

海底湧出地下水の沿岸海域での挙動に関する研究

環境システムコース海洋環境システム学分野

36649 田辺 直

1 はじめに

海底地下水湧出が、陸域から沿岸海域への物質供給源の一つとして指摘されている。沿岸域は人間活動が活発であり、さまざまな汚染物質が潜在している可能性が高い。また海底湧水は長期にわたり土壌中を浸透しているため、その栄養塩濃度は河川水の数倍となることもある。従って、このような種々の物質が海底から供給されることになるため、海底地下水湧出は沿岸海域の生態系へ影響を与えていることが予想される。

例えば、富山県黒部川扇状地沖は、この海底地下水湧出量が多いことで知られ、黒部川流域の水収支から、少なくとも黒部川流量の1/4程度が海底から湧出していると見積もられている。この湧出水を化学分析した結果によると、栄養塩である硝酸塩の濃度が黒部川のその4倍程度であることがわかり、環境への影響が指摘されている。実際、湧出域と藻場が重なっている部分も確認されている。

このような湧出地下水の沿岸海域環境への影響をより詳細に評価するために、これまで、湧出点の位置や湧出量、湧出水の含有物質濃度などが調べられており、海域への物質のフラックスに対する理解は深まりつつある。しかし、その供給された物質がどのように沿岸域中を輸送されるかが把握されない限り、生態系に対する影響を評価することはできない。言い換えると、海底地下水の湧出後の挙動を把握することが海底地下水が沿岸海域に与える影響を知ることにつながる。

そこで本研究では海底地下水の湧出後の挙動を明らかとすることを目的とする。周囲の流れに対して湧出流速非常に小さい海底地下水が湧き出たときの挙動についての知見を現地観測・水理実験・数値計

算から得る。

2 現地観測

富山県黒部川扇状地沖の海底地下水湧出点付近で現地観測を行った。湧出地下水の挙動を知るために、湧出点近傍での水温、塩分、流速を連続計測し、また湧出点周辺で船上から水温・塩分を三次元的に観測した。観測位置の水深は約19mであった。その結果、水温・塩分への影響はあまり見ることができなかった。また海域の平均的な水平流速は0.1m/s程度であった。

3 水理実験

湧出地下水の挙動を再現した水理実験を行った。場の成層状態、流量、湧出領域の大きさなどのパラメータを変えた実験を行い、湧出水の挙動に対する影響を系統的に把握することを試みた。

3.1 実験装置概要

実験装置には東京大学大学院新領域環境モデリング統合学分野所有の成層回流水槽（長さ1m、幅30cm、高さ30cm）を使用した。この水槽は温度成層した淡水を回流させることができ、この水槽の底から温水をチューブで伝わせて湧出させ、浮力を再現した（図1）。流量の調節はポンプの出力とバルブで行った。湧き出し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、湧出出口内部に熱電対を挿入し、出口温度を測定した。

水槽の下流部に設置させた15個の熱電対による水温測定を流れ方向に9点行い、さらに湧水に混ぜた水性インクによって可視化されたブルームを画像記録し、現象を検知した。

3.2 相似則

今回の水理実験では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 および湧出流速と周囲流速の比 β を考慮した。 Fr と β は

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

で表される。ここで U は場の流速 (m/s), ρ は周囲の基準密度 (kg/m^3), $\Delta\rho$ は基準密度と湧水密度の差 (kg/m^3), L は湧出断面の直径 (m), W は湧出流速 (m/s) である。

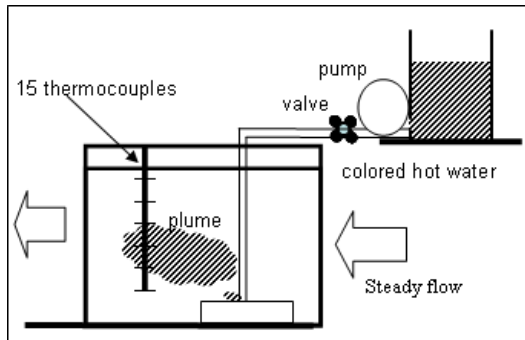


図 1 : 実験装置概要

3.3 実験条件

実験は湧出断面の直径が 1.5cm, 4.0cm, 11.3cm の 3 種類, 湧出流量が 50, 100, 200, 500ml/min, さらに成層していない場合としている場合の組み合わせで計 24 ケース行った。水平流速は 0.03m/s の一様流とした。 $Fr=0.20\sim 0.99$ であり, $\beta=0.003\sim 1.5$ であった。

3.4 実験結果

水温の鉛直断面分布と実験の様子を撮影した画像は概ね一致し, 湧出水の経路をデータから追うことができた。湧出水は複雑な渦構造を有しており, 成層状況下では明らかに, その上昇距離は小さくなった。

3.5 考察

密度噴流の経路は図 2 のように鉛直流速に比例する連行が起きると仮定すると次式で表すことができる。

$$z/l = \alpha' (x/l)^{2/3}$$

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

この解析解に則り, 実験結果を整理する。図 3 は 3 種類の実験における湧出水の浮上経路である。実験結果は解析解に従っていることがわかる。しかしながら勾配 α' は既往の研究では概ね 1.2 程度の値となるが, ここでは, それほど大きくならず実験ごとにばらついた。図 4 はこの勾配 α' を β で整理したグラフである。 β が減少するにつれて α' も減少する様子が見て取れる。これは β が小さくなるほど周囲の乱れによる浮力の失われ方が大きくなるためと考えられる。

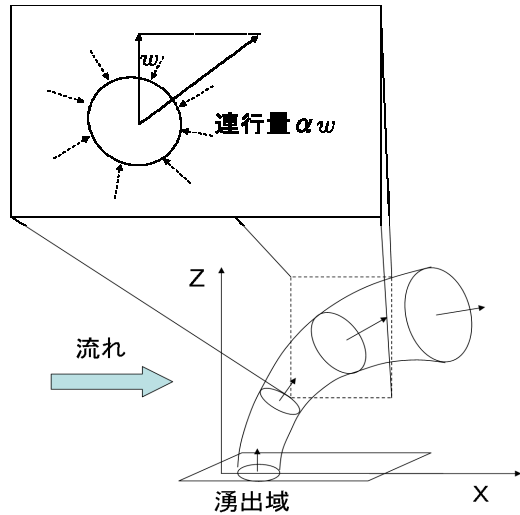


図 2 : 密度噴流のモデルと連行の仮定

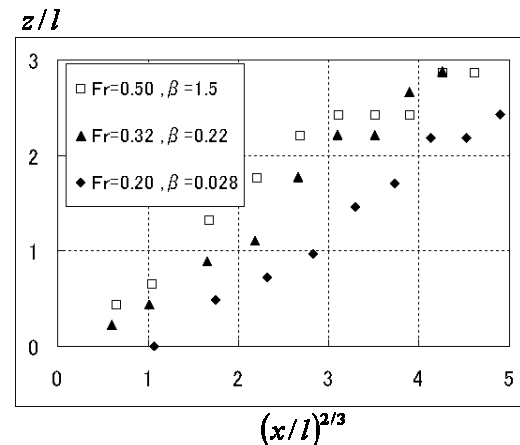


図 3 : 実験による湧出水の浮上経路

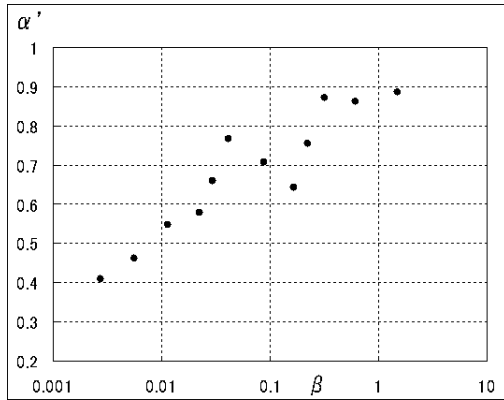


図4：流速比 β と経路の勾配 α' の関係

4 数値計算

4.1 モデル

本研究で扱う三次元非定常非圧縮流れを再現するために MEC-Nest. を使用した。このモデルはデカルト座標系での Boussinesq 近似を用いた三次元 Navier-Stokes 方程式と連続の式、熱及び塩分の輸送方程式、状態方程式の7つの方程式を解いている。なお乱流モデルには k- ϵ モデルを使用した。

4.2 計算条件

実験水槽を模擬した地形で計算を行った。計算領域は長さ2m×幅0.4m×高さ0.3mで、格子の大きさ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で拡大した。幅方向には1cm一定で、鉛直方向には底4格子を1cmとし公比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 ϵ を与えた。なお壁面及び自由水面はフリースリップで、熱・塩分・ k ・ ϵ の出入りはなく、水温・塩分の開境界には勾配ゼロを施している。海底面に接する120格子(100cm²)から温水を湧き出させた。

4.3 実験結果との比較計算

計算コードの妥当性を検証するために

実験と同じ状況を再現する計算を行った。比較対照となる実験は直径11.3cmの湧出断面で $Fr=0.20$, $\beta=0.028$ の実験とした。図は鉛直断面の水温(°C)分布で計算結果は浮上経路に関して実験結果を良好に再現しており、計算コードの妥当性が確認できた。

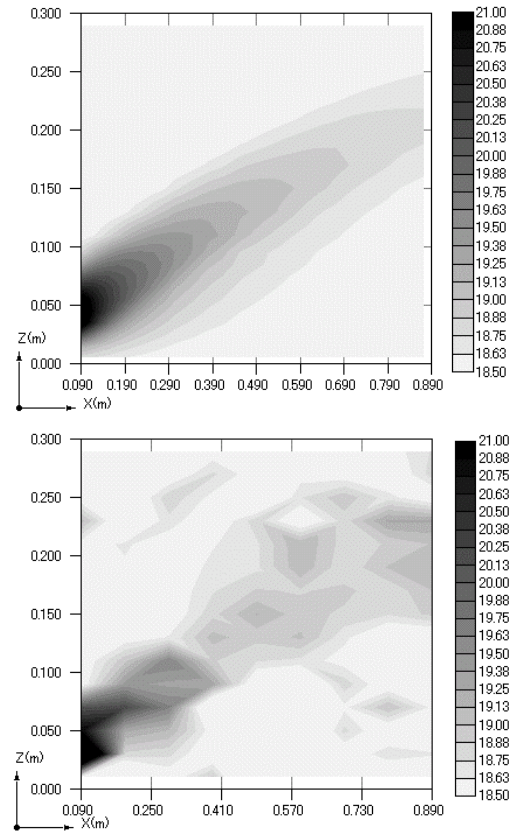


図5：計算結果(上)と実験結果(下)の比較

4.4 場の乱れの影響

表1：場の乱れの影響を見る計算の条件

No	β	k_{in}	ν_t
1	0.028	9.0×10^{-7}	2.8×10^{-4}
2	0.028	9.0×10^{-6}	9.0×10^{-4}
3	0.28	9.0×10^{-7}	2.8×10^{-4}
4	0.28	9.0×10^{-6}	9.0×10^{-4}

水理実験において勾配 α' が β 依存していたのは乱れの影響と考えた。このことを確かめるための計算を行った。計算条件は表の4ケース、 $Fr=0.20$ 共通で、その他の条件は4.3と同様である。ただし表中の k_{in} ,

v_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 α' 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同じだけ増えたときの α' の減少分は, β が小さいほうが感度が高いということを示している。すなわち β が小さいと周囲の乱れを敏感に感じ, 浮力が弱まるということであり, 実験によって α' が変わる原因であると考えられる。

4.5 黒部川扇状地沖の海底地下水の湧出後の挙動

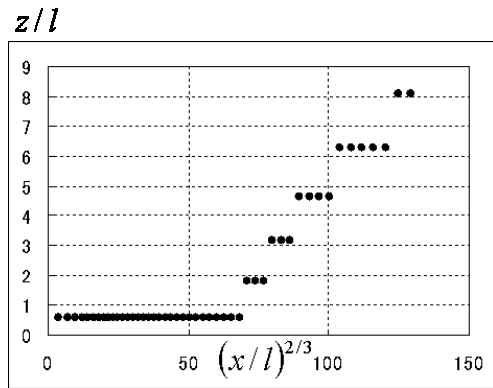


図6：黒部川扇状地での条件における浮上経路

水理実験では行えなかった β が非常に小さい黒部川扇状地沖の海底地下水の湧出後の挙動を再現する数値計算を行った。この計算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ノースリップ条件を与え, それに伴い乱流モデルを低レイノルズ型の $k-\epsilon$ モデルにした。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 36 格子とした。図は計算結果で最も温度が高いグリッドをブルームの中心としてプロットしたグラフで原点は湧出の中心点である。経路は湧出直後, 底面にへばりついたように見え, その後非常に小さい α' で上昇している。このような経路となる理由は湧出後に浮力により加速する前に下流に流されてしまっているためと考えることができる。

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, 地下水経由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。

4.6 湧出水の挙動

以上より湧出水の挙動は β の値により大まかには図のような3つのパターンに分類することができる。 β が十分大きいときその経路は既往の研究どおりとなる。 β が小さくなると α' は β の関数となり β が小さいほど見かけ上 α' も小さくなる。さらに β が小さくなると, 底面にへばりつくような経路となり物質供給の面から見るとほとんど浮上の効果はないといえる。

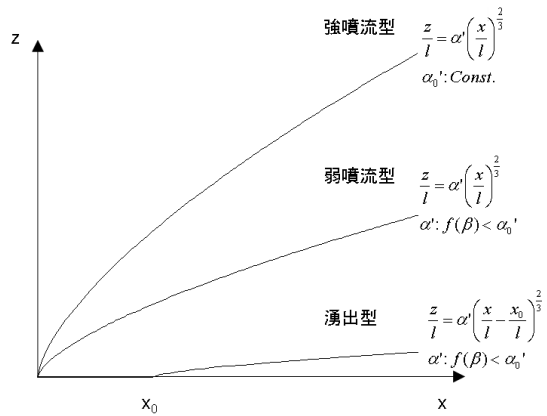


図7：湧出後の浮上経路のパターン

5. おわりに

本研究では海底地下水の湧出後の挙動を調べるため現地観測・水理実験・数値計算を行い以下の知見を得た。

- ・本研究で用いた数値モデルは水理実験の浮上経路をよく再現した。
- ・水平流速に対して湧出量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が小さくなる。
- ・湧出量が微小となるとほとんど底面に沿って拡散し, このことから黒部川扇状地沖では付近の藻場に栄養塩が供給されている可能性がある。