

## 海底からの溶存 CO<sub>2</sub> 漏出情報の数値推定法の定式化と 適用法に関する研究

### Numerical study on Formulation and Application of Identification method of the dissolved CO<sub>2</sub> seepage from the Seafloor

学籍番号 47-156637 境澤 亮祐  
指導教員 佐藤 徹 教授

(平成 29 年 1 月 31 日発表予定)

Keywords: CCS, 漏出情報推定, 逆計算, Adjoint モデル

Keywords: CCS, Identification of seepage information, Inverse method, Adjoint model

#### 1. 序論

大気中の人為的二氧化碳素量の増加に対し、海底下 CCS 技術の実用化に向けた政策が、日本で進められている。それに伴い、万が一の圧入 CO<sub>2</sub> の海洋中への漏出リスクを考慮せねばならず、漏出事象発覚時の素早い対応に向けた、漏出位置、量といった漏出情報特定手法の開発は必要不可欠である。

物質の漏出情報特定手法としては、地下水汚染や、建造物内の空気汚染といった分野で研究が進められている。しかし、本研究の研究対象である CCS の漏出事象で想定される、①非定常、非一様な流れ場、②物質が連続的に漏出、③漏出開始時間が未知、という条件において、流れ場の情報と測定データから、漏出地点と漏出量の二つの情報の推定を同時に行ったものは、森[1]のみである。森[1]は物質の連続漏出に対する漏出情報の推定手法を Neupauer and Willson[2]と Dimov[3]の確率推定手法から開発し、ある程度の精度での推定に成功しているが、現時点で手法の普遍性が成立しておらず、実用化に向けた知見も不十分である。

以上を踏まえ、本研究の研究目的を以下に示す。

- 森[1]の推定手法を一般化し、観測データの連続的な利用手法の開発と比較検証を行う。
- Adjoint Marginal Sensitivity Method において起こりうる、推定誤差とその要因の調査、実用化の際に用いることのできる効果的な測定データの取り扱いに関する知見の蓄積。
- 苫小牧沖での CO<sub>2</sub> 漏出を想定した、実在海域モデルにおける本推定手法の評価。

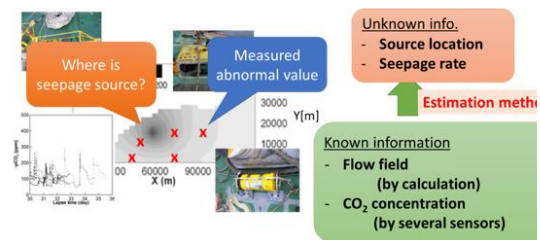


Fig. 1 Concept of Identification Method for CO<sub>2</sub> Seepage accident

#### 2. 手法

##### 2-1 Adjoint 方程式 (逆時間方向の確率の輸送方程式)

実際の海洋で CO<sub>2</sub> の漏出試験を行うことは、現実的に不可能である。そのため本研究では、時間方向の CO<sub>2</sub> 漏出拡散シミュレーションを行い、その結果を測定データとして漏出情報の推定を行う。CO<sub>2</sub> 漏出拡散シミュレーションには静水圧近似の MEC Ocean Model[4]を用いた。CO<sub>2</sub> の輸送方程式を式(1)に示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial V_j C}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v_c \frac{\partial C}{\partial x_j} \right] \quad (1)$$

漏出情報の推定には Adjoint Marginal Sensitivity Method を用いる。これは計算領域中の測定点から放出される確率  $\psi$  の移流拡散を逆時間方向に、流れ場を遡りながら解き、Marginal Sensitivity の観点から漏出量、漏出地点を推定する手法である。(2)式に時間方向の輸送方程式から導出される Adjoint 方程式を示す。

$$\frac{\partial \psi}{\partial \tau} - \frac{\partial V_j \psi}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ v_c \frac{\partial \psi}{\partial x_j} \right] + (-q_o \cdot \psi) + \frac{\partial h}{\partial C} \quad (2)$$

## 2-2 Marginal Sensitivity

Fig.2 にあるように、順方向で時刻  $t = t_1$  で  $\text{CO}_2$  の瞬間的な漏出が生じた場合（瞬時放出）を考える。この場合、センサーで  $t = t_{\text{obs}}$  の時刻に濃度  $C_1$  を測定したとする。この放出された  $\text{CO}_2$  は漏出点からある移動時間を経てセンサーに到達し、そこで濃度情報としては **Marginal Sensitivity** と呼ぶセンサーで感知される濃度と漏出濃度の比で定められる情報を得ることになる。

この Fig.2 の例では、移動時間は  $t_{\text{obs}} - t_1$  で

**Marginal Sensitivity** は  $C_1 / M_0$  である。同様に adjoint 方程式を用いる逆方向では、逆方向の時間  $\tau = \tau_{\text{leak}}$  に確率のフラックス  $\Gamma_0$  を放出し、 $\tau = \tau_1$  の時刻に漏出点を含む領域に  $\psi_1$  で拡散していく。この逆計算における確率の移動時間は  $\tau_1 - \tau_{\text{leak}}$  となり、その **Marginal Sensitivity** は  $\psi_1 / \Gamma_0$  である。移動時間が順計算と逆計算で一致した所で、**Marginal Sensitivity** は等しくなり、

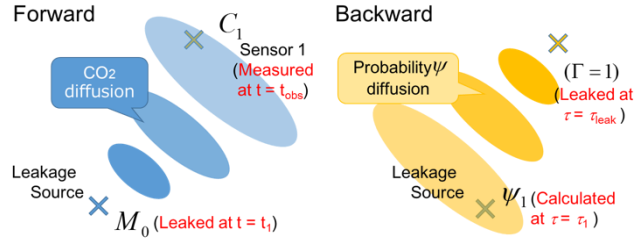


Fig.2 The Concept of Marginal Sensitivity

$$\frac{C_{\text{obs}}}{M_0 dt} = \frac{\psi_{\text{cal}}}{\Gamma_0 dt} \Leftrightarrow M_0 = \frac{C_{\text{obs}}}{\psi_{\text{cal}}} \Gamma_0 \quad (3)$$

という関係を得る。この移動時間から、 $\text{CO}_2$  の漏出の時間が推定でき、また上式からその流出濃度の推定も可能となるというのが、Adjoint Marginal Sensitivity Method の概念である。Fig.2 では概念的に一つの **Sensor** について考えたが、実際の推定では多点の観測点を用いることで、よりもっともらしい漏出点の座標や、漏出時間、漏出量を求めることが可能となる。

本研究の最終目的である  $\text{CO}_2$  の連続的な漏出は上記の瞬時的な放出の重ね合わせと考えることが出来る。このようにして、森は瞬時的な測定データによる、連続放出の **Marginal Sensitivity** の式(4)を考案した。

$$M_0 = \frac{\Gamma_0 C_{\text{obs}}}{1/dt \int_0^{t_{\text{obs}}} \psi(\tau) d\tau} \quad (4)$$

今回の研究でさらに、 $\text{CO}_2$  の測定を連続的に用いた場合の **Marginal Sensitivity** の式(5)を今回新たに導出した。

$$M_0 = \frac{\Gamma_0 \int_0^{t_4} C_{\text{obs}}(t_0 = t) dt}{\int_0^{t_4} \psi_{\text{obs}}(\tau_0 = \tau) d\tau} \quad (5)$$

ここで  $t_4$  は測定終了時間、 $t_f$  は未知の漏出開始時間である。複数のセンサー位置から推定を行う場合、各 **Sensor** から確率  $\psi$  を放出させ、逆時間ごとに、全ての計算格子における  $M_0(x, \tau)$  を得て、

$$F(x, \tau) = \frac{\sqrt{(M_{0i}(x, \tau) - M_{0j}(x, \tau))^2 / (M_{0i}(x, \tau) + M_{0j}(x, \tau))^2}}{n(n-1)/2} \quad (6)$$

で表現される評価関数  $F(x, \tau)$  から最尤推定の漏洩情報を推定した。この評価関数  $F$  が最小となる、 $x$  と  $\tau$  がもっともらしい推定情報となる。

### 3. 2次元テスト海域での検証

本研究では3次元実在海域での漏出情報推定を行う前に、2次元の仮想海域における漏出情報推定を行った。今回用いた流れ場として①非定常の領域一様流れ、②定常の Rankin 渦流れ、③定常の Rankin 流れの中心に障害物をおいた流れ場の3つである。

①の流れ場について得られた知見として、Threshold の導入による推定精度の向上、がある。Fig.3 のように 24 点の Sensor を計算領域に設置した。流れ場は一様で以下のように強制的に与えられる。

$$u = 0.5 \times \cos(2\pi / 44714.2) \quad (7)$$

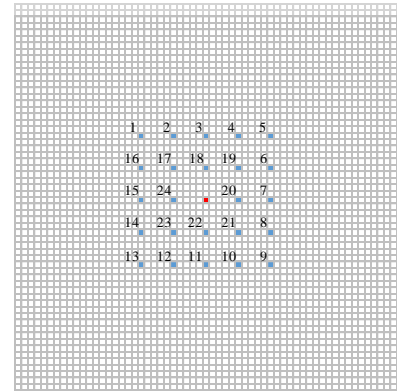
$$v = 0.5 \times \sin(\pi + 2\pi / 44714.2) \quad (8)$$

CO<sub>2</sub> の漏出は連続的に計算領域の中央(30,30)(Fig.3 の赤い点)から逆時間の  $\tau = 130,000\text{step}$  から連続的に放出される。このような流れ場で連続観測による漏出情報の推定を行った。

24 点の全ての Sensor で、十分な量の CO<sub>2</sub> 濃度を観測できず、推定精度が低下するという結果となった。そこで、それぞれの Sensor の最大測定濃度を相対的に比較し、測定濃度が低い Sensor 情報を棄却する Threshold を設けた。

Threshold 適用後、20 点の Sensor による推定結果を Fig.4 に示した。Fig.4 は各時間でそれぞれの Sensor から全ての計算格子に対して求められた  $M_0(x, \tau)$  を評価関数  $F$  で比較し、得られた各時間での最小  $F$  の値  $\text{minDIF}$  を時系列で表したものである。この  $\text{minDIF}$  が最小値を取る時間に、CO<sub>2</sub> の漏出が始まったと推定され、Fig.4 での最小値は  $\tau = 128,468\text{step}$  で得られ、実際の漏洩開始時間  $\tau = 130,000\text{step}$  と非常に近い値をとった。またこの時の推定漏出地点と量は、それぞれ(30,30)で漏出量  $0.982\text{kg/m}^3\text{s}$  と、実際の  $1.0\text{kg/m}^3\text{s}$  と比べ、理想的な漏出情報推定が行えたといえる。Threshold 適用前の推定漏洩量が  $63793.0\text{kg/m}^3\text{s}$  だったことから、Threshold の適用は非常に有意義なものである。

一方で②③のような、非定常流れ、障害物を置いた流れでは推定精度が低下するという現象が見られた。特に障害物の影響は大きく、Fig.5 のような条件下で、連続観測手法は漏出点の推定はうまく行えたものの、漏出量の推定精度は  $0.882\text{kg/m}^3\text{s}$  と推定誤差が大きくなったことがわかる。この理由として、漏出された CO<sub>2</sub> や  $\psi$  の拡散形状変形されたことが揚げられる。



Red dot: Leakage point, Blue dot: CO<sub>2</sub> sensors

Fig.3 Computational domain of ①

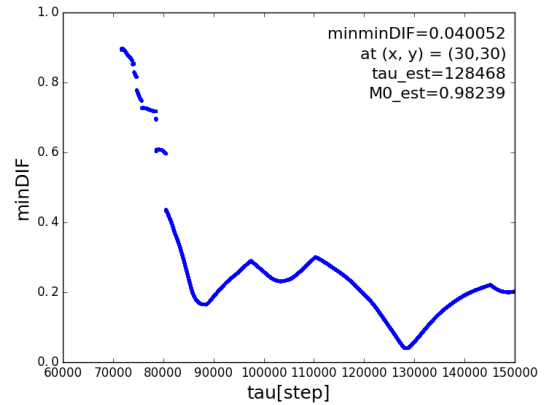


Fig.4 Time series of minDIF

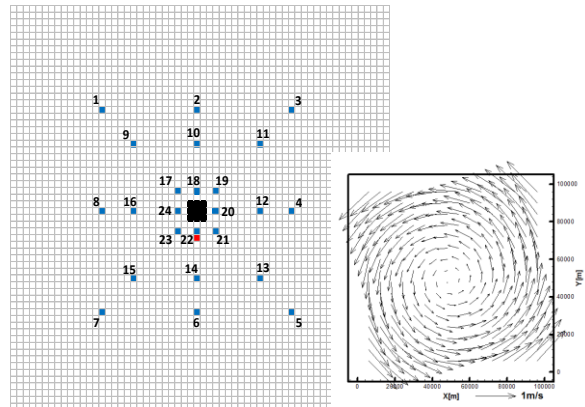


Fig.5 Computational domain and flow field of ③

#### 4. 3次元実在海域、苫小牧沖での漏出情報推定シミュレーション

2次元の仮想海域での漏出情報推定から得た知見を基に、CO<sub>2</sub> 実在海域(苫小牧沖)での推定精度の検証を行った。本研究では3つの漏出地点のケースで、苫小牧沖の海底においてCO<sub>2</sub>の漏出が発生したことを仮定し、漏出情報の推定を行っている。Fig.6にSensorの配置と漏出地点の3ケースを示した。ここではCase1(漏出位置(33750m, 14850m, 39m)、漏出量9.57E-07 kg/m<sup>3</sup>sec、漏出開始時間777,600sec)の推定結果を瞬時測定と連続測定の手法について示す。ここでいう漏出量は濃度フラックスである。

結果として、どちらの手法においても、ピンポイントでの漏出情報の推定を行うことが出来なかったが、漏出地点のおおよその推定を行うことが出来た(Fig.7において評価関数の値が小さい領域が、漏出地点と考えられる)。漏出量の推定でも瞬時測定の手法では3.850E-07 kg/m<sup>3</sup>s、連続測定の手法では6.832E-7kg/m<sup>3</sup>sと、オーダー単位での推定に成功している。

#### 5. 結言

本研究は海底下CCS技術における漏出情報を、現地での測定情報と海洋シミュレーションを元に推定する手法の開発を最大目標として、2次元テスト流れと実在海域での漏出情報推定を複数ケース行うことで、本手法の実用化に向けて必要な知見の獲得に努めた。特に、本研究によって、CO<sub>2</sub>の連続放出に関して、観測値を積分し、 $\psi$ を連続放出する手法と、瞬時の観測値を用い、 $\psi$ を瞬間放出する手法の2つについて、定式化することができた点は新規性のある成果と言える。

さらに、本研究によって、連続漏出に対する推定誤差の知見を得、実用化に向けたいくつかの提案を行うことが出来た。特に、他の領域を含めた多くの先行研究者が、推定対象として扱っていなかった漏出量の推定に対する、推定精度の知見を得ることが出来たことも非常に大きな成果であるといえる。

#### 参考文献

- [1] 森千晶：修士論文，東京大学（2014年）
- [2] Neupauer R. M, Wilson J L. Adjoint method for obtaining backward-in-time location and travel time probabilities of a conservative groundwater contaminant. Water Resources Research 1999; Vol. 35, pp.3389-3398
- [3] Dimov I, A Numerical Approach for Determination of Sources in Transport Equations. Computers Math Appl.; Vol 32, No. 5, pp.31-42.
- [4] MEC Ocean Model : <http://mee.k.u-tokyo.ac.jp/mec/model/index.html>

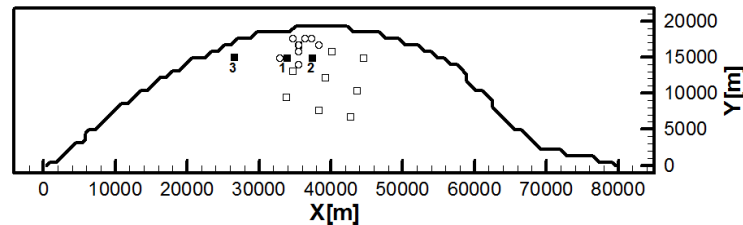


Fig.6 Computational domain of Tomakomai Cal,  
White box: Sensor, Black box: Seepage source

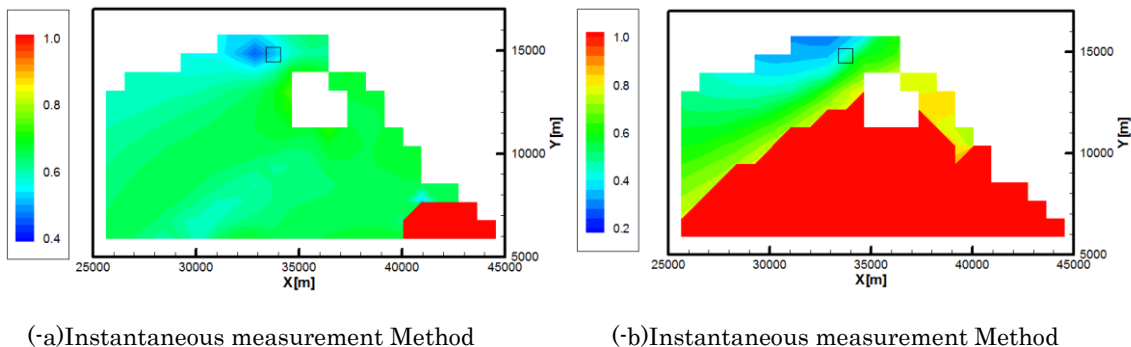


Fig.7 Distribution of Evaluation Function F in two measurement method (at 39 depth,  $\tau = \tau_{est}$ )