

# MEC モデルによる貯留物漏出シナリオ推定技術の実用化検討

課題責任者

佐藤 徹 東京大学

著者

佐藤 徹<sup>\*1</sup>, 大山 裕之<sup>\*1</sup>, Fytianos, Georgios<sup>\*1</sup>, 後藤 浩一<sup>\*2</sup>, 古市 幹人<sup>\*3</sup>,  
西村 俊介<sup>\*1</sup>

\*1 東京大学, \*2 環境テクノス株式会社, \*3 海洋研究開発機構 数理科学・先端技術研究分野

CCSは温暖化対策技術の一つとして期待されている一方、海底下でCO<sub>2</sub>が漏洩した場合の環境影響も懸念される。このため、生起確率はほとんどないとされるCO<sub>2</sub>漏洩に備え、海洋汚染防止法に従い、海底の複数個所において、定期的な海水観測が義務付けられている。万が一、海中への漏洩が発生した際に、漏洩位置と漏洩量をいち早く探知することは重要である。そこで、アジョイント法を用い、限られた数の検知器のデータから漏洩情報を推定する解析手法を開発した。2次元及び3次元海域において、開発した手法を数値的に検証した。本手法は、他の様々な海中物質のソース探知にも適用できる。

キーワード：CO<sub>2</sub>海域地中貯留, CO<sub>2</sub>漏洩, マルチスケール海洋モデル, 漏洩位置, 漏洩フラックス

## 1. 緒言

現在我が国では、海域でのCCSを実施する場合、生起確率はほとんどないとされるCO<sub>2</sub>漏洩に備え、海洋汚染防止法に従い、海底の複数個所において、定期的な海水観測が義務付けられている。もし仮にCO<sub>2</sub>が海底から漏洩し、海底に設置された複数のセンサーのうちのいくつかを感知した場合、いち早く漏洩位置や漏洩流量などの漏洩情報を特定することが必要となる。しかし、例えば、数km間隔で設置された複数のセンサーの情報だけでは、小型船舶にセンサーを曳航させる掃海や、AUV等を用いた海底探索など、多くの場合、漏洩位置や漏洩流量の特定するために多くの費用と時間を要することは想像に難くない。そこで本研究の目的を、複数の定点観測情報からCO<sub>2</sub>漏洩位置と漏洩流量を推定する数値手法を提案することとした。

Probability methodでは、ある状態の起こる確率、例えば、ある物質が特定の場所に位置した確率等を、確率目的関数を最大化、もしくは最小化することで評価する。Wagner [1]では見込み関数という目的関数を設定し、実際の観測結果を得る確率が最大となるような、漏洩情報に関するパラメータを決定している。しかし、漏洩位置や漏洩流量を推定するためには、事前に可能な漏洩位置や漏洩期間の範囲がわかっている必要がある。他のprobability methodsに関しても、多くの手法において、漏洩位置や時間などを推定するためには、漏洩に関してある程度の情報を必要とする。

唯一の例外が、Neupauer and Wilson [2]やNeupauer and Wilson [3]で見られるadjoint probability method（以下、アジョイント法）である。アジョイント法では、独自の位置確率や時間確率の概念を導入し、事前の漏洩に関する情報無しで漏洩位置を推定することができる。この手法

では一度数値計算を行うだけでよいので、計算機の負荷も問題にならない。アジョイント法の中でも、Dimov et al. [4]は、観測濃度と漏洩濃度に対するmarginal sensitivityを用いて漏洩位置や漏洩時間を推定している。この手法をMarginal Sensitivity Method (MSM)と呼ぶ。

以上より、本研究ではアジョイント法、特にMSMをとりあげ、事前に物質の海水中への漏洩に関する情報（漏洩位置や漏洩期間、漏洩流量のいずれか）を必要とすることなく、ある特定海域において、漏洩位置と漏洩流量を推定する手法を開発することを目的とする。

## 2. 数値解析法

漏洩情報推定シミュレーションにはMarginal Sensitivity Method [4]を用いる。この手法では移流拡散方程式のアジョイント方程式

$$\frac{\partial \psi^*}{\partial \tau} - \frac{\partial V_j \psi^*}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v_c \frac{\partial \psi^*}{\partial x_j} \right] + (-q_o \cdot \psi^*) + \frac{\partial h}{\partial C} \quad (1)$$

を逆時間方向に解き、その解を利用して漏洩位置と漏洩濃度を推定することができる。しかしながらDimov et al. [4]では時間が既知の状態かつ一次元の定常流における放出問題しか解かれていない。

この手法を参考に、潮汐のような複雑な流れ場の中で漏洩情報が全て未知の状態から、それらの情報を得ることを目指した。

本研究では、放出濃度に対する観測濃度の比を(1)式で表わされるアジョイント方程式の解であるmarginal sensitivityとした。複数の観測濃度に対してアジョイント方程式が解かれ、これにより、放出点の濃度が推定される。放出点においては各観測データに基づき計算された推定濃度は等しくなる。これにより漏洩位置を推定する

が、数値計算では複数の推定濃度が同じ値にはなりえない。従って推定濃度の差をとり（関数  $DIF(x, \tau)$  とする）、これが最小値となる位置・時間を放出位置・放出時間、そしてこのとき計算される推定濃度を放出濃度と推定することとした。

### 3 結果と考察

#### 3.1 二次元テスト

##### 3.1.1 瞬間放出

図1で示される  $i \times j = 60 \times 40$  の二次元の領域において、赤い点を  $CO_2$  放出点、青い点を検知器位置として設定した。また、流速は潮汐を模した非定常均質流場とした。 $CO_2$  は  $t=0$  に  $1.0 \times 10^4 \text{ kg/sec/m}^2$  で瞬間的に放出される。まずは順方向に  $CO_2$  数値拡散シミュレーションを行い、得られた濃度情報により漏洩情報推定シミュレーションを行った。

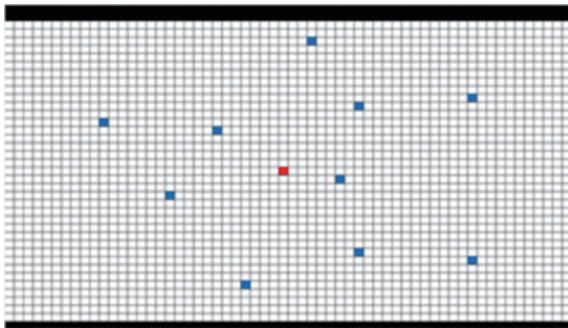


図1 2D Computational domain for validation

図2で示されるのは  $DIF(x, \tau)$  の各時間の全領域における最小値 ( $\min DIF(\tau)$  とする) をプロットしたものである。ここで  $\min DIF(\tau)$  は  $\tau=2163 \text{ step}$  で最少となっている。これは実際の放出時間  $\tau=2160 \text{ step}$  に非常に近い値である。

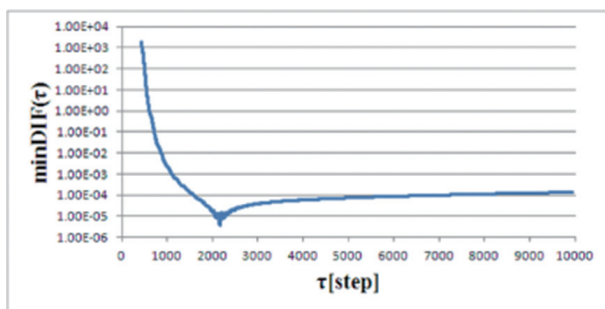


図2 Temporal change of  $\min DIF(\tau)$  in the case of instantaneous seepage.

図3は各時刻に関する  $DIF(\tau)$  のコンター図である。 $DIF$  の最小値を与える点が漏出推定位置となる。この最小値をとる座標は  $(30, 20)$  で、これは放出点と同一である。また、 $\tau=2160 \text{ step}$  に位置  $(30, 20)$  でそれぞれの検知器におけるデータから推定される濃度の平均値は  $1.01 \times 10^{-4} \text{ kg/sec/m}^2$  であり、実際の設定値である  $1.00 \times 10^{-4} \text{ kg/sec/m}^2$  と非常に近い値となっている。

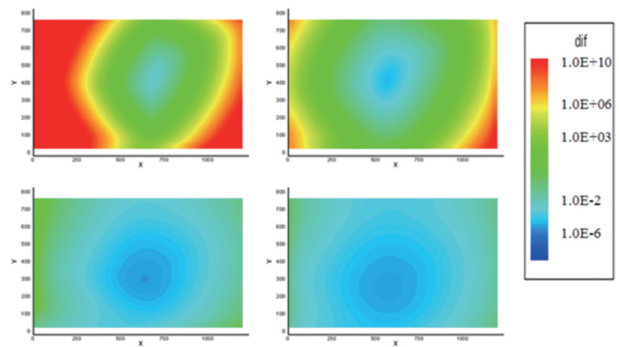


図3 Distribution of  $DIF(x, \tau)$  at  $\tau = 1000 \text{ step}$  (upper-left),  $2160 \text{ step}$  (upper-right),  $3000 \text{ step}$  (lower-left),  $4000 \text{ step}$  (lower-right) in the case of instantaneous seepage.

##### 3.1.2 連続放出

同様の手法で連続放出に関しても二次元の試行問題を計算した。

図4は  $DIF(x, \tau)$  の各時間の全領域における最小値 ( $\min DIF(\tau)$  とする) をプロットしたものである。ただし、連続放出の場合、放出時刻の推定は意味がない。連続に放出されている間のどの時刻の濃度をもっともよく感知したかというだけであって、しかも検出器によってその時刻も異なるはずである。ここで  $\min DIF(\tau)$  は  $\tau=2222 \text{ step}$  で最少となっている。図5は各時刻に関する  $DIF(\tau)$  のコンター図である。このとき  $DIF$  の最小値をとる座標は  $(30, 20)$  であり、これは放出点と同一である。

また、 $\tau=2222 \text{ step}$ 、位置  $(30, 20)$  においてそれぞれの検知器における観測データから推測される放出フラックスの平均値は  $5.16 \times 10^6 \text{ kg/sec/m}^2$  であり、これは約  $5.0 \times 10^6 \text{ kg/sec/m}^2$  である実際の放出フラックスと非常に近い値である。

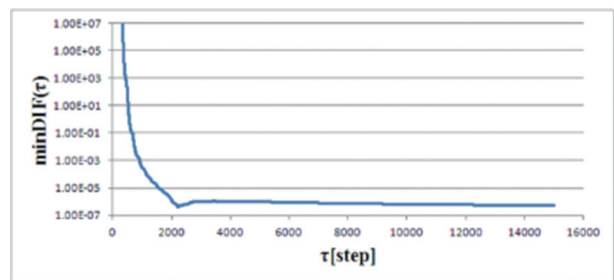


図4 Temporal change of  $\min DIF(\tau)$  in the case of continuous seepage.

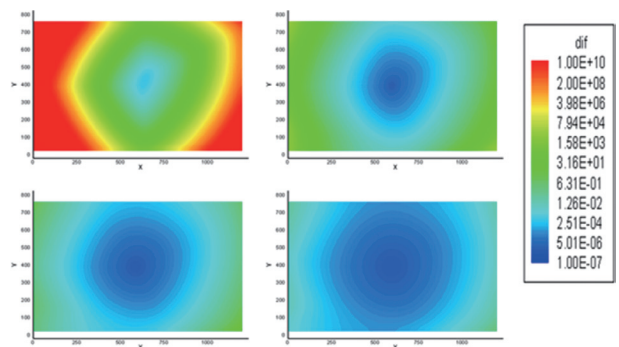


図5 Distribution of  $DIF(x, \tau)$  at  $\tau = 1000 \text{ step}$  (upper-left),  $2222 \text{ step}$  (upper-right),  $3000 \text{ step}$  (lower-left),  $4000 \text{ step}$  (lower-right) in the case of continuous seepage.

連続放出においても、放出位置、放出フラックスについては近い値を推定することができた。

### 3.2 三次元テスト

Ardmucknish 湾の物理場に関して、本研究で開発された手法により漏洩情報推定シミュレーションを行った。

図 6 に Ardmucknish 湾とその東に位置するフィヨルドの図 (左) と湾内を格子分割した図 (右) を示す ([5])。CO<sub>2</sub> 数値拡散シミュレーションに関してはフィヨルドを含む湾全体、漏洩情報推定シミュレーションでは湾奥部分のみを計算領域 (図 7) とし、この領域に関してのみ速度保存を行った。CO<sub>2</sub> 放出位置を図 7 に赤点で示す。図 8 にその放出店の回りに配置した 5 つの検知器位置を示す。

minDIF は  $\tau = 1777$  step のとき最小となり、図 9 に示すように、最小値をとる位置は (48, 36, 6) である。これは実際の放出点 (48, 33, 7) に近い位置である。また実際の放出

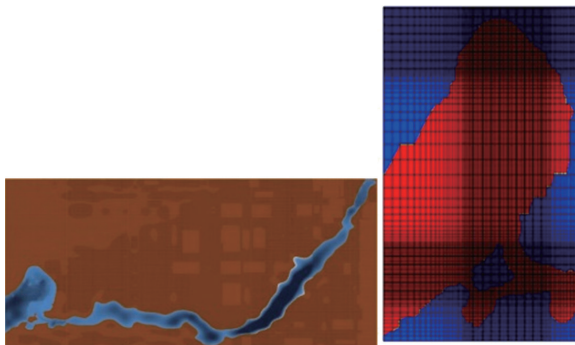


図 6 Computational domain of Ardmucknish Bay with a long fjord on its right hand side (left) and the grid system in the Ardmucknish Bay (right), where the minimum grid size is 20m × 20m.

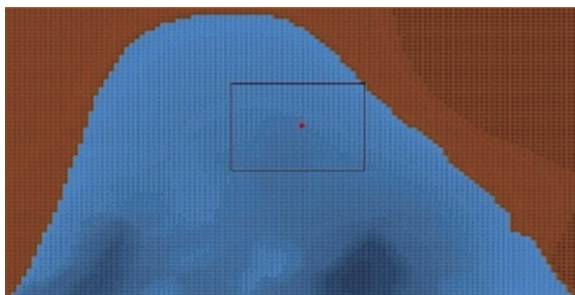


図 7 Computational domain of the backward calculation.

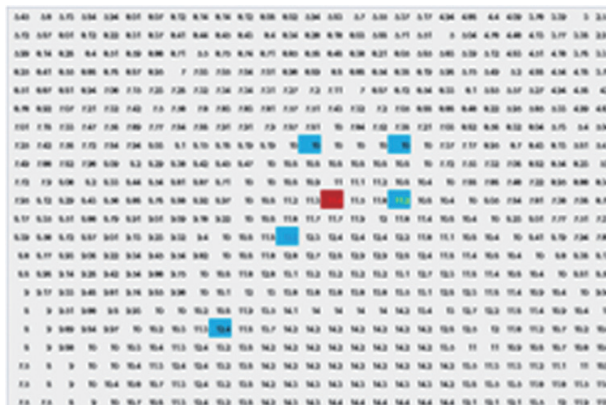


図 8 Locations of a source in red and 5 detection points in blue in the head of Ardmucknish Bay.

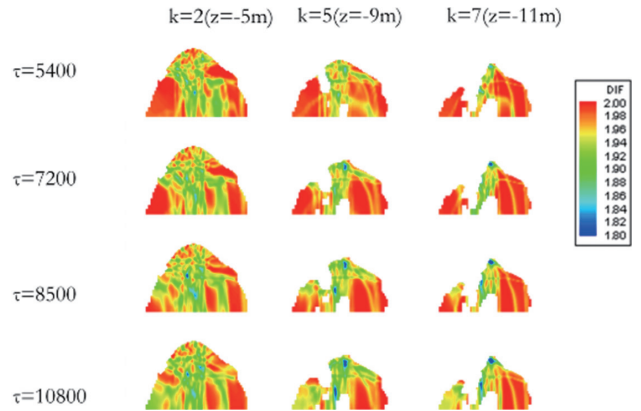


図 9 Distribution of DIF(x,  $\tau$ ) at  $\tau = 1777$  step in the case of continuous seepage in Ardmucknish Bay.

フラックスが約  $5.00 \times 10^{-5}$  kg/sec/m<sup>2</sup> であったのに対し、それぞれの検知器での観測データから推測される放出フラックスの値は  $4.96 \times 10^{-5}$  kg/sec/m<sup>2</sup> であった。

### 4. 結論

本研究で開発した漏洩情報推定シミュレーションでは、手法を二次元で検証した後、Ardmucknish 湾での三次元検証を行った。それぞれ放出位置や放出時間、放出濃度や放出フラックスに関して、実際の設定値に近い値を推定することが出来た。

### 文献

- [1] Wagner BJ, "Simultaneously parameter estimation and contaminant source characterization for coupled groundwater flow and transport model". J. Hydro. Vol. 135, pp. 275–303 (1992).
- [2] Neupauer RM, Wilson JL, "Adjoint method for obtaining backward in time location and travel time probabilities of groundwater contaminant". Water Resour. Res. Vol. 35, pp. 3389–3398 (1999).
- [3] Neupauer RM, Wilson JL, "Adjoint-derived location and travel time probabilities for a multidimensional groundwater system". Water Resour. Res. Vol. 37, pp. 1657–1668 (2001).
- [4] Dimov I, Jaekal U, Vereesken H, "A numerical approach for determination of sources in transport equations". Comput. Math. Appl. 32, pp. 31–42 (1996).
- [5] Mori C, Sato T, Kano Y, Oyama H, Aleynik D, Tsumune D, Maeda Y, "Numerical study of the fate of CO<sub>2</sub> purposefully injected into the sediment and seeping from seafloor in Ardmucknish Bay". Int. J. Greenhouse Gas Control 38, pp. 153–161 (2015).

# Application of a Method to Estimate Seepage Scenario for Stored Material Using the MEC Model

Project Representative

Toru Sato

University of Tokyo

Authors

Toru Sato<sup>\*1</sup>, Hiroyuki Oyama<sup>\*1</sup>, Georgios Fytianos<sup>\*1</sup>, Koichi Goto<sup>\*2</sup>, Mikito Furuichi<sup>\*3</sup> and Shunsuke Nishimura<sup>\*1</sup>

\*1 University of Tokyo, \*2 Environmental Technology Service Co., Ltd., \*3 Department of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Carbon capture and storage technology is a promising means to mitigate global warming. Those who inject and store CO<sub>2</sub> in sub-seabed geological formations may be legally required to monitor CO<sub>2</sub> leakage, even when the likelihood of such an event is very low. In the case that the leaked CO<sub>2</sub> is monitored by limited numbers of CO<sub>2</sub> sensors set on the sea bottom, it is required to elucidate the leakage location and rate immediately, in order to evaluate its impacts on the marine ecosystems and to minimize the impacts. In this study, we developed a numerical method to predict the location and rate of a contaminant seeping from the seafloor, using the adjoint marginal sensitivity method, based on the data monitored by limited numbers of sensors. A time-reversed numerical test was successfully conducted, using information obtained by the time-forward simulation of tidal current and contaminant dispersion.

**Keywords:** Sub-seabed CO<sub>2</sub> storage, CO<sub>2</sub> leakage, Multi-scale tidal current model, Seepage location, Seepage flux

## 1. Introduction

Carbon capture and storage (CCS) technology is one of the promising means to mitigate global warming. However, sub-seabed CO<sub>2</sub> geological storage has a risk of CO<sub>2</sub> leakage due to the accidental failure of riser pipes or large diastrophism like a big earthquake and it may cause impacts on marine organism near CO<sub>2</sub> seepage sites. The objectives of this study are to develop a numerical method to predict the location and rate of contaminant leakage in sea sites and applied this method to CO<sub>2</sub> seepage purposefully leaked in a bay. Here, we adopted the adjoint marginal sensitivity method (AMSM) and newly applied the method to oceanic fields.

## 2. Material and Methods

An adjoint equation of marginal sensitivity is given as

$$\frac{\partial \psi^*}{\partial \tau} - \frac{\partial V_j \psi^*}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v_c \frac{\partial \psi^*}{\partial x_j} \right] + (-q_o \cdot \psi^*) + \frac{\partial h}{\partial C} \quad (1)$$

where  $\psi^*$  is the marginal sensitivity at the n-th monitoring point,  $C$  is the estimated source concentration, and  $h(\alpha, C)$  is a function representing the state of a system.

## 3. Results and Discussion

On the tidal current field of Ardmucknish Bay, seepage estimation simulation was performed by the method developed in this research.

Figure 1 shows the Ardmucknish bay and a fjords attached to its east (left) and the computational grids (right) ([1]) for the

numerical simulation of CO<sub>2</sub> diffusion. Time-backward AMSM simulation was conducted in the calculation area shown by Fig. 2. The CO<sub>2</sub> seepage position is shown in Fig. 2 as a red dot. Figure 3 shows the five sensor positions arranged around the seepage source.

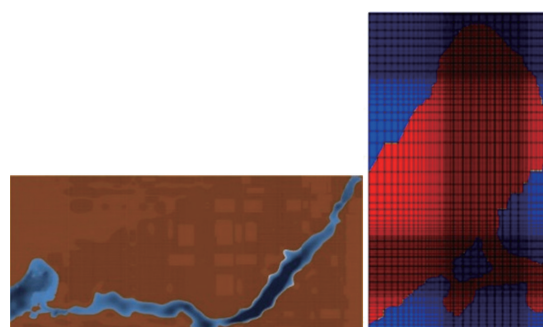


Fig. 1 Computational domain of Ardmucknish Bay with a long fjord on its right hand side (left) and the grid system in the Ardmucknish Bay (right), where the minimum grid size is 20m×20m.

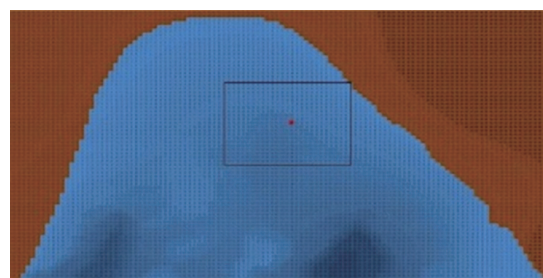


Fig. 2 Computational domain of the backward calculation.

The minDIF is minimum when  $\tau = 1777$  steps, and the position where the minimum value is taken is (48, 36, 6) as shown in Fig. 3. This is a position close to the actual emission point (48, 33, 7). While the actual seepage flux was  $5.00 \times 10^{-5}$  kg/sec/m<sup>2</sup>, the seepage flux estimated using this method was  $4.96 \times 10^{-5}$  kg/sec/m<sup>2</sup>.

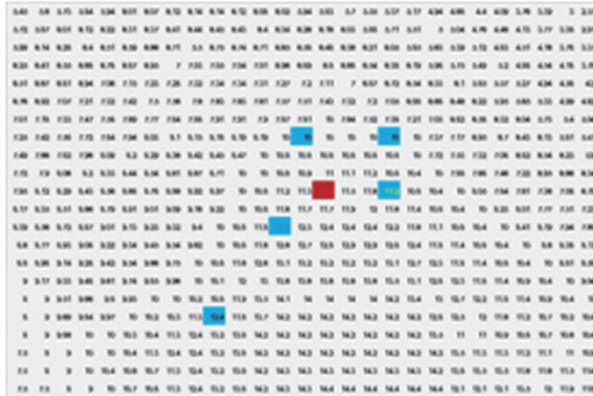


Fig. 3 Locations of a source in red and 5 detection points in blue in the head of Ardmucknish Bay.

#### 4. Conclusions

We developed a numerical method to predict the location and rate of CO<sub>2</sub> seepage using the information detected by the limited numbers of CO<sub>2</sub> sensors set on the seafloor. A numerical time-backward test was successfully conducted in 2D test cases.

#### References

- [1] Mori C, Sato T, Kano Y, Oyama H, Aleynik D, Tsumune D, Maeda Y, "Numerical study of the fate of CO<sub>2</sub> purposefully injected into the sediment and seeping from seafloor in Ardmucknish Bay". *Int. J. Greenhouse Gas Control* 38, pp. 153–161 (2015).

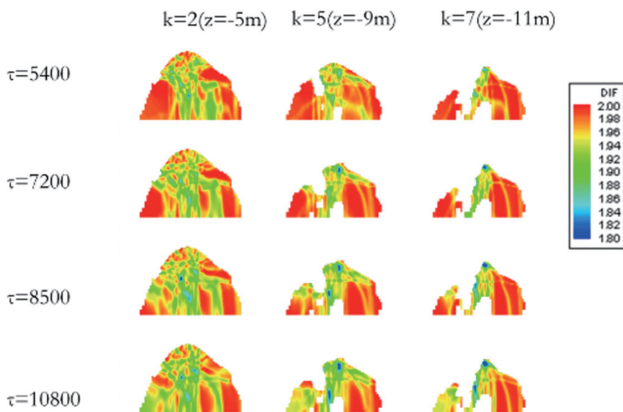


Fig. 4 Distribution of DIF(x,  $\tau$ ) at  $\tau = 1777$  step in the case of continuous seepage in Ardmucknish Bay.

