

平成 26 年 3 月修士論文要旨

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻)

定点観測データを用いた汚染物質漏洩情報推定のための数値解析法開発 —CCSにおける漏洩CO₂を対象として—

Development of the Methods of Numerical Analysis for Identifying Source Characteristics

学籍番号 47-126684 森 千晶

指導教員 佐藤 徹教授

(平成 26 年 1 月 27 日)

Keywords ; CO₂ 海域地中貯留, CO₂ 漏出, マルチスケール海洋モデル, 漏洩位置

Keywords; subsea geological storage of CO₂, leakage of CO₂, multi-scale ocean model, source location

1. 序論

地球温暖化を抑制するため、大気中への CO₂ の排出を削減することが世界的に求められており、CO₂ の回収・貯留 (Carbon dioxide Capture and Storage: CCS) は一つ的手段として技術の発展が望まれている。しかしながら CCS 技術の一つである海底下地中貯留においては設備の亀裂や貯留層から CO₂ が漏洩した際の生態系への悪影響が懸念されている。したがって、漏洩が起きた際に漏洩箇所を素早く発見することは重要である。また、漏洩時間や漏洩量も重要な情報である。本研究では二酸化炭素濃度を観測する検知器のデータから漏洩位置や漏洩時間、漏洩量を推定する手法を開発する。その手法を開発・検証するために、QICS プロジェクトに基づき研究を行う。QICS プロジェクトは 2012 年に行われた、故意に CO₂ を海底堆積物中から放出する実証実験プロジェクトである。ここで得られた実測値に従い物理場を再現し、開発した手法を検証する。

2. CO₂ 数値拡散シミュレーション

2.1 数値計算法

本研究では MEC(Marine Environmental Committee)モデル [1]を用いた。MEC モデルでは静水圧近似で計算を行う広領域の中に、Full-3D 計算を行う狭領域を組み込んだマル

チスケール計算を行う。また、狭領域においては分

散相(CO₂)と連続層(海水)の二つの層から成る流れを扱う。

Kano et al.[2]の二流相モデルにより、CO₂ の気泡と液滴の挙動をシミュレーションした。

2.2 計算領域

観測された海域の水深データ(Aleynik, 2011 [3])と陸域の地形データを元に Fig. 1 で示される地形を Fig. 2 のように作成した。狭領域では実証実験での気泡の観測に基づき CO₂ の放出点を決定した。

2.3 CO₂ 放出量

実証実験における観測によると、気泡は潮位が低いほど多く海底面から放出されることがわかった。また、気泡の放出量は全注入量の 8%程度であることがわかっている。一方で海水に溶解した状態で海底面から放出される溶解 CO₂ や海底面に残留する CO₂ に関する情報は得られていない。従って、溶解 CO₂ の挙動や、溶解 CO₂ と残留 CO₂ の量について場合分けし、実証実験中に得られた ΔpCO_2 値と比較することで注入された CO₂ の挙動を理解することを目指した。

そこで、溶解 CO₂ に関して海底面からの放出の仕方に関して二つの場合分けをした。Case1 は溶解



Fig. 1 CO₂ 数値拡散シミュレーション計算領域

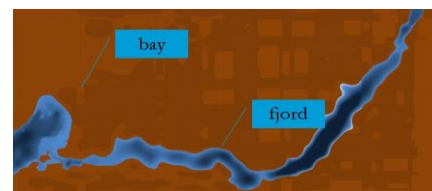


Fig. 2 作成した地形

CO₂も気泡 CO₂ と放出の仕方に潮汐の影響が出るという条件のもと計算され、Case2 では溶解 CO₂ は潮汐に無関係に一定濃度で放出するというものである。

2.4 計算結果

放出開始後 36 日目の CO₂ 放出点付近での Δ pCO₂ の観測結果は、600~800atm の範囲であった。

CO₂ 放出点底面における Δ pCO₂ の計算結果は、case1 は Fig3、case2 は Fig4 に示す通りである。図は左上が満潮時、そこから上げ潮となり、右下が干潮時の結果である。

Case2 では干潮時に濃度が薄くなってしまっている。これは干潮時にフィヨルドからの強い流れによって CO₂ が拡散するからである。

一方で Case1 では干潮時に潮汐の影響を受けて濃度が大きくなるように仮定している。よって干潮時の拡散は見られない。従って 600~800[atm] で一定に分布する観測値により近いのは Case1 であると考えられる。この時、溶解 CO₂ は全注入量の 67%、海底面下に残留した量は 25% である。よって実際にこのような量で放出が行われたと考えられる。

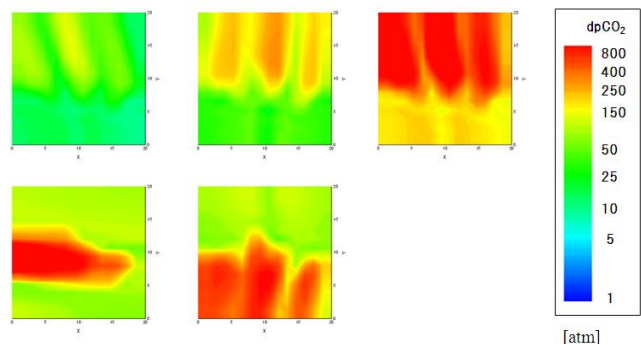


Fig3 Δ pCO₂ (Case1)

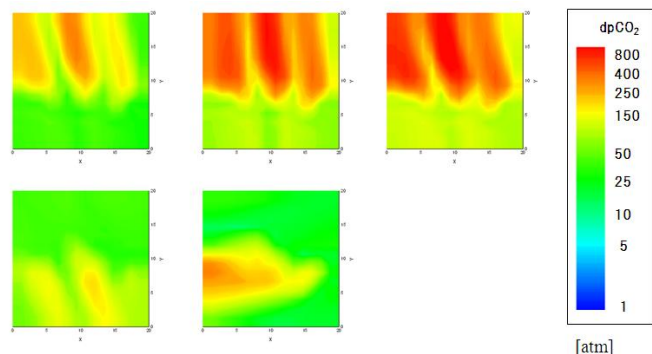


Fig4 Δ pCO₂ (Case2)

3. 漏洩情報推定シミュレーション

3.1 数値計算法

漏洩情報推定シミュレーションには Marginal Sensitivity Method(Dimov,1999[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(1)

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

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,1999[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, τ)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。これを式(1)に基づき逆時間に計算した。自ら設定した RDF 値が最大である位置を漏洩位置と推定する。

3.3 試行計算

3.3.1 瞬間放出 (二次元)

今 Fig 5 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、流速は全セル $\cos(t)$ 又は $\sin(t)$ で与えられる潮汐を模した流れ場とした。 CO_2 は $t=0$ に $1.0 \times 10^{-4} [\text{kg}/\text{m}^2]$ 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

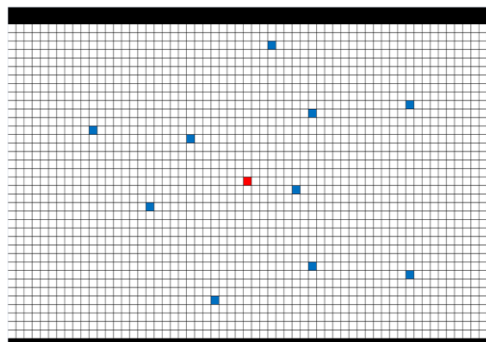


Fig 5 計算領域

を行った。Fig 6 で示されるのは $\text{DIF}(x, \tau)$ の各時間の全領域における最小値 ($\text{minDIF}(\tau)$) とする) をプロットしたものである。

ここで $\text{minDIF}(\tau)$ 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。更に、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 $1.01\text{E-}4[\text{kg}/\text{m}^2/\text{sec}]$ であり、実際の設定値である $1.00\text{E-}4[\text{kg}/\text{m}^2/\text{sec}]$ と非常に近い値となっている。

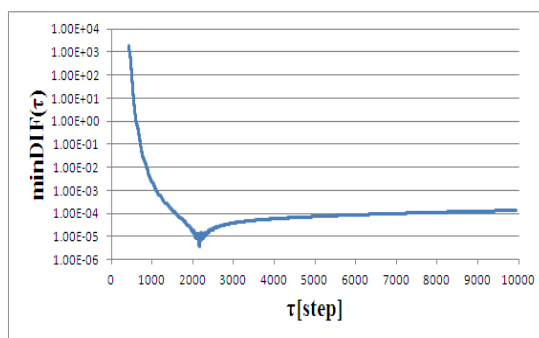


Fig6 minDIF(τ)(瞬間放出)

3.3.2 連続放出 (二次元)

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。

ここで $\text{minDIF}(\tau)$ は $\tau = 2222[\text{step}]$ で最少となっている。このとき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の平均値は $5.16\text{E-}6[\text{kg}/\text{sec}]$ であり、これは約 $5.0[\text{kg}/\text{sec}]$ である実際の放出フラックスと非常に近い値である。

連続放出においては放出開始時間の推定には至らなかったが、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。

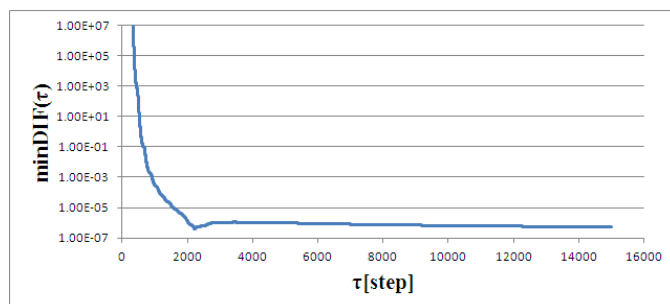


Fig7 minDIF(τ)(連続放出)

3.3.3 連続放出(三次元)

2章で再現された Ardmuchnish 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。

CO_2 数値拡散シミュレーションに関しては2章と同様の計算領域を、漏洩情報推定シミュレーションでは湾奥部分

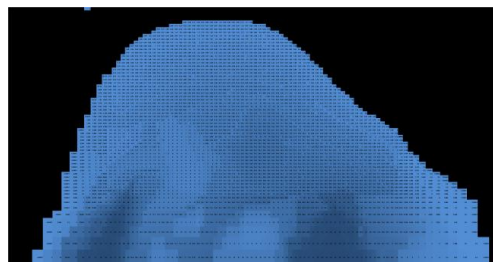


Fig8 連続放出 (三次元) 計算領域

のみを計算領域 (Fig8) とし、この領域に関してのみ速度保存を行った。CO₂ 放出位置は2章と同様の設定であり、Fig9 は放出位置 (赤) と5つの検知器位置 (青) を示している。

Fig10 は得られた各タイムステップでの minDIF の値を示している。minDIF は $\tau=1777$ [step] のとき最小となり、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。また実際の放出フラックスが約 5.00E-5 [kg/sec] 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 4.96E-5[kg/sec]であった。

5.43	5.8	5.75	5.84	5.94	6.05	6.07	6.12	6.14	6.16	6.12	6.08	6.02	5.94	5.85	5.7	5.55	5.57	5.17	4.94	4.98	4.4	4.09	3.78	3.59	3	2.67
5.72	5.67	6.01	6.12	6.22	6.31	6.37	6.41	6.44	6.45	6.43	6.4	6.34	6.26	6.18	6.05	5.91	5.71	5.51	5	5.04	4.79	4.49	4.13	3.77	3.38	2.97
5.99	6.14	6.29	6.4	6.51	6.59	6.66	6.71	6.7	6.74	6.71	6.65	6.56	6.45	6.34	6.21	6.05	5.83	5.63	5.39	5.12	4.83	4.51	4.19	3.79	3.37	
6.23	6.41	6.55	6.69	6.76	6.87	6.95	7	7.02	7.05	7.04	7.01	6.99	6.9	6.8	6.64	6.39	6.19	5.96	5.72	5.49	5.2	4.86	4.54	4.19	3.75	
6.51	6.67	6.81	6.94	7.09	7.19	7.23	7.25	7.32	7.34	7.31	7.27	7.2	7.11	6.97	6.73	6.34	6.03	5.7	5.35	5.07	4.74	4.34	4.06	3.72	3.3	
6.78	6.92	7.07	7.21	7.32	7.42	7.5	7.58	7.6	7.61	7.61	7.57	7.51	7.42	7.32	7.19	6.86	6.46	6.09	5.75	5.45	5.09	4.7	4.3	4.0	3.62	
7.01	7.16	7.33	7.47	7.58	7.69	7.77	7.84	7.89	7.91	7.9	7.87	7.81	7.7	7.58	7.39	7.01	6.52	6.08	5.72	5.44	5.05	4.64	4.24	3.84	3.46	
7.23	7.42	7.59	7.72	7.84	7.94	8.05	8.1	8.16	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	8.19	
7.49	7.69	7.82	7.99	8.09	8.2	8.29	8.36	8.42	8.45	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	8.47	
7.72	7.9	8.08	8.2	8.33	8.44	8.54	8.61	8.67	8.71	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	
7.95	8.12	8.29	8.43	8.56	8.68	8.79	8.89	8.92	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	8.97	
8.17	8.32	8.51	8.66	8.79	8.91	9.01	9.09	9.16	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	9.22	
8.39	8.56	8.72	8.87	9.01	9.15	9.25	9.32	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	
8.6	8.77	8.93	9.08	9.22	9.34	9.43	9.54	9.62	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	9.68	
8.8	8.96	9.14	9.3	9.42	9.54	9.69	9.77	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	
9	9.17	9.33	9.49	9.65	9.81	9.94	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	9.99	
9	9.21	9.49	9.6	9.95	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	
9	9.99	9.94	9.97	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	
9	9.99	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	
7.5	8	9	10	10.4	11.3	12.4	13.2	13.8	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	
7.5	8	9	10	10.4	10.8	10.7	11.3	12.4	13.2	13.8	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	
7.5	7.5	8	9	10	10.7	10.8	11.3	12.4	13.2	13.8	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	

Fig9 連続放出 (三次元) 計算における放出点と検知器位置

4. 結論

CO₂ 数値拡散シミュレーションでは、観測データを踏まえ様々な改良を加えることが出来た。またケーススタディにより観測ではわからなかった情報をえることができた。

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、Ardmurchish 湾での検証を行うことが出来た。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。

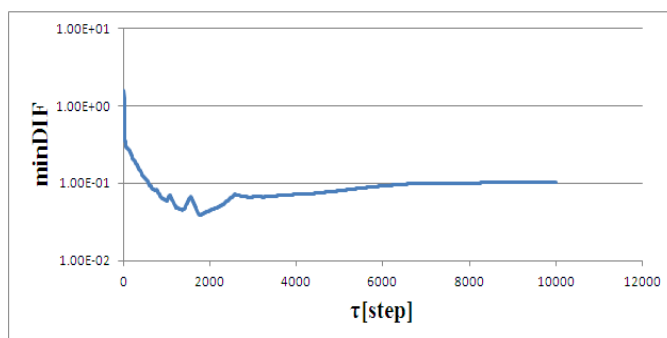


Fig10 minDIF(連続放出 (三次元))

5. 参考文献

[1] MEC Ocean Model : <http://mee.k.u-tokyo.ac.jp/mec/model/index.html>
 [2] Yuki Kano, Toru Sato, Jun Kita, et al., Int. J. Greenhouse Gas Control, Vol.3, pp. 617-625, 2009
 [3] Aleynik Dmitry. (2011) private communication
 [4] I.DIMOV, Computers Math. Applic. Vo.32, No.5, pp. 31-42,1996