

機関番号：82641

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21700314

研究課題名 (和文) GOSAT 衛星により導出された気柱濃度の空間統計手法による改善

研究課題名 (英文) The development of the retrieval of CO₂ and CH₄ column abundance by GOSAT

研究代表者

友定 充洋 (TOMOSADA MITSUHIRO)

(財) 電力中央研究所・システム技術研究所・特別契約研究員

研究者番号：70425833

研究成果の概要 (和文)：衛星 Aqua に搭載された AIRS センサにより得られた乾燥大気中の二酸化炭素濃度 (XCO₂) を対象として、既存の非定常空間予測手法である Universal Kriging に、観測大気下の土地被覆の違いを考慮した XCO₂ の全球分布予測手法を提案した。10,000 程の大規模データに提案手法を適用して全球分布を予測して、XCO₂ の可視化を行った。また、XCO₂ の全球分布を予測する際には、観測大気下の土地被覆の違いを考慮することが有効であることが示された。

研究成果の概要 (英文)：With XCO₂ (i. e., the CO₂ mole fraction in dry air) taken as the targeted measure of trace gas, universal kriging is used to predict the difference in the spatial structure of XCO₂ which arises from the land cover variation under the observed atmosphere. Universal kriging is used to predict XCO₂ from data acquired by the AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) onboard Aqua satellite.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・統計科学

キーワード：空間統計、衛星観測、非定常 Kriging、全球分布予測、空間内挿、GOSAT、対規模データ、土地被覆情報

1. 研究開始当初の背景

近年、地球温暖化やオゾン層の破壊といった大気微量物質の濃度の変化に起因する地球環境問題が深刻になっている。例えば、地球温暖化は、IPCC の報告書によれば、二酸化炭素 (CO₂) やメタン (CH₄) の濃度の増加によることが原因である。また、オゾン層の破壊は、フロンガスによる成層圏のオゾン (O₃) の減少

による。大気微量物質の濃度の変化に起因する地球環境問題を解明するためには、それぞれの大気微量物質の空間的・季節的な動態を把握する必要がある。しかし、現在、全球規模で大気微量物質の動態を把握できるほどの地上観測所はなく、特に地表の約 2/3 を占める海洋ではほとんどない。衛星観測は、ほぼ全球を観測することができる有効な一手

段である。2009年に、CO₂とCH₄の気柱量(単位面積当たりの地表から大気上端までの濃度の積算値)を観測することを目的とした衛星GOSATが打ち上げられた。1)衛星観測によりCO₂とCH₄の気柱量が可能な限り高精度に導出されることが望まれ、また2)観測位置とそのCO₂またはCH₄の気柱量からは、CO₂とCH₄の気柱量の全球分布を読み取ることが困難なため、可視化方法の開発が望まれる。

本研究では、CO₂を対象大気微量気体として、非定常空間分布予測手法の開発を行った。地表付近のCO₂の吸収量および放出量は、土地被覆により異なることが既存の研究により知られている。そのため、観測大気下の土地被覆によりCO₂濃度の空間構造が異なることが考えられる。そこで、観測大気下の土地被覆の違いを考慮することによって、全球分布予測結果の改善が図れることが期待される。また、全球分布予測では、観測地点数が10,000から100,000程と多く、観測値の共分散逆行列の逆行列が通常の方法では得られないことが知られており、全球分布を予測する上で課題となっている。本研究では、この課題に対して、共分散を、逆行列の計算が可能な次元に縮約してモデル化を行い、土地被覆情報を考慮して共分散の逆行列を得ることが可能な予測手法の提案を行った。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は、次の2つである。

空間統計手法を用いて、

(1)衛星観測により導出された二酸化炭素量の改善を図る。

(2)衛星観測により導出された二酸化炭素量の可視化手法の開発を行う。

本研究では、(2)を達成することにより、(1)の目的も満たされるため、(2)について主に検討を行う。

3. 研究の方法

本研究では、地表面をメルカトル図法で投影し、投影図を緯度と経度の方向に1度毎にグリッド化する。投影図のグリッド中心位置 \mathbf{s}_0 の全てにおいてXCO₂を予測することにより全球分布を生成する。

観測地点数を N 、観測位置を緯度と経度で表し、ベクトル $\mathbf{s}_i (i=1 \sim N)$ で記述し、また $\mathbf{s} = (\mathbf{s}_1 \dots \mathbf{s}_N)^T$ とする。 T は転置行列を表す。 \mathbf{s}_i におけるXCO₂を $Z(\mathbf{s}_i)$ と記述し、更に $\mathbf{Z} = (Z(\mathbf{s}_1) \dots Z(\mathbf{s}_N))^T$ とする。

(1) 既存手法

Universal krigingは、次式で記述される。

$$\hat{Z}(\mathbf{s}_0) = \mathbf{x}(\mathbf{s}_0)\boldsymbol{\beta} + \mathbf{c}(\mathbf{s}_0)^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{Z} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}) \quad (1)$$

$\boldsymbol{\beta}$ は未知パラメータ、 $\mathbf{X} = (f_i(\mathbf{s}_i))$ 、 $\mathbf{x}(\mathbf{s}_0) = \mathbf{X}(f_i(\mathbf{s}_0))$ 、 $\boldsymbol{\Sigma}$ は観測位置間のXCO₂の共分散行列 $(C(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_j))$ 、 $\mathbf{c}(\mathbf{s}_0)$ は $(C(\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_0))$ であ

り、 $i=1$ から N 、 $j=1$ から N である。データ数が、10,000程の場合には、 $\boldsymbol{\Sigma}$ の逆行列が通常の方法では得られず、式(1)を用いて \mathbf{s}_0 における予測値を得ることが困難になる。そのため、参考文献1)では、 $\boldsymbol{\Sigma}$ を次式でモデル化し、

$$\boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{S}\mathbf{K}\mathbf{S}^T + \sigma^2\mathbf{V} \quad (2)$$

$\boldsymbol{\Sigma}$ の逆行列は、公式

$$(\mathbf{T} + \mathbf{U}\mathbf{P}\mathbf{W})^{-1} = \mathbf{T}^{-1} - \mathbf{T}^{-1}\mathbf{U}(\mathbf{P}^{-1} + \mathbf{W}\mathbf{T}^{-1}\mathbf{U})^{-1}\mathbf{W}\mathbf{T}^{-1} \quad (3)$$

を用いることによって次式で記述できる。

$$\boldsymbol{\Sigma}^{-1} = (\sigma^2\mathbf{V})^{-1} - (\sigma^2\mathbf{V})^{-1}\mathbf{S}\{\mathbf{K}^{-1} + \mathbf{S}^T(\sigma^2\mathbf{V})^{-1}\mathbf{S}\}^{-1}\mathbf{S}(\sigma^2\mathbf{V})^{-1} \quad (4)$$

ここで、式(2)の \mathbf{S} は2地点の観測位置間の距離に基づく行列である。また、式(3)を用いて逆行列を得るための条件は、式(3)の \mathbf{P} と \mathbf{T} の逆行列が存在することである。 \mathbf{s}_0 におけるXCO₂は、次式により予測される。

$$\hat{Z}(\mathbf{s}_0) = \mathbf{x}(\mathbf{s}_0)\boldsymbol{\beta} + \mathbf{S}(\mathbf{s}_0)\mathbf{K}\mathbf{S}^T\boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\mathbf{Z} - \mathbf{X}\boldsymbol{\beta}) \quad (5)$$

を用いることにより、式(5)の \mathbf{K} は、 \mathbf{S} をQR分解($\mathbf{S} = \mathbf{Q}\mathbf{R}$)することにより、次式を用いて推定する。

$$\hat{\mathbf{K}} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{Q}^T(\hat{\boldsymbol{\Sigma}}' - \hat{\sigma}^2\mathbf{V}')\mathbf{Q}(\mathbf{R}^{-1})^T \quad (6)$$

また、式(2)の σ^2 は、 $\|\boldsymbol{\Sigma} - \hat{\boldsymbol{\Sigma}}\|$ が最小となるように推定する($\hat{\boldsymbol{\Sigma}} = \hat{\mathbf{S}}\hat{\mathbf{K}}\hat{\mathbf{S}}^T + \hat{\sigma}^2\mathbf{V}$)。また、予測値の標準偏差は、次式で与えられる。

$$\sigma(\mathbf{s}_0) = \{\mathbf{S}(\mathbf{s}_0)^T\hat{\mathbf{K}}\mathbf{S}(\mathbf{s}_0) - \mathbf{S}(\mathbf{s}_0)^T\hat{\mathbf{K}}\mathbf{S}^T\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\hat{\mathbf{S}}\mathbf{K}\mathbf{S}(\mathbf{s}_0) + (\mathbf{x}(\mathbf{s}_0) - \mathbf{X}^T\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\hat{\mathbf{S}}\mathbf{K}\mathbf{S}(\mathbf{s}_0))^T \times (\mathbf{X}^T\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\mathbf{X})^{-1}(\mathbf{x}(\mathbf{s}_0) - \mathbf{X}^T\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\hat{\mathbf{S}}\mathbf{K}\mathbf{S}(\mathbf{s}_0))\}^{1/2} \quad (7)$$

参考文献 1) Cressie, N. and Johannesson, G., 2008, "Fixed rank kriging for very large data sets", J, R, Statist, Soc. B, 70(1), pp209-226.

(2) 提案手法

本研究では、土地被覆種を、簡単に海と陸とする。観測地点数 N のうち、海上の観測地点数を N_s 、陸上の観測地点数を N_l とする($N = N_s + N_l$)。 \mathbf{Z} を、初めの N_s 個のXCO₂を $\mathbf{Z}_s = (Z(\mathbf{s}_1) \dots Z(\mathbf{s}_{N_s}))$ 、後の N_l 個のXCO₂を $\mathbf{Z}_l = (Z(\mathbf{s}_{N_s+1}) \dots Z(\mathbf{s}_N))$ となるように並べ替える($\mathbf{Z} = (\mathbf{Z}_s \mathbf{Z}_l)$)。この並べ替えを行うことによって、観測地点間のXCO₂の共分散行列 $\boldsymbol{\Sigma}$ は、次式で表される。

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_{ss} & \boldsymbol{\Sigma}_{sl} \\ \boldsymbol{\Sigma}_{sl}^T & \boldsymbol{\Sigma}_{ll} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$\boldsymbol{\Sigma}_{ss}$ は2地点の観測位置の土地被覆が共に海、 $\boldsymbol{\Sigma}_{ll}$ は共に陸、 $\boldsymbol{\Sigma}_{sl}$ は一方が海で他方が陸の共分散行列である。式(8)を次式でモデル化

する。

$$\Sigma = \mathbf{S}_1 \mathbf{K}_1 \mathbf{S}_1^T + \mathbf{S}_2 \mathbf{K}_2 \mathbf{S}_2^T + \sigma^2 \mathbf{V} \quad (l)$$

ここで、 \mathbf{S}_1 、 \mathbf{S}_2 、 \mathbf{K}_1 、 \mathbf{K}_2 、 σ^2 を次の行列とすると、

$$\mathbf{S}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_{ll} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S}_2 = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{S}_{sl} \\ \mathbf{S}_{ls} & \mathbf{0} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{K}_1 = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{ll} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{K}_2 = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{K}_{sl} \\ \mathbf{K}_{sl}^T & \mathbf{0} \end{pmatrix}$$

$$\sigma^2 = \begin{pmatrix} \sigma_s^2 \mathbf{I}_{N_s} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \sigma_l^2 \mathbf{I}_{N_l} \end{pmatrix}$$

式(フ)の Σ_{ss} 、 Σ_{ll} 、 Σ_{sl} は次式で記述される。

$$\left. \begin{aligned} \Sigma_{ss} &= \mathbf{S}_{ss} \mathbf{K}_{ss} \mathbf{S}_{ss}^T + \sigma_s^2 \mathbf{V}_s \\ \Sigma_{ll} &= \mathbf{S}_{ll} \mathbf{K}_{ll} \mathbf{S}_{ll}^T + \sigma_l^2 \mathbf{V}_l \\ \Sigma_{sl} &= \mathbf{S}_{sl} \mathbf{K}_{sl}^T \mathbf{S}_{ls}^T \end{aligned} \right\} \quad (x)$$

式(x)より、 Σ_{ss} 、 Σ_{ll} 、 Σ_{sl} はそれぞれ2地点の観測位置の土地被覆が、共に海、共に陸、一方が海で他方が陸の観測値の \mathbf{S} および \mathbf{V} で記述されモデル化される。式(l)で表される共分散 Σ の逆行列は、はじめに、

$\Sigma_{2+\sigma V} = \mathbf{S}_2 \mathbf{K}_2 \mathbf{S}_2^T + \sigma^2 \mathbf{V}$ の逆行列を得て、 Σ の逆行列を、 $\Sigma = \mathbf{S}_1 \mathbf{K}_1 \mathbf{S}_1^T + \Sigma_{2+\sigma V}$ の逆行列を公式(h)を用いて計算する。ここで、 \mathbf{K}_2 は、特異行列であるため、逆行列は存在しない。そこで、 $\mathbf{S}_2 \mathbf{K}_2 \mathbf{S}_2^T + \sigma^2 \mathbf{V}$ を次式のように変形して、 $\Sigma_{2+\sigma V}^{-1}$ を得る。

$$\begin{aligned} \Sigma_{2+\sigma V} &= \mathbf{S}_2 \mathbf{K}_2 \mathbf{S}_2^T + \sigma^2 \mathbf{V} \\ &= \mathbf{S}_2 \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{r_s} & \hat{\mathbf{K}}_{ls} \\ \hat{\mathbf{K}}_{ls}^T & \mathbf{I}_{r_l} \end{pmatrix} \mathbf{S}_2 - \begin{pmatrix} \mathbf{S}_{sl} \mathbf{S}_{sl}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{S}_{ls} \mathbf{S}_{ls}^T \end{pmatrix} + \hat{\sigma}^2 \mathbf{V} \\ &= \mathbf{S}_2 \begin{pmatrix} \mathbf{I}_{r_s} & \hat{\mathbf{K}}_{ls} \\ \hat{\mathbf{K}}_{ls}^T & \mathbf{I}_{r_l} \end{pmatrix} \mathbf{S}_2 \\ &+ \begin{pmatrix} \hat{\sigma}_s^2 \mathbf{V}_s + \mathbf{S}_{sl} (-\mathbf{I}_{r_s}) \mathbf{S}_{sl}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \hat{\sigma}_l^2 \mathbf{V}_l + \mathbf{S}_{ls} (-\mathbf{I}_{r_l}) \mathbf{S}_{ls}^T \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (l)$$

式(h)の $\mathbf{S}(\mathbf{s}_0) \mathbf{K} \mathbf{S}^T$ は、

$$\mathbf{S}(\mathbf{s}_0) \mathbf{K} \mathbf{S}^T = \mathbf{S}_1(\mathbf{s}_0) \hat{\mathbf{K}}_1 \mathbf{S}_1^T + \mathbf{S}_2(\mathbf{s}_0) \hat{\mathbf{K}}_2 \mathbf{S}_2^T \quad (o)$$

で記述され、 $\mathbf{S}_1(\mathbf{s}_0)$ と $\mathbf{S}_2(\mathbf{s}_0)$ は、それぞれ次で与えられる。 \mathbf{s}_0 の土地被覆種が海の場合には、

$$\mathbf{S}_1(\mathbf{s}_0) = (\mathbf{S}_{ss}(\mathbf{s}_0) \quad \mathbf{0}), \quad \mathbf{S}_2(\mathbf{s}_0) = (\mathbf{0} \quad \mathbf{S}_{sl}(\mathbf{s}_0))$$

であり、また陸の場合には、

$$\mathbf{S}_1(\mathbf{s}_0) = (\mathbf{0} \quad \mathbf{S}_{ll}(\mathbf{s}_0)), \quad \mathbf{S}_2(\mathbf{s}_0) = (\mathbf{S}_{ls}(\mathbf{s}_0) \quad \mathbf{0})$$

である。

4. 研究成果

衛星 Aqua 搭載センサ AIRS により得られた XCO₂ 値の観測位置を図 1 に示す。観測地点数 N は、10,045 である。

各観測位置に海または陸のラベルを付け、はじめに、海および陸の XCO₂ の空間構造の違いがあるかを検討する。空間構造の違いを、セミ・バリオグラム r で表す。

$$r(h) = \frac{1}{2} \{Z(\mathbf{s}_i) - Z(\mathbf{s}_j)\} \quad (7)$$

ここで、 h は、2地点間の距離を表す。2地点間の土地被覆種の組み合わせは、海と海、陸と陸、海と陸の3通りである。また、CO₂濃度の全球分布は、東西方向より南北方向の方が変化が大きいことが知られている。そこで、2地点間の観測位置の北極方向からの角度を、-22.5度から22.5度(代表して0度と表示)、22.5度から67.5度(45度)、67.5度から112.5度(90度)、112.5度から157.5度(135度)に分けて、それぞれの土地被覆種の組み合わせについて、セミ・バリオグラムを計算し、図 2 に示す。図 2 より、2地点間の土地被覆種の組み合わせおよび北極方向からの角度の違いによりセミ・バリオグラムが異なっている。このことから、土地被覆種によって XCO₂ の空間構造が異なっている。

得られた XCO₂ から土地被覆情報を考慮して式(h)を用いて予測された全球分布を図 3 に示す。また、予測値の標準偏差を図 4 に示す。土地被覆情報を考慮して全球分布を予測することによって、予測値の精度が向上されたかを確認するために、更に、土地被覆情報を考慮しないで全球分布の予測を行った。土地被覆情報を考慮した予測と同様に、予測値の標準偏差を算出した。土地被覆情報を考慮した場合の標準偏差との差を求め、図 5 にヒストグラムで示す。多くのグリッド中心位置で、土地被覆情報を考慮した方が、予測値の標準偏差が小さくなっており、土地被覆情報を考慮することによって、予測値の改善がみられた。

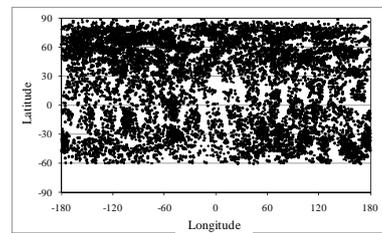
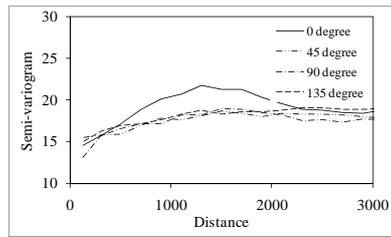
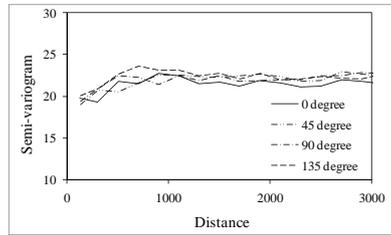


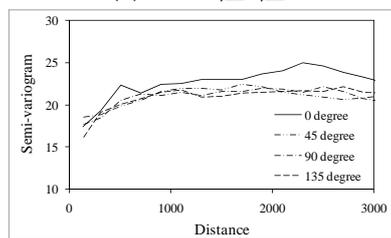
図 1 AIRS センサによる XCO₂ 観測地



(a) 海-海



(b) 陸-陸



(c) 海-陸

図2 各2地点の土地被覆の組み合わせのセミバリオグラム

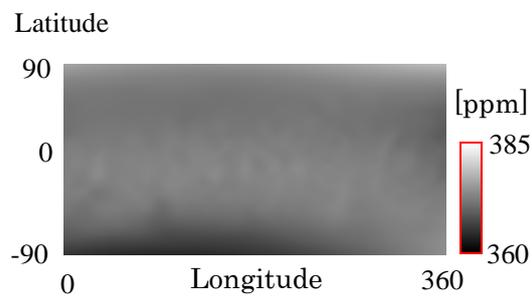


図3 XCO2 全球分布図

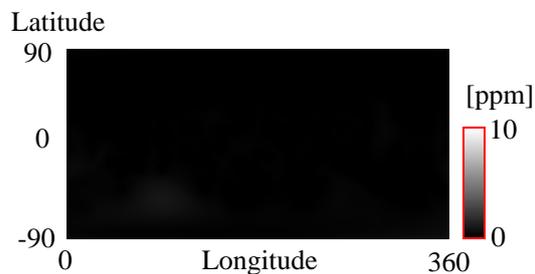


図4 予測値標準偏差

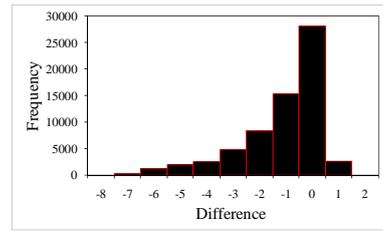


図5 予測値の標準偏差の差
(=標準偏差 (土地被覆情報あり)
- 標準偏差 (土地被覆情報なし))

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① Mitsuhiro Tomosada, Kouji Kanefuji, Yukio Matsumoto, Hiroe Tsubaki, A Prediction Method of the Global Distribution Map of CO₂ Column Abundance Retrieved from GOSAT Observation Derived from Ordinary Kriging, ICCAC-SICE International Joint Conference, 4B12-3, 2009, pp. 4869-4873

[学会発表] (計4件)

- ① Mitsuhiro Tomosada, A prediction Method for the global distribution of CO₂ concentration from irregularly observed locations, 1st Conference of Spatial Statistics 2011, University of Twente, Netherlands, March 23-25, 2011.
- ② Mitsuhiro Tomosada, A Prediction Method for the Global Distribution of Amount from Amounts Acquired at Irregularly Observed Locations, ワークショップ 新領域融合プロジェクト 人間・社会システム データ中心人間・社会科学の創生, 統計数理研究所, 2011年3月1日.
- ③ Mitsuhiro Tomosada, A Prediction Method for the Global Distribution of CO₂ Concentration Introduced Land cover Information into Non-stationary Kriging, The 31st Asian Conference of Remote Sensing, November 1, 2010.

- ④ Mitsuhiro Tomosada, A prediction method of the global distribution of CO2 concentration introduced land cover information into Non-stationary Kriging, Spatial statistics and environmental statistics seminar, Ohio State University, April 14, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

友定 充洋 (TOMOSADA MITSUHIRO)
(財) 電力中央研究所・システム技術研究所・特別契約研究員
研究者番号：70425833

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：