cm であり公比 1.05 で湧出点から離れるに従って拡大した。幅方向には 1cm で一定とし、鉛直方向には底面付近の 4 格子は 1cm とし 5 格子目から上方は公比 1.05 で拡大した。格子総数は約 8 万格子

である。計算領域の左側に流速一定の流入境界条件を課し、計算領域右側で圧力を固定し流出させた。流入境界では乱流エネルギー  $k$  は運動エネルギーの 1% とし、乱れの長さスケールを水深としエネルギー散逸率  $\epsilon$  を与えた。水温・塩分に関しては、勾配 0 の条件を与えた。なお壁面及び自由表面の接線方向にはフリースリップを課し、壁面法線方向には、流量・熱・塩分・ $k \cdot \epsilon$  のフラックス 0 を課した。

まず数値モデルの妥当性を検証するために水理実験の再現計算を行った。比較対照となる実験は湧出断面直径 ( $L$ ) 11.3cm、内部フルード数 ( $Fr$ ) 0.20、無次元湧出流速 ( $\beta$ ) 0.028 のケース (湧出水と周囲の海水の密度差が約  $20.8\text{kg/m}^3$  に相当) である。Fig.9 に鉛直断面の水温分布を示す。浮上経路に関しては実験結果を良好に再現している。

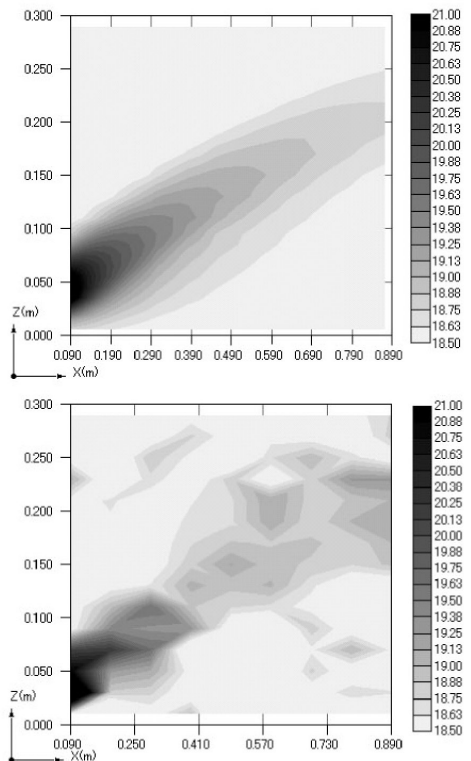


Fig.9 計算結果(上)と実験結果(下)の比較.  
コンターは水温で単位は $^{\circ}\text{C}$

水理実験において勾配 $\alpha'$ が $\beta$ 依存していたのはバックグラウンドの乱流による影響と考え、これを確認するための数値実験を行った。計算条件は Table 1 の 4 ケースである。いずれのケースも内部フルード数は 0.20 一定とし、その他の条件は上記再現計算と同様である。ただし表中の  $k_{in}$ ,  $\nu_t$  はそれぞれ流入境界での乱流エネルギーと、そのときの渦動粘性係数である。この結果から $\alpha'$ を求めると $\beta=0.028$ の計算 No.1 で 0.41, No.2 で 0.55 となったのに対し、 $\beta=0.28$ の計算 No.3 で 0.68, No.4 で 0.73 となった。この結果は周囲の乱れが増加したときの $\alpha'$ への影響は、 $\beta$ が小さいほうが感度が高いことを示している。本研究で対象とする現象の $\beta$ は従来の密度噴流の研究が対象としていた $\beta$ より小さい。そのために、 $\alpha'$ がバックグラウンドの乱流場の影響を受けて変化すると考えられる。

実海域では、例えば黒部川扇状地沖の海底地下水湧出点では $\beta$ はさらに小さく、今回の水理実験の範囲外である<sup>9)</sup>。そこで $\beta$ が非常に小さい場合の湧出水の挙動を数値計算によって検討した。このケースでは湧出水はあまり浮上しないことが予想されたため、海底面にはノースリップ境界条件を与え、それに伴い乱流モデルを低レイノルズ型の  $k-\epsilon$  モデルを用いた。鉛直方向の格子間隔は底面を最小の 1mm とし、公比 1.1 で拡大させ、格子数は 36 とした。

Fig.10 は各鉛直断面の中で、最も温度が高い格子をブルームの中心としてプロットした浮上経路

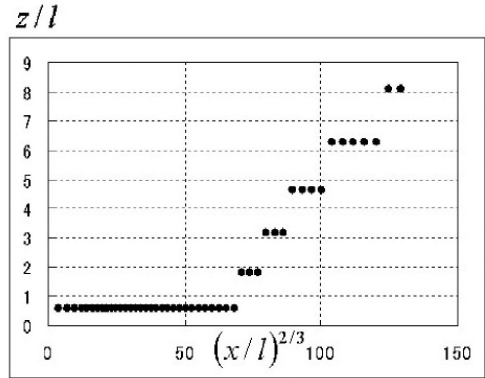


Fig.10 黒部川扇状地での条件における浮上経路

を表し、原点は湧出の中心点である。湧出直後は海底面に張りつくように輸送され、その後非常に小さい浮上角 $\alpha'$ で上昇している。このような経路となる理由は、 $\beta$ が水理実験で用いた程度の値のときには湧出水の鉛直流速の最大値はほぼ湧出点付近であるのに対し、湧出流速が非常に小さい場合には鉛直流速は湧出点から下流側に離れた点で最大になるためである。このことから黒部川扇状地沖での湧出水は海底面に沿って拡散していることが示唆される。実際にこの湧出点近傍では、湧出水の栄養塩供給によって維持されていると考えられる藻場の存在が報告されている<sup>10)</sup>。この事実は、黒部川扇状地沖の条件では湧出水は海底付近に留まるであろうという上記の考察を支持している。

以上より、湧出水の挙動は海域の水平流速と流出流速の比である $\beta$ の値により Fig.11 のような 3 つのパターンに分類することができる。 $\beta$ が十分大きいときの経路は既往の研究どおり $\alpha'$ が一定となる(強噴流型)。 $\beta$ が小さくなると場の乱れの影響により浮上の効果が抑えられ、見かけ上浮上経路の勾配 $\alpha'$ が小さくなる(弱噴流型)。さらに $\beta$ が小さくなると、ほとんど底面に沿う経路となる(湧出型)。

Table 1 バックグラウンド乱流の影響

No	$\beta$	$k_{in}$	$\nu_t$	$\alpha'$
1	0.028	$9.0 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-4}$	0.41
2	0.028	$9.0 \times 10^{-6}$	$9.0 \times 10^{-4}$	0.55
3	0.28	$9.0 \times 10^{-7}$	$2.8 \times 10^{-4}$	0.68
4	0.28	$9.0 \times 10^{-6}$	$9.0 \times 10^{-4}$	0.73

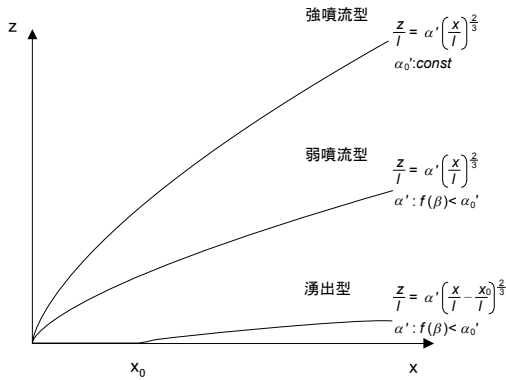


Fig.11 湧出水の浮上経路のパターン

#### 4. 結言

海底湧出地下水に関して、海域への湧出量の推定と湧出後の初期の挙動について数値シミュレーションを用いて検討した。

海域への湧出量の推定に関しては、数値シミュレーションと非定常ボックスモデルにより海域の海水交換量を算出することによって、海域の物質収支から地下水湧出量の推定を試みた。この手法による推定の精度についてはさらなる検討が必要であるが、実海域での計測が非常に困難な量であるため、海域によっては有効な手法になりうると考えられる。

湧出後の初期挙動に関しては、水理実験と非静水圧モデルによる数値計算によって、湧出水の挙動特性を海域の水平流速と湧出流速の比を用いて整理した。また、黒部川扇状地沖で地下水経路の栄養塩は付近の藻場の維持に貢献している可能性があることがわかった。

#### 謝辞

本研究に関連する現地観測において、東京大学・徳永朋祥准教授、熊本大学・嶋田純教授と両研究室のスタッフおよび(有)福田水産(熊本県葦北郡)に多大なご協力をいただいた。また、熊本県水産研究センターには貴重なデータを提供し

ていただいた。ここに謝意を表す。なお、本研究の一部は(財)クリタ水・環境科学振興財団の研究助成により行われた。

#### 引用・参考文献

- 1) Taniguchi M., W.C., Cable, J.E. and Turner, J: Investigation of submarine ground water discharge. Hydrol. Process., Vol.16, pp.2115-2119, 2002.
- 2) 伊藤敏昭, 藤井昭二: 富山堆積盆地の地下水の水収支, 富山県地学地理学研究論集, Vol.10, pp.63-74, 1993.
- 3) 徳永朋祥, 中田智浩, 茂木勝郎, 渡辺正晴, 嶋田純 他: 沿岸海底から湧出する淡水性地下水の探査および陸地地下水との関連に関する検討—黒部川扇状地沖合いでの例—, 地下水学会誌, Vol.45, No.2, pp.133-144, 2003.
- 4) 第3回八代海域モニタリング委員会資料, 国土交通省九州地方整備局, 2004.
- 5) 木下嗣基: ネスティングバージョンの概要, 第3回 MEC モデルワークショップ, pp.165-172, 2002.
- 6) T. Kinoshita, S. Tabeta, M. Fujino: Numerical simulation of artificial purification system by using hydrostatic and FULL-3D combined model, Proc. 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 1, pp.743-748, 2003.
- 7) P.R. SLAWSON and G.T. CSANADY: On the mean path of buoyant, bent-over chimney plumes. J. Fluid Mech., Vol.28, No.2, pp.311-322, 1967.
- 8) 首藤伸夫: 流水中での重力拡散, 海岸工学講演会論文集, Vol.17, pp.349-354, 1970.
- 9) S. Tabeta, N. Tanabe, T. Kinoshita: Fundamental Study on the Behaviour of Submarine

Groundwater Discharged into the Coastal Sea,  
Proc. OCEANS' 06 Asia Pasific IEEE, 2006.

- 10) 藤田大介：海底湧水によって維持される藻場，月刊海洋，Vol.36，No.11，pp.810-815，2004.

## 著者紹介

### 多部田 茂（正会員）

東京大学大学院新領域創成科学研究科環境システム学専攻，平成 6 年東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻博士課程修了，同年横浜国立大学工学部建設学科勤務，平成 11 年東京大学大学院新領域創成科学研究科勤務，現在同大学准教授，博士（工学），日本船舶海洋工学会，日本海洋学会，日本水産工学会会員  
E-mail: tabeta@k.u-tokyo.ac.jp

### 田辺 直

三井海洋開発，平成 17 年東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻修士課程修了，同年三井海洋開発勤務，修士（環境学）

### 河島 洋平

埼玉県職員，平成 18 年東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻修士課程修了，平成 19 年埼玉県勤務，修士（環境学）

### 木下 嗣基（正会員）

独立行政法人国立環境研究所地球環境研究センター（茨城県つくば市小野川 16-2），昭和 45 年生まれ，平成 11 年 3 月東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻博士課程修了，同年 4 月東京大学新領域創成科学研究科勤務，平成 16 年 10 月独立行政法人国立環境研究所，現在 NIES フェロー，博士（工学），日本船舶海洋工学会，環境科学会会員  
E-mail: kinoshita.tsuguki@nies.go.jp

## A Fundamental Study on the Behaviour of Submarine Groundwater Discharged into Coastal Sea

Shigeru TABETA, Nao TANABE, Yohei KAWASHIMA and Tsuguki KINOSHITA

**ABSTRACT** : It has been considered that most of the terrestrial water and contained materials are supplied into the ocean through the rivers. However, recent studies show that the submarine groundwater discharge (SGD) is also significant as the route of water and materials from the land to the ocean. In order to evaluate the influences of SGD on the coastal water environment, it is important to investigate the amount of SGD flux into the sea as well as the behaviour of discharged water and materials in the coastal water. In the present study, the total SGD flux is estimated by the budget analysis of the target sea area, in which a parameter for water exchange between the coastal zone and the ocean is calculated by means of a numerical simulation of water movement and a dynamic budget model. The behaviour of discharged groundwater is also investigated by means of hydraulic experiments and numerical simulations using non-hydrostatic model. It is found that the early-stage behaviour of the discharged submarine groundwater as buoyant plume could be categorized into three types due to the ratio of discharge velocity to the background horizontal current velocity.

**KEYWORDS** : *Submarine Groundwater Discharge, budget model, buoyant plume, numerical simulation*